

Universidad de Huelva

Departamento de Historia I



Estudio de la orientación cristalográfica preferente de las plagioclasas en las metabasitas de Acebuches (Macizo Ibérico Meridional)

**Memoria para optar al grado de doctora
presentada por:**

Begoña Duclos Bautista

Fecha de lectura: 8 de octubre de 2004

Bajo la dirección del doctor:

Carlos Fernández Rodríguez

Huelva, 2009

ISBN: 978-84-92679-78-2

D.L.: 252-2009



Universidad de Huelva

Facultad de Ciencias Experimentales

Departamento de Geodinámica y Paleontología

**ESTUDIO DE LA ORIENTACIÓN CRISTALOGRÁFICA PREFERENTE
DE LAS PLAGIOCLASAS EN LAS METABASITAS DE ACEBUCHES
(MACIZO IBÉRICO MERIDIONAL)**

TESIS DOCTORAL

Begoña Duclos Bautista

Huelva, 2004

AGRADECIMIENTOS

Como dijo Pascal “lo último que uno sabe es por dónde empezar”. Realmente me resulta extraño estar escribiendo estas palabras ahora que sigo recordando una anécdota que me sucedió, hace ya bastantes años, en los comienzos de 1º de carrera. Por aquél entonces, un becario de investigación nos habló a unos compañeros y a mí sobre lo que era una tesis doctoral y en qué consistía. Nos quedamos de piedra, nunca mejor dicho, cuando nos comentó que a veces las tesis llegaban a ser tan específicas que se basaban sólo y exclusivamente en el estudio de un único mineral. Entonces no lo entendimos, nos pareció algo increíble... ¿Cómo se podía obtener tanta información de un único mineral hasta el punto de poder hacer un trabajo de investigación de semejante envergadura? Y, paradojas de la vida, terminé haciendo yo una de esas tesis que “no entendía” y en donde la plagioclasa ha sido la protagonista.

Estoy muy agradecida a mi tutor y director de tesis, el profesor Dr. Carlos Fernández Rodríguez, quién me propuso este apasionante trabajo que me fue enganchando poco a poco, casi sin darme cuenta. Creo que el haber estado durante al menos 7 meses midiendo, mañana y tarde, granos de plagioclasas con la platina universal (más de 3500!!), sin dedicarme a ninguna otra cosa que no fuera esa, consiguió hacer que por las noches contara granos en lugar de borreguitos para conciliar el sueño.

No quiero olvidar a Brian Embleton, director ejecutivo del CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), coautor junto con el matemático Nick Ficher del libro de estadística para datos esféricos que tanto he empleado en este trabajo, y quién me puso en contacto con él. A N. Fisher, del ValueMetrics Australia y profesor de la Universidad de Sydney, le estoy muy agradecida por el gran interés que se tomó ante los problemas que me surgieron con su libro, por dedicarme su tiempo, por todos los consejos e intercambio de opiniones a través del correo electrónico desde el otro lado del mundo, y por proporcionarme la lista de erratas de su libro, que fue decisiva para seguir avanzando en mi trabajo. No sé qué hubiera sido sin ellas... A Y. Takahashi, del Instituto de Geociencias y consejero del Centro de Investigaciones Geológicas en Mongolia, por su gratitud e interés al enviarnos algunas de sus publicaciones sobre la OCP de plagioclasas y proporcionarnos su método de medida.

A mis compañeras Ana, Susana y Helena les debo todo el apoyo que me han brindado en estos dos últimos años, sobre todo en la recta final. Compartir con ellas tan buen ambiente de trabajo y complicidad ha sido de gran ayuda y motivación. Desde que las conocí siempre han estado ahí, dispuestas a echarme una mano ante cualquier inquietud y malestar, en mis “peleas personales” con Excel y Freehand, en aquellos momentos en los que el ordenador podía conmigo y aparecía mi otro compañero: la impaciencia.

A mi dos grandes amigos, Sandra y Alfonso, que aunque no nos hemos visto tanto como hubiéramos querido, siempre habéis estado y estaréis en mi corazón, y sé que yo en el de vosotros también. Os estoy muy agradecida por cada charla que hemos tenido, por los paseos contigo, Alfonso, por La Rábida a la hora de almorzar, por los ánimos que me habéis dado en momentos muy delicados, por

saber escuchar y compartir todas mis inquietudes, por animarme a seguir y saber que podía contar con vosotros. Lo mejor de todo es saber que os tendré siempre ahí, igual que vosotros a mí, porque es algo que el tiempo nos ha demostrado en estos 14 años.

No quiero olvidar a todas las personas que en algún momento, desde que empecé esta andadura, aportaron su granito de arena a pesar de que algunas, por circunstancias de la vida, hoy ya no estén. A J., una gran persona y un mejor amigo. Gracias porque me has demostrado que cualquier persona debería sentirse afortunada por contar en la vida con una amistad como la tuya, siempre dispuesto a ayudar a los demás. Has sido mi aliento y mi pañuelo de lágrimas en la etapa más difícil, has sabido oírme cuando más lo necesitaba y has soportado, como nadie, “mis patadas de banco” sin tenerlas en cuenta. Gracias por tu enorme paciencia y comprensión, por hacerme reír y sacar de mí lo mejor cuando menos lo esperaba, por todo lo que he aprendido de ti gracias a tu especial percepción de la vida. Apareciste, sin esperarlo, para tenderme un puente entre Huelva y los madriles. Ya sabemos que Confucio no andaba muy equivocado cuando dijo “mas valen los momentos elegidos por el azar que los elegidos por uno mismo”.

A M.G., a quién pude recurrir cuando lo necesitaba y me ayudó en todo momento. Sé que cuando se enteró que este proyecto llegaba a su fin se alegró de corazón y me lo demostró.

Para el final dejo la guinda del pastel, mi familia. ¿Qué decir de vosotros, papás? Os dedico la tesis y poco es, siempre estaré en deuda. Sin ninguno de los dos nada de esto hubiera sido posible. Ambos habéis sido un constante apoyo, todo lo que pueda decir será poco... Tú, papá, sabes mejor que nadie lo mucho que has contribuido en este trabajo, que es tan tuyo como mío. Gracias por enseñarme a programar, por dedicarme durante 1 año todos tus días, incluidos sábados y domingos, invierno y verano, por dejar de lado tus aficiones, sobre todo la pintura, y ayudarme a ver tras cada sombra un rayo de luz.

Marta, sabes que te quiero un montón aunque me cueste trabajo demostrarlo. Desde la distancia siempre te has preocupado por cómo me iban las cosas. Gracias por hacerme ver la realidad desde un punto de vista muy diferente al que tenía, por hacerme poner los pies en tierra cada vez que me veías encaramarme a una nube. Y no puedo olvidar a tu pequeño Antón, que apareció en un gran momento, me alegró la vida y llenó de ilusión. Y qué decir de mis otros dos hermanos, a quienes estoy muy agradecida también. Carlos, tu ayuda y contribución en este trabajo han dado su fruto, has tenido paciencia y me has demostrado tu interés y minuciosidad repitiendo las cosas tantas veces como fuera necesario hasta dar con la tecla correcta. Guillermo, tú has sido la voz de la experiencia y me has dado siempre tus mejores consejos en estas “lides” que tan bien conoces, estoy muy satisfecha de tu especial contribución, siempre confié en que algo especial saldría. Y es que, al fin y al cabo, la envoltura de un regalo también es importante. Estoy muy orgullosa de contar con hermanos como vosotros.

Quizás más de uno dudasteis de mí en algún momento, pero al final, tarde o temprano, todo termina llegando. Y cuando llega... Caray, ¡qué alivio y satisfacción!

RESUMEN

Se ha elaborado un nuevo método para la determinación de la Orientación Cristalográfica Completa (OCP) de agregados de plagioclasa maclados, mediante la utilización de una Platina Universal de 4 ejes acoplada a un microscopio óptico. Se trata de un programa informático (PLAG-9) que supera las limitaciones de otros métodos disponibles hasta el momento.

PLAG-9 se basa en las relaciones angulares (como una función del contenido en anortita) entre los ejes ópticos y las direcciones y planos cristalográficos considerados por Burri et al. (1967) en su 2 estereogramas para Leyes de Macla Normal y Paralela / Compleja. Para cada grano de plagioclasa maclado medido con la Platina Universal. PLAG-9 determina a qué tipo de macla ajusta y el porcentaje de anortita que le corresponde. Finalmente, obtiene las orientaciones del resto de elementos cristalográficos (un total de 16) para ese mismo contenido en anortita.

En este trabajo se han estudiado un total de 12 muestras orientadas correspondientes a 2 cortes geológicos diferentes (un total de 3 secciones por cada muestra y 100 granos de media en cada una de las secciones). Las muestras proceden de un área que experimentó 3 eventos tectono-metamórficos: las metabasitas de Acebuches (anfíbolitas y esquistos máficos), un tipo de rocas metamórficas ortoderivadas que experimentaron un acusado gradiente de temperatura.

Para cada uno de los 16 elementos cristalográficos de las 12 muestras, se han hecho Diagramas de Densidad de Polos (DDP). Los tipos de distribuciones obtenidas han sido tratadas con las diferentes técnicas de análisis estadísticas disponibles hasta el momento para datos esféricos (Test de Uniformidad de Bigham y Ajne, Ajuste a la distribución de Watson, Diagramas de Woodcock, etc). También se ha visto como evoluciona la composición de la plagioclasa y el tipo de maclas que llegan a desarrollar en función de la temperatura, la intensidad de la deformación y la distancia al techo estructural de la serie de las metabasistas.

Finalmente, se han obtenido y discutido los sistemas de deslizamiento activos en plagioclasas en función del corte geológico, la temperatura y la deformación, estableciéndose por primera vez una transición de fábricas para los límites de facies esquistos verdes-anfíbolitas y anfíbolitas-granulitas.

A mis padres, por supuesto.

*También a ti, abuela,
nunca te olvido.*

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL DE LA TESIS.....	13
1.2. HIPÓTESIS Y MATERIAL DE TRABAJO	14
1.3. PLAN DE TRABAJO	15
1.4. PLAN DE LA MEMORIA	15
1.5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	16
1.6. ENCUADRE GEOLÓGICO	18
1.7. EL DOMINIO OCEÁNICO: LAS METABASITAS DE ACEBUCHES.....	19
1.7.1. Eventos tectono-metamórficos sufridos por las metabasitas y principales estructuras	19
• Deformación asociada al evento metamórfico de AT/BP (D_1 - M_1)	20
• Deformación asociada a la zona de cizalla Suribérica (D_2 - M_2)	21
• Deformación asociada a la zona de cizalla Norte.....	24
1.7.2. Tipos litológicos.....	24
• Anfibolitas bandeadas con y sin clinopiroxeno	25
• Anfibolitas cizalladas	26
• Esquistos máficos.....	26
1.7.3. Modelo de evolución tectono-metamórfica de las metabasitas.....	27
1.7.4. Las plagioclasas de las metabasitas de Acebuches	28
2. ANTECEDENTES DE LA DEFORMACIÓN Y LA ORIENTACIÓN CRISTALOGRÁFICA PREFERENTE DE PLAGIOCLASAS	31
2.1. ESTRUCTURA Y CRISTALOGRAFÍA DE LAS PLAGIOCLASAS.....	31
2.1.1. Introducción	31
2.1.2. Estructura cristalina y química general.....	32
• Miembros extremos de la serie de las plagioclasas.....	37
- Albita	37
- Anortita	38
• Plagioclasas de composición intermedia.....	40
2.2. MECANISMOS DE DEFORMACIÓN: ASPECTOS GENERALES.....	41
2.2.1. Introducción	41
2.2.2. Procesos que compiten durante la deformación	45
2.2.3. Proceso de recuperación (recovery)	45

2.2.4. Recristalización	46
• Recristalización dinámica	46
- Recristalización por límites de grano	47
- Recristalización por rotación de subgranos.....	48
• Recristalización estática	49
2.3. MECANISMOS DE DEFORMACIÓN EN PLAGIOCLASAS	50
2.4. TIPOS DE MACLAS EN PLAGIOCLASAS	55
2.4.1. Introducción	55
2.4.2. Génesis de las maclas	57
• Maclas de crecimiento.....	57
• Maclas de transformación	57
• Maclas de deslizamiento.....	58
2.4.3. Clasificación morfológica: Leyes de maclas	59
• Maclas Normales.....	59
• Maclas Paralelas	60
• Maclas Complejas	61
2.4.4. Clasificación estructural.....	61
• Maclas por pseudomeroedría	61
• Maclas por pseudomeroedría reticular.....	62
2.4.5. Algunos tipos de maclas	63
• Carlsbad	64
• Baveno.....	65
• Manebach.....	66
• Albita y Periclina.....	66
2.4.6. Evidencias de maclado en muestras naturales de plagioclasas	70
2.4.7. Estudios experimentales de maclado mecánico en plagioclasas	72
2.5. ORIENTACIÓN CRISTALOGRAFICA PREFERENTE (OCP) DE LOS AGREGADOS DE PLAGIOCLASA Y ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTOS SOBRE LOS SISTEMAS DE DESLIZAMIENTO ACTIVOS EN PLAGIOCLASAS	74
2.5.1. Introducción	74
2.5.2. Orientación cristalográfica en plagioclasas.....	74
• Dependencia del contenido de anortita en la determinación de la OCP	76
• Dependencia de la orientación de la lámina delgada en la determinación de la OCP	78
2.5.3. Tipos de OCP en plagioclasas y sentido de cizalla inferido a través de la OCP.....	79
2.5.4. Sistemas de deslizamiento activos en plagioclasas	80

3. METODOLOGÍA	86
3.1. TRABAJO DE CAMPO.....	86
3.2. PREPARACIÓN DE SECCIONES ORIENTADAS.....	92
3.3. USO DE LA PLATINA UNIVERSAL Y OTROS MÉTODOS PARA MEDIR LA ORIENTACIÓN CRISTALOGRAFICA DE PLAGIOCLASAS.....	95
3.3.1. Localización de los ejes de la indicatriz óptica en plagioclasas	97
3.3.2. Método de medida.....	97
3.3.3. Otros métodos alternativos.....	101
3.4. DETERMINACIÓN DE LA OCP COMPLETA DE AGREGADOS DE PLAGIOCLASA: PROGRAMA INFORMÁTICO PLAG-9	102
3.4.1. Método gráfico.....	102
3.4.2. Método analítico	104
• Sistemas de coordenadas.....	104
- Coordenadas geográficas	105
- Coordenadas geológicas.....	105
• Fundamento y operaciones realizadas por el programa PLAG-9	106
• Convenio de signos según los hemisferios de proyección	112
• Programación: comentarios y problemas	112
• Tipos de archivos.....	115
• Partes del programa.....	117
- Primera parte (PLAG-9-1)	117
- Segunda parte (PLAG-9-2).....	118
3.5. PROYECCIÓN ESFÉRICA DE LOS DATOS DE OCP DE PLAGIOCLASAS: USO DEL PROGRAMA STERONET	119
3.6. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO EMPLEADAS EN ESTE TRABAJO.....	122
3.6.1. Tipos de distribuciones ideales de datos axiales esféricos. Test de uniformidad de Bingham.....	125
3.6.2. Bondad de ajuste a la distribución de Watson.....	127
• Distribución bipolar	128
- Procedimiento gráfico.....	128
- Procedimiento matemático.....	129
• Distribución en corona.....	131
- Procedimiento gráfico.....	131
- Procedimiento matemático.....	132
3.6.3. Test de uniformidad de Ajne.....	134
3.6.4. Gráficos BDA (Bingham-Distancia-Ajne).....	137

3.6.5. Gráficos de Woodcock	137
3.6.6. Gráficos <i>S</i> (<i>Strength</i>) frente a distancia	140
3.6.7. Gráficos <i>Su</i> , <i>An/n</i> y <i>S</i> (valores medios y desviación estándar) frente a distancia	140
4. RESULTADOS.....	142
4.1. DESCRIPCIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS LÁMINAS	142
4.1.1. Variaciones en el tamaño de grano	144
4.1.2. Microestructuras en cristales seleccionados de plagioclasea	145
4.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CORTE DE ALMONASTER LA REAL.....	162
4.2.1. Planos de ajuste y frecuencia de maclado	162
• Composición de la plagioclasea	166
4.2.2. Descripción de los diagramas de densidad de polos de los elementos cristalográficos de la plagioclasea	169
4.2.3. Resultados del test de bondad de ajuste a Watson.....	202
4.2.4. Resultados del test de uniformidad de Ajne	205
4.2.5. Gráficos BDA (Bibgham-Distancia-Ajne)	206
4.2.6. Gráficos de Woodcock	208
4.2.7. Gráficos SD (<i>Strength</i> frente a distancia)	212
4.2.8. Gráficos <i>Su</i> , <i>An/n</i> y <i>S</i> (valores medios y desviación estándar) frente a distancia	218
• Estadístico de Bingham (<i>Su</i>)	219
• Estadístico de Ajne normalizado (<i>An/n</i>)	220
• Intensidad de fábrica o <i>Strength</i> (<i>S</i>)	220
4.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CORTE DE VEREDAS	222
4.3.1. Planos de ajuste y frecuencia de maclado	222
• Composición de la plagioclasea	226
4.3.2. Descripción de los diagramas de densidad de polos de los elementos cristalográficos de la plagioclasea	228
4.3.3. Resultados del test de bondad de ajuste a Watson.....	244
4.3.4. Resultados del test de uniformidad de Ajne	245
4.3.5. Gráficos BDA (Bibgham-Distancia-Ajne)	246
4.3.6. Gráficos de Woodcock	253
4.3.7. Gráficos SD (<i>Strength</i> frente a distancia)	259
4.3.8. Gráficos <i>Su</i> , <i>An/n</i> y <i>S</i> (valores medios y desviación estándar) frente a distancia	265
• Estadístico de Bingham (<i>Su</i>)	265
• Estadístico de Ajne normalizado (<i>An/n</i>)	266
• Intensidad de fábrica o <i>Strength</i> (<i>S</i>)	266

4.4. VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS FÁBRICAS CRISTALOGRÁFICAS DE PLAGIOCLASAS EN LAS METABASITAS DE ACEBUCHES	267
4.4.1. Almonaster la Real.....	267
4.4.2. Veredas	268
5. DISCUSIÓN.....	268
5.1. COMPARACIÓN ENTRE LAS FÁBRICAS CRISTALOGRÁFICAS DE PLAGIOCLASA MEDIDAS EN ESTE TRABAJO Y LAS OBTENIDAS POR OTROS AUTORES.....	269
5.1.1. Introducción	269
5.1.2. Los diferentes contextos geológicos estudiados	273
5.1.3. Fábricas de anfíbol en las metabasitas de Acebuches. Posible influencia en la OCP de las plagioclasas	281
5.2. INTERPRETACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DESLIZAMIENTO ACTIVOS EN LAS PLAGIOCLASAS DE LAS METABASITAS DE ACEBUCHES	284
5.2.1. Introducción	284
5.2.2. Sistemas de deslizamiento en las metabasitas no afectadas por la ZCS	285
5.2.3. Sistemas de deslizamiento en las metabasitas afectadas por la ZCS	288
5.2.4. Tipos de fábricas en función de la temperatura y de la deformación en la ZCS.....	290
5.2.5. Resumen de los sistemas de deslizamiento en los cortes de Almonaster la Real y Veredas.....	291
5.3. COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE DESLIZAMIENTO ACTIVOS EN PLAGIOCLASAS DEDUCIDOS EN ESTE TRABAJO Y LOS OBTENIDOS POR OTROS AUTORES	294
5.3.1. Anfibolitas bandeadas del corte de Almonaster la Real.....	295
5.3.2. Anfibolitas bandeadas del corte de Veredas	296
• (010)[100] como sistema de deslizamiento principal	297
• (010)[100] como sistema de deslizamiento secundario.....	297
5.3.3. Anfibolitas cizalladas de los cortes de Almonaster la Real y Veredas	299
5.3.4. Esquistos verdes del corte de Almonaster la Real.....	299
5.3.5. Otros planos y/o direcciones de deslizamiento.....	300
5.4. APORTACIONES DE ESTE TRABAJO	301
5.4.1. Aportaciones al estudio de la OCP y de los sistemas de deslizamiento en plagioclasas	301
5.4.2. Aportación al estudio del maclado en plagioclasas metamórficas.....	306
5.4.3. Aportaciones al conocimiento regional de las metabasitas de Acebuches.....	306
6. CONCLUSIONES.....	310
7. REFERENCIAS	315

8. APÉNDICES..... 335

Apéndice A - Listado y funcionamiento del programa PLAG-9..... A1-A67

Apéndice B - Resultados estadísticos de Almonaster la Real B1-B18

Apéndice C - Resultados estadísticos de Veredas C1-C15

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

*“Lo último que uno sabe,
es por dónde empezar”*

Pascal (1623-1661)

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la fábrica cristalográfica de las plagioclasas se encuentra en un estadio muy embrionario de desarrollo, a pesar de que estos feldespatos constituyen una de las fases minerales más abundantes de la corteza terrestre. Esta carencia de conocimientos es especialmente llamativa cuando se compara con el estado actual del estudio de la orientación cristalográfica preferente (OCP) de otros minerales tales como el cuarzo, el olivino o incluso ciertos carbonatos como la calcita y la dolomita.

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL DE LA TESIS

Las plagioclasas constituyen una serie de composición variable entre la albita y la anortita, lo que queda reflejado en una notable diversidad de las estructuras cristalinas que pueden llegar a presentar. Además, al tratarse de un mineral de simetría triclinica, la orientación de la indicatriz óptica respecto a los elementos cristalográficos varía con la composición de la plagioclasa. Esto contribuye, enormemente, a que la medición sistemática y estadísticamente significativa de la OCP de las plagioclasas constituya un trabajo tremendamente tedioso. Es por esta razón que muy

pocos autores se hayan dedicado a su investigación y que se disponga en la actualidad de muy pocos datos de observación de la orientación cristalográfica de las plagioclasas en rocas naturales. Así mismo, tampoco se han llevado a cabo avances significativos en cuanto a la caracterización experimental o teórica en este campo, dadas las limitaciones impuestas por la variedad composicional de dicho mineral.

Por otro lado, dado el aceptable nivel de conocimientos a nivel regional que se tiene hoy en día sobre las metabasitas de Acebuches, en las que las plagioclasas constituyen alrededor de un 50% de la roca, nos pareció oportuno plantear un trabajo sistemático de determinación de la OCP de las plagioclasas en estas rocas. Por tanto, el tema y principal objetivo de esta tesis es la caracterización de los cambios que se verifican en la OCP de las plagioclasas al variar la temperatura o la intensidad de la deformación.

1.2. HIPÓTESIS Y MATERIAL DE TRABAJO

Para llevar a cabo el trabajo planteado hemos elegido las metabasitas de Acebuches dado que cumplen los siguientes requisitos:

- Son rocas metamórficas, ortoderivadas, procedentes del metamorfismo de un segmento de corteza oceánica que quedó pinzado durante el ciclo Varisco entre rocas de afinidad continental, constituyendo una de las escasas suturas reconocidas hasta el momento en el Cinturón Varisco europeo. El factor composicional de la roca puede ser filtrado en este caso, dado que las metabasitas de Acebuches constituyen una roca de composición notablemente uniforme.
- Por otro lado, el acusado gradiente de temperatura que muestran estas rocas en relación con el primer evento metamórfico que han sufrido, garantiza una variación de al menos 200°C.
- Por último, el cinturón de metabasitas fue afectado por una zona de cizalla de importancia regional, la zona de cizalla Suribérica, que afectó únicamente a la mitad inferior de la lámina de las metabasitas, produciendo una importante milonitización y transformación de la fábrica previa.

Hasta el momento, no se ha abordado un estudio de esta naturaleza con un control de las variables que pueden afectar al desarrollo de las OCP tan exhaustivo como el que se propone en este caso. Por todas estas razones, las metabasitas de Acebuches constituyen un material de primera calidad para abordar con éxito un estudio de la OCP de plagioclasas con garantía de obtener resultados de elevado interés. Estos resultados darán, sin lugar a dudas, un impulso al conocimiento que se tiene actualmente sobre los patrones y procesos que caracterizan el desarrollo de las fábricas cristalográficas en las plagioclasas.

1.3. PLAN DE TRABAJO

- Desarrollo de un programa informático específico para platina universal de 4 ejes, para la obtención de la orientación cristalográfica completa de cristales maclados de plagioclasas en muestras naturales.
- Estudio, mediante platina universal, y utilización del programa desarrollado en el apartado anterior, para la medición de la OCP de las plagioclasas de dos cortes seleccionados en las metabasitas de Acebuches, uno a la altura de la localidad de Almonaster la Real, y el otro en las cercanías de la aldea de Veredas.
- Tratamiento de los datos obtenidos y representación en diagramas de densidad de polos de las OCP obtenidas para los diferentes elementos cristalográficos.
- Discusión de los resultados y obtención de las correspondientes conclusiones.

1.4. PLAN DE LA MEMORIA

La memoria de esta tesis ha sido dividida en seis capítulos. En el primero de ellos hacemos una introducción acerca del conocimiento que se tiene hasta la fecha sobre las metabasitas de Acebuches, la localización geográfica del área de estudio y su encuadre geológico. En el siguiente se hace una descripción pormenorizada del estado actual de conocimientos sobre la estructura y cristalografía de las plagioclasas, los mecanismos de deformación que las afectan, los tipos (o modelos) de orientación cristalográfica preferente que desarrollan, los tipos de maclas y los sistemas de deslizamiento que pueden llegar a activarse como consecuencia de la deformación. Estos dos últimos puntos son de gran interés. El primero de ellos porque el programa informático que se desarrolla en esta tesis se basa, entre otras cosas, en los tipos de maclas consideradas por Burri *et al.* (1967). Y en el caso de los sistemas de deslizamiento porque éstos pueden llegar a deducirse a partir de los diagramas de densidad de polos de los diferentes elementos cristalográficos considerados, también, por Burri *et al.* (1967). En el tercer capítulo se trata la metodología, haciendo especial hincapié en el programa informático creado para la determinación de la OCP de las plagioclasas y en las diferentes técnicas estadísticas de las que disponemos hasta el momento para: (1) el tratamiento de los datos medidos con la platina universal, y (2) los calculados por dicho programa informático. En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos para los dos cortes seleccionados, Almonaster la Real y Veredas, y se procede a una interpretación de la variación de la OCP de las plagioclasas al variar la temperatura o la intensidad de la deformación, así como de las semejanzas y/o diferencias significativas entre las muestras de ambos cortes. En el quinto capítulo procedemos a la discusión de los resultados, centrándonos, sobre todo, en los sistemas de deslizamiento activos que pueden llegar a identificarse en las metabasitas de Acebuches con la ayuda de los diagramas de densidad de polos de los elementos cristalográficos estudiados. Finalmente, en el sexto y último capítulo de conclusiones, procedemos a resumir lo que un estudio tan pormenorizado como el llevado a cabo en este trabajo de investigación, a escala microestructural, aporta de nuevo a lo que ya se conocía sobre OCP y sistemas de deslizamiento activos en plagioclasas.

1.5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

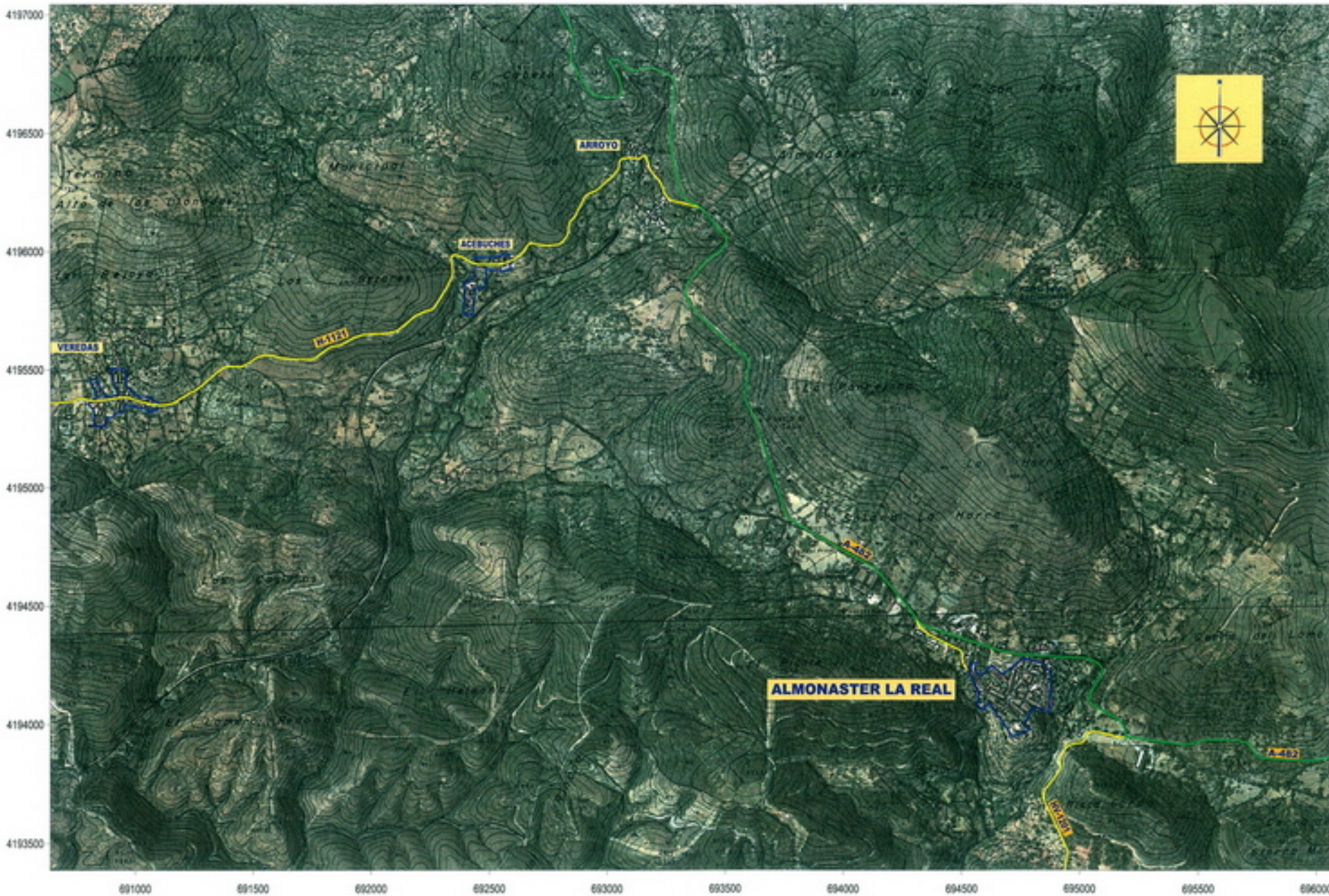
Nuestra área de estudio se encuentra situada en el SO de la Península Ibérica, en la zona norte de la provincia de Huelva, dentro del Paraje Natural de Sierra de Aracena y Picos de Aroche. El trabajo se ha centrado en las inmediaciones del pueblo de Almonaster la Real (6°O 47' 10'' longitud, 37°N 52' 23'' latitud) y la aldea de Veredas (6°O 49' 43'' longitud, 37°N 53' 07'' latitud) que pertenece al mismo municipio. Esta zona comprende, parcialmente, la hoja 917 de Aracena del mapa topográfico de España a escala 1:50.000.

Almonaster la Real se encuentra a 110 km de Huelva capital. Se sitúa en el PK.6 de la carretera local A-470 (fig.1.1) que desde Cortegana enlaza con la N-435 de Badajoz-Huelva (margen derecho) en el PK.138.4. Desde Almonaster la Real se llega a la aldea de Veredas (situada al ONO, a 5.6 km) por la A-470 en dirección a Cortegana. A una distancia de 2.7 km, en el PK.3.4, se coge el desvío a la carretera HV-1121 que pasa por las aldeas de Arroyo y Acebuches hasta llegar, finalmente, a Veredas, a una distancia de 3 km al cruce.

La altitud media de la zona oscila en torno a los 600 m. El relieve no es excesivamente acusado, aunque se llegan a encontrar, en ocasiones, desniveles que alcanzan los 300 m. La zona de mayor altitud de la provincia de Huelva se localiza, precisamente, en Almonaster la Real, en el Cerro San Cristóbal (912.7 m). Las muestras para esta tesis se han tomado en los caminos marcados con un trazo rojo en el mapa de localización geográfica. Uno de ellos es el camino de subida al mencionado Cerro San Cristóbal, que arranca desde Almonaster la Real hacia el N, entre el PK.6 y el PK.7. El resto se han tomado en Veredas, en un camino que arranca, también hacia el N, entre La Rejoja y Los Bezares. Para conocer la situación exacta (coordenadas) de las muestras, ver la Tabla III.1 y la fig. 3.2 del capítulo de metodología.



Fig.1.1. Mapa de localización geográfica del área de estudio a escala 1:15.000. En negro, coordenadas UTM (Huso 29N) y en rojo, coordenadas geográficas. Se detallan las carreteras comarcales de acceso a Almonaster la Real y Veredas, así como los caminos (a trazo rojo) en donde se han tomado las muestras.



1.6. ENCUADRE GEOLÓGICO

El Macizo Ibérico ocupa la mayor parte de la mitad occidental de la Península Ibérica y representa el afloramiento más occidental de la Cadena Varisca (fig.1.2). Es también el mayor de los dominios de esta cadena que no ha sido retocado de manera significativa por la deformación alpina.

Ha habido muchos intentos de división del Macizo Ibérico. El primero en proponer una fue Lotze (1945). Divisiones más recientes fueron propuestas por Julivert *et al.* (1972), Ribeiro *et al.* (1987a), Quesada & Ribeiro (1989) y Quesada (1991). En la actualidad, la división más aceptada es la que comprende, de N a S, las Zonas Cantábrica, Asturoccidental-Leonesa, Galicia-Tras-Os-Montes, Centroibérica, Ossa-Morena y Surportuguesa (Quesada, *op.cit.*).

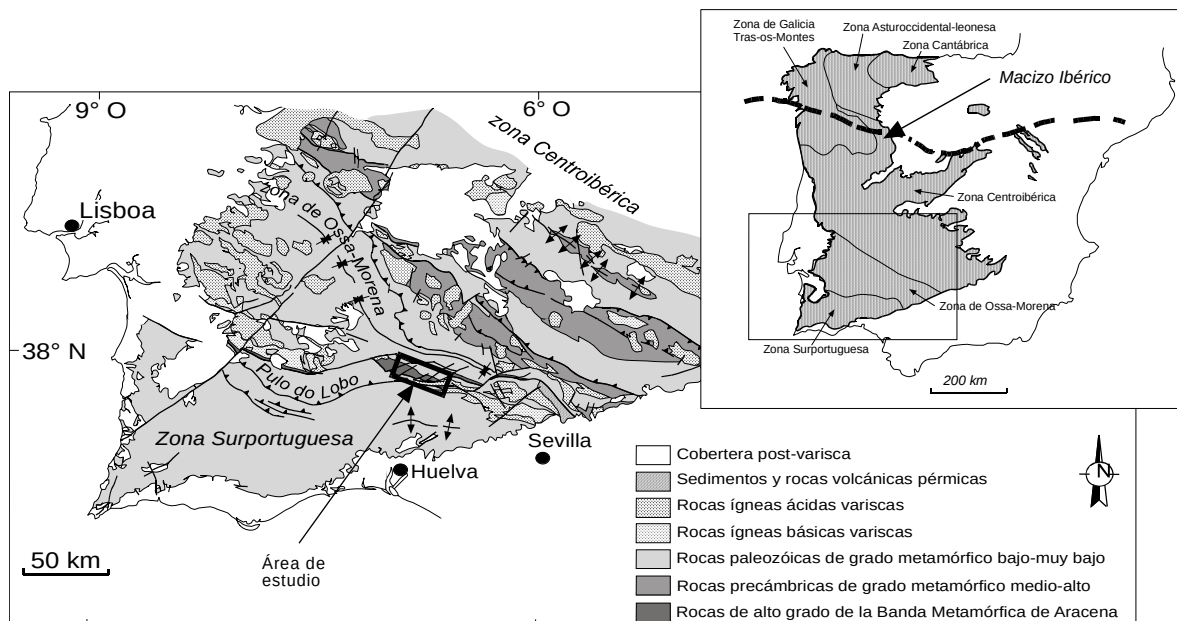


Fig.1.2. Estructuras principales de las zonas de Ossa-Morena y Surportuguesa, donde se observa la localización de la banda metamórfica de Aracena y el área de estudio de este trabajo. En el recuadro de la parte superior derecha se sitúa esta zona del SO peninsular dentro del Macizo Ibérico, en la zona Surportuguesa concretamente (modificado de Díaz Azpiroz, 2001).

Las metabasitas de Acebuches (a las que haremos referencia más adelante) se sitúan dentro de la banda metamórfica de Aracena (BMA), definida por Bard en su tesis (1969). Ésta se sitúa en la zona de Ossa-Morena (ZOM), junto a su contacto con la zona Surportuguesa (ZSP), en el extremo suroccidental del Macizo Ibérico. Desde que Bard definiera la banda metamórfica de Aracena, esta área ha sido tradicionalmente conocida como un cinturón metamórfico de alta temperatura y baja presión (Miyashiro, 1973; Grapes & Graham, 1978; Begin, 1992).

La clasificación de la BMA que seguiremos en este trabajo será la propuesta por Castro *et al.* (1999). Según estos autores, la banda metamórfica de Aracena se divide en dos grandes dominios: un dominio de características oceánicas (DO), situado al Sur, y otro dominio de naturaleza continental (DC), localizado al N del anterior. Nosotros nos hemos centrado, sólo y

exclusivamente, en el dominio oceánico y hemos obviado el continental, ya que el objetivo de la presente tesis es el estudio de las metabasitas de Acebuches, las cuales se integran dentro del dominio oceánico. El contacto DC-DO se encuentra subrayado por la zona de cizalla Norte (CZN) que afecta al techo de las metabasitas de Acebuches, y que fue denominada zona de cizalla de Calabazares por Díaz Azpiroz (2001). Se sugiere que la evolución tectónica de ambos dominios ha sido, al menos en parte, independiente la una de la otra ya que el DO no está afectado por las mismas estructuras que el DC (Díaz Azpiroz, *op.cit.*) y ha sufrido un número menor de fases de deformación.

1.7. EL DOMINIO OCEÁNICO: LAS METABASITAS DE ACEBUCHES

Dentro del dominio oceánico se han diferenciado dos grandes grupos de rocas: las metabasitas de Acebuches y el Terreno de Pulo do Lobo, ambos separados por la zona de cizalla Suribérica (Crepo-Blanc & Orozco, 1988) que marca el contacto entre la ZOM y la ZSP. En la parte N se encuentran las mencionadas metabasitas, objeto de estudio de esta tesis, y que entran en contacto con el dominio continental a través de la zona de cizalla Norte. Afloran en una banda estrecha de aproximadamente 1 km de espesor y se extienden a lo largo de unos 100 km, desde Beja (Portugal) hasta Almadén de la Plata (provincia de Sevilla, España). A partir de los estudios geoquímicos llevados a cabo por Bard & Moine (1979) y Dupuy *et al.* (1979), estos autores consideraron que las variaciones químicas de las metabasitas de Acebuches fueron heredadas del basalto original, el cual presentaba afinidad toleítica. Esto ha sido también confirmado en trabajos posteriores (Munhá *et al.* 1986, Quesada *et al.* 1994 y Castro *et al.* 1996b) en donde se pone de manifiesto que proceden del metamorfismo de un basalto oceánico de tipo MORB. Estos últimos autores consideran que las diferencias entre los distintos litotipos de la secuencia de las metabasitas son producto, exclusivamente, del metamorfismo y la deformación.

La serie de anfibolitas está formada, fundamentalmente, por rocas básicas de afinidad oceánica que han sufrido un metamorfismo de grado medio a alto y cabalgan hacia el S sobre el Terreno de Pulo do Lobo. Este último consiste en esquistos pelíticos, con bandas de cuarcitas intercaladas, que han sufrido un metamorfismo de grado bajo a medio. Esta unidad fue interpretada por Eden (1991) como un prisma de acreción.

1.7.1. Eventos tectono-metamórficos sufridos por las metabasitas y principales estructuras

La evolución estructural y metamórfica de las metabasitas de Acebuches incluye, al menos, dos episodios contrastados. El primero, y más antiguo, consiste en una fase de deformación que afectó esencialmente al techo de la banda de metabasitas (D_1). Esta etapa es contemporánea con un metamorfismo de baja presión y alta temperatura (M_1) que muestra un gradiente invertido de temperaturas (Castro *et al.* 1996a). Una segunda fase de deformación da lugar a una

milonitización (D_2) y retrometamorfismo (M_2) en la base de las metabasitas, originando la llamada zona de cizalla Suribérica (Crespo-Blanc & Orozco, 1988). Otra zona de cizalla, la llamada zona de cizalla Norte, actuó durante o con posterioridad a D_2 , afectando al techo de la banda de las metabasitas. Las dataciones radiométricas han permitido establecer la edad de M_1 - D_1 en 328-341 Ma (Castro *et al.* 1999). No se dispone de edades para las fases más modernas. A continuación, se expondrán con más detalle las características de cada uno de estos eventos.

La deformación asociada al evento metamórfico de AT/BP (D_1 - M_1)

La fase D_1 afectó exclusivamente a las rocas de mayor grado metamórfico. Consistió en una deformación rotacional acompañada de un metamorfismo de grado medio-alto en condiciones de AT/BP, en el cual la temperatura registrada en las asociaciones minerales metamórficas aumenta desde la base estructural de la serie de las metabasitas hacia el techo. Por tanto, el gradiente metamórfico aparece en la actualidad invertido. En los niveles superiores de la serie de las metabasitas, las anfibolitas alcanzaron la transición de facies anfibolitas-granulitas, habiéndose alcanzado la isógrada del clinopiroxeno.

En cuanto a las temperaturas, las más altas, cercanas a los 800°C, se alcanzaron en el techo estructural del apilamiento, donde cristalizó el clinopiroxeno y se produjo fusión parcial de la anfibolita. A medida que se desciende en la serie, la temperatura disminuye según un gradiente metamórfico anómalamente alto (siempre por encima de 100°C/km), hasta temperaturas que rondan los 650°-700°C y presiones máximas de 4 kbar.

Asociada a D_1 , y en los niveles superiores de la serie, se desarrollan una foliación metamórfica (S_1) y una lineación mineral poco penetrativa (L_1). La intensidad de esta fábrica es máxima en el techo estructural y disminuye progresivamente al aumentar la distancia al mismo. No obstante, D_1 no es completamente homogénea y pueden encontrarse niveles en los que la fábrica es más penetrativa que en rocas situadas estructuralmente por encima.

La orientación de la foliación se mantiene aproximadamente constante, con dirección NO-SE y buzando al norte. La lineación mineral no siempre se llega a ver, y cuando se aprecia se encuentra poco desarrollada y con un cabeceo muy alto ($>40^\circ$), lo que implica que el eje largo del elipsoide de la deformación finita que produjo estas estructuras tenía una inclinación importante sobre el plano de la foliación. La dirección de inmersión de la mencionada lineación varía entre NE y ESE.

La fase D_1 fue, probablemente, una deformación rotacional por cizalla. Esta deformación produjo estructuras S-C, algunas de las cuales se han conservado en zonas menos deformadas (anfibolitas bandeadas de tamaño de grano medio). Con el incremento de la deformación en los niveles de mayor temperatura (anfibolitas bandeadas de tamaño de grano grueso con clinopiroxeno), la foliación S_1 rota y se va disponiendo paralela a los planos C. La asimetría que presentan las estructuras S-C y S-C', así como algunos porfiroblastos rotados, indican un deslizamiento del bloque de techo hacia el SO. S_1 presenta una dirección ESE-ONO, buza al NNE y su orientación es bastante constante. L_1 presenta un cabeceo medio y siempre con inmersión al

NE. Por lo tanto, la primera fase de deformación constituyó, teniendo en cuenta la posición actual de la serie, un cabalgamiento vergente al SO con un pequeño componente de movimiento senestro.

La deformación asociada a la zona de cizalla Suribérica (D_2 - M_2)

Las metabasitas de Acebuches cabalgan, mediante la zona de cizalla Suribérica, sobre el Terreno de Pulo do Lobo. El contacto entre ambas unidades fue definido por Crespo-Blanc & Orozco (1988) como la zona de cizalla Suribérica (ZCS). Esta mantiene una dirección ONO-ESE, buza fuertemente al N y presenta una estructura imbricada de cabalgamientos que divergen a partir de la zona de cizalla basal y que son los responsables de la repetición de los diferentes litotipos en los que se subdivide la serie de Acebuches (Díaz Azpiroz, 2001). La ZCS está afectada por fallas frágiles tardías, de dirección NE-SO y con salto en dirección senestro, las cuales son responsables de un desmembramiento de la banda de metabasitas en numerosas escamas (ver mapa geológico, fig.3.2). La ZCS se caracteriza por el desarrollo de una banda de unos 150-200 m, asociada a una intensa deformación de carácter milonítico que se sobreimpone a otra anterior relacionada con el evento metamórfico de alta temperatura (Fonseca & Ribeiro, 1993; Quesada *et al.* 1994, Castro *et al.* 1996b). La ZCS representa, por tanto, el resultado de la actuación de una segunda fase de deformación que llegó a borrar localmente las estructuras de la primera fase.

Al contrario de lo que sucede con la primera fase de deformación (D_1), las rocas afectadas por la ZCS presentan una gran cantidad de criterios cinemáticos de sentido de movimiento. Es por ello que se dispone de una gran cantidad de información acerca de la cinemática de la segunda fase de deformación asociada a la ZCS. El hecho de que esta deformación afecte a una estructura plano-linear, producto de una deformación anterior, puede provocar errores a la hora de interpretar los criterios cinemáticos (Passchier & Simpson, 1986; Passchier & Williams, 1996). Sin embargo, dos factores permiten asegurar que las observaciones que se hacen son correctas: (a) la segunda fase de deformación ha sido tan intensa que ha borrado cualquier resto de la foliación anterior, luego no se está interpretando el efecto de una deformación sobre una estructura previa, sino una serie de estructuras completamente neoformadas durante la segunda fase de la deformación, (b) todas las observaciones encaminadas a deducir el sentido de movimiento de esta fase de deformación han sido hechas en secciones perpendiculares a la foliación milonítica y paralelas a la lineación de estiramiento. La mayoría de los criterios son congruentes con un desplazamiento en planta senestro.

Asociada a D_2 se desarrollan una foliación milonítica (S_2) y una lineación de estiramiento (L_2). Ambas son muy penetrativas en la base de la serie de Acebuches, así como en los esquistos pelíticos de Pulo do Lobo que se encuentran en contacto con ella. El desarrollo de la foliación milonítica lleva asociada una disminución progresiva del tamaño de grano. Esta disminución es máxima también en la base de la serie. D_2 es una deformación rotacional, asociada a la cual se desarrollan una serie de estructuras típicas de zonas de cizalla:

- *Pliegues*: desarrollados en condiciones de cizalla simple con intensidades altas de deformación. Son de flancos más abiertos en los niveles medios de la serie, donde afectan a S_1 . Según nos acercamos a la zona de influencia de la ZCS, los pliegues van haciéndose más cerrados. La evolución en su geometría es debida a un aumento en la intensidad de la deformación y va parejo a la obliteración de las estructuras previas, así como al desarrollo de la foliación milonítica (S_2) paralela al plano axial de los pliegues. La variación en la simetría de los pliegues indica que la dirección de transporte es cercana a la dirección de la lineación de estiramiento L_2 (Díaz Azpiroz, 2001).
- *Estructuras S-C y S-C'*: predominan las fábricas planares sencillas resultantes del paralelismo entre planos S y C y, ocasionalmente, en algunas zonas menos deformadas (anfíbolitas cizalladas), se conservan algunos planos S oblicuos a la orientación de la cizalla. Esto es indicativo de una intensidad importante de la deformación. En las zonas más deformadas (esquistos máficos) es habitual la generación de superficies C', típicas de estadios avanzados de la deformación.
- *Estructuras tardías de carácter dúctil-frágil*: se asocian a los últimos estadios de D_2 , donde se desarrollan una serie de estructuras que pueden estar asociadas a una deformación en condiciones de transición dúctil-frágil. Entre estas estructuras se encuentran fallas frágiles de longitud centimétrica, crenulaciones extensionales de deslizamiento normal e inverso, pliegues abiertos que afectan a la foliación milonítica, así como una foliación filonítica asociada a los niveles más bajos, los esquistos máficos, que se acompaña de estrías frágiles.

Las estructuras plano-lineares relacionadas con la ZCS, son visibles únicamente en la parte inferior de la serie. Por su parte, las anfíbolitas de la parte superior no están afectadas por esta zona de cizalla o, al menos, la deformación no ha sido lo suficientemente intensa como para superimponerse a las estructuras generadas durante la primera fase de deformación. La lineación de estiramiento asociada a la ZCS presenta una inmersión variable. La lineación, al O de la aldea de Veredas, pincha hacia el NO. A medida que se atraviesa esta población, en dirección E, la lineación se dispone casi horizontal hasta que, finalmente, invierte su dirección de inmersión hacia el SE, aspecto que es ya patente en las cercanías de la localidad de Almonaster la Real. Se deduce de ello que la variación en la orientación de la lineación de estiramiento es gradual. Sin embargo, al contrario de lo que ocurre con la lineación, la foliación se mantiene bastante constante. Para explicar la variación en la inmersión de la lineación de estiramiento se pueden considerar dos hipótesis:

- La primera de ellas tiene en cuenta que, originalmente, la lineación tenía una orientación aproximadamente constante, con pequeñas variaciones en zonas como Almonaster la Real y Veredas. Estas variaciones pudieron acentuarse por una rotación posterior de las estructuras, de modo que la lineación de estiramiento pasara a inclinarse al O de Veredas en sentido contrario al resto.
- La segunda hipótesis consiste en considerar que la dispersión y la bipolaridad observada en la lineación de estiramiento son originales, es decir, se desarrollaron en el momento en el que se generaron las estructuras.

La primera hipótesis podría explicarse si se considera que con posterioridad a la formación de las estructuras, éstas se vieron afectadas por una última fase de plegamiento registrada en la banda metamórfica de Aracena. Otra posibilidad sería que, una vez formadas todas las estructuras, toda la serie sufrió una rotación en bloques, de modo que el eje de rotación se hubiera situado en dirección perpendicular a la foliación previa. En este caso, la lineación habría variado de orientación sin que la dirección de la foliación se hubiese visto afectada. Díaz Azpiroz (2001) puso a prueba la primera de las hipótesis. Teniendo en cuenta la disposición de las estructuras, aplicó una rotación de más de 50° en torno a un eje coincidente con la línea de charnela del Antiforme de Los Ciries. El resultado fue que no observó una reorientación de las lineaciones con disminución de sus dispersiones. Todo esto, sumado al carácter transicional de la región situada entre las zonas con inclinaciones opuestas de la lineación y a que se descarta la presencia de fallas, como las que deberían causar una rotación de eje normal a la foliación y que tampoco aparecen en la cartografía, hacen poco probable que sea la rotación de bloques la responsable de la distribución observada en la lineación de estiramiento. Como consecuencia de todo ello, Díaz Azpiroz (2001), basándose en el modelo de Lin *et al.* (1998), propuso la siguiente hipótesis: la zona de cizalla Suribérica consistió en una zona transpresiva, con un componente de cizalla simple que generó un movimiento senestro cabalgante. El componente de cizalla pura produjo acortamiento perpendicular a la foliación y estiramiento según una dirección cercana al buzamiento de la zona de cizalla. La deformación finita alcanzó valores medios a altos y, en general, el componente de cizalla simple fue más importante que el de cizalla pura. Las zonas con predominio absoluto de cizalla simple desarrollarían lineaciones inclinadas hacia el SE, mientras que las zonas con mayor importancia relativa de la cizalla pura darían lugar a lineaciones inclinadas hacia el NO.

En resumen, todas las estructuras descritas en las anfibolitas cizalladas y en los esquistos máficos, asociadas a D_2 , presentan una cinemática aparentemente senestra. S_2 tiene una orientación constante, de dirección NO-SE y buza al NE. L_2 muestra una distribución bipolar, con buzamientos suaves hacia el SO y el NE. Esta distribución responde a un modelo de cizalla transpresiva según el cual, la zona de cizalla Suribérica se habría generado por efecto de un movimiento de cizalla senestro, con una ligera componente inversa. Esta deformación por cizalla simple estaría acompañada por una deformación por cizalla pura, cuyo máximo acortamiento sería perpendicular a la foliación, y cuyo máximo estiramiento tendría un alto cabeceo sobre el plano ideal que marcaría la zona de cizalla.

Asumiendo que los niveles superiores de las anfibolitas cizalladas y los inferiores de las anfibolitas bandeadas soportaron condiciones muy similares de presión y temperatura, M_2 produjo un retrometamorfismo desde facies de las anfibolitas (en torno a 650°C) hasta las facies de los esquistos verdes. Las relaciones de fases y la química mineral sugieren que durante este evento retrógrado, la presión se mantuvo aproximadamente constante, por debajo de los 4 kbar (Díaz Azpiroz, 2001).

La deformación asociada a la zona de cizalla Norte

En el contacto DC-DO hay una banda, cuyo espesor varía entre 1 y 5 m, de anfibolitas de Acebuches de facies de alta temperatura (con clinopiroxeno) que están afectadas por la zona de cizalla Norte. Diversos criterios indican que su cinemática es de cabalgamiento, casi puro, vergente al SSO. Se trata de una zona de cizalla que puede llegar a afectar no sólo a la parte alta de la serie de Acebuches, es decir, a las anfibolitas bandeadas con clinopiroxeno, sino también a las rocas de muro del dominio continental situadas al N de las metabasitas. Esto implicaría que durante la actuación de dicha zona de cizalla ambos dominios, continental y oceánico, estaban ya en contacto. El hecho de que la deformación asociada a la ZCN se limite a una banda tan estrecha implica que ésta sólo afecte a la parte más alta de la serie de las metabasitas de Acebuches y nunca llegue a observarse en la parte baja de la serie, a la que sí afectó, sin embargo, la ZCS. A priori, no existe criterio alguno que permita establecer, sin lugar a dudas, la relación temporal existente entre ambas estructuras (ZCN y ZCS), aunque Castro *et al.* (1996b) justifican en sus trabajos que la zona de cizalla Norte es posterior a la Suribérica.

La deformación de esta zona de cizalla es muy heterogénea, tiene carácter dúctil-frágil y llega a plegar a la foliación de alta temperatura (S_1), pudiendo llegar incluso a borrarla por efecto de una intensa milonitización. La milonitización (S_3), definida por un bandeo composicional anfíbol/plagioclasa, provoca que las bandas de tamaño de grano grueso, debidas al metamorfismo de alta temperatura y baja presión previo a la actuación de la cizalla, resulten transpuestas quedando entre ellas unos límites difusos y poco claros. Cuando los límites del bandeo están presentes, suelen ser oblicuos a la foliación milonítica, la cual es una foliación de plano axial, tiene orientación ESE-ONO y sobre ella se observa una lineación de estiramiento (L_3) de alto cabeceo.

1.7.2. Tipos litológicos

Según sus características estructurales y metamórficas, las metabasitas de Acebuches se clasifican en cuatro litotipos principales. Estos son, de techo a muro estructural de la serie, los siguientes:

- Anfibolitas bandeadas de grano grueso con clinopiroxeno (Pl + Hb + Cpx)
- Anfibolitas bandeadas de grano medio sin clinopiroxeno (Pl + Hb)
- Anfibolitas cizalladas (Pl + Hb $\pm$ Act)
- Esquistos máficos (Pl + Act + Epi $\pm$ Chl $\pm$ Hb)

Las dos primeras litologías preservan las estructuras que se generaron durante la primera fase de deformación del DO (D_1). Están afectadas por el evento metamórfico de alta temperatura (M_1) y no, sin embargo, por la ZCS. A diferencia de las anfibolitas bandeadas, las estructuras de los dos últimos litotipos se deben al efecto de la zona de cizalla Suribérica (ZCS). Los cuatro litotipos, en su conjunto, afloran en bandas paralelas de potencia variable y siguen la dirección y el buzamiento de las estructuras regionales principales. Suelen producirse repeticiones por el efecto de los cabalgamientos asociados a la ZCS.

Anfibolitas bandeadas con y sin clinopiroxeno

Las anfibolitas bandeadas se caracterizan por la alternancia de bandas de diferentes tamaños de grano, de espesor centimétrico a decimétrico, y cuyos límites suelen estar bastante bien definidos. Se han atribuido diferentes orígenes a este bandeo. Así, por ejemplo, Crespo-Blanc (1991), Fonseca & Ribeiro (1993) y Quesada *et al.* (1994) lo interpretan como una textura ígnea heredada consistente en gabros acumulados o complejos de diques-en-diques. Quesada *et al.* (*op.cit*) identifican las bandas de tamaño de grano fino con bordes enfriados de diques. A priori, no parece que el bandeo tenga como origen unos gabros bandeados ya que en ese caso las bandas presentarían diferencias composicionales entre ellas y Castro *et al.* (1996b) no encontraron, en sus estudios geoquímicos, diferencias químicas significativas entre bandas de diferentes tamaños de grano. Además, los supuestos bordes enfriados de los diques desaparecerían por el efecto del metamorfismo de alta temperatura que afectó a estas rocas. Es por ello que estas observaciones ponen en entredicho el origen ígneo del bandeo. Castro *et al.* (*op.cit*) sugieren que la diferencia del tamaño de grano entre bandas podría deberse a diferencias en el contenido en fluidos durante el metamorfismo, de manera que aquellas bandas con menor proporción de fluidos tendrían mayor índice de nucleación y presentarían, por tanto, un tamaño de grano menor.

El bandeo se encuentra mejor desarrollado en las anfibolitas con clinopiroxeno que afloran en la parte estructuralmente más alta de la pila anfibolítica, en contacto directo con el DC situado al N. En ocasiones, el bandeo está acompañado de ligeras variaciones en las proporciones modales de las dos fases principales de la roca: anfíbol y plagioclasa, aunque no se llegan a definir variaciones importantes en cuanto a la composición química de las diferentes bandas (Castro *et al.* 1996b). Paralelamente al bandeo de tamaño de grano, se dispone una foliación metamórfica muy bien definida por prismas alargados de anfíbol y *ribbons* estirados de plagioclasa.

En las anfibolitas bandeadas con clinopiroxeno, el tamaño de grano es muy variable. La longitud media de los granos de plagioclasa varía entre 0.15 y 0.6 mm, mientras que la de los anfíboles varía entre 0.1 y 1 mm. Este bandeo le da a la roca un aspecto característico en el que las bandas claras, de tamaño de grano grueso a muy grueso, alternan con bandas más oscuras de tamaño de grano fino a medio. En las anfibolitas sin clinopiroxeno, el tamaño medio de los granos se reduce y se hace más uniforme, 0.15-0.2 mm para las plagioclasas y 0.1-0.4 mm para los anfíboles.

Hacia muro en la serie, desaparece el clinopiroxeno y se reduce el tamaño de grano de las anfibolitas, al mismo tiempo que el bandeo de tamaño de grano y la foliación metamórfica se hacen menos penetrativas. Es decir, el tamaño de grano disminuye hacia las zonas menos deformadas debido a la actividad de la fase D_1 . Aunque estas observaciones pueden parecer contradictorias, los diagramas CSD (Marsh, 1988) obtenidos por Díaz Azpiroz (2001) en las anfibolitas bandeadas, sugieren que el tamaño de grano disminuye con el aumento de la tasa de nucleación durante el metamorfismo. Cuanto menor es la temperatura, mayor es la tasa de nucleación, lo que explica la variación textural descrita. Además, el hecho de que la primera fase

de deformación esté asociada a un evento metamórfico invertido de alta temperatura, acompañado probablemente de abundante circulación de fluidos, hace que la blastesis de nuevos granos y el crecimiento de los ya presentes sean más importantes que la reducción de tamaño de grano producida por la deformación cizallante. Por ello, las anfibolitas bandeadas de tamaño de grano grueso corresponden a rocas más deformadas que las de grano medio.

Anfibolitas cizalladas

Las anfibolitas cizalladas presentan la misma mineralogía que las anfibolitas bandeadas sin clinopiroxeno, pero la diferencia estriba en que se encuentran afectadas texturalmente por la ZCS. Como la deformación asociada a esta zona de cizalla es bastante heterogénea, la potencia de las bandas de anfibolitas cizalladas es muy variable, entre 10 y 300 m.

Hacia la parte baja de las anfibolitas bandeadas, éstas se ven afectadas por un proceso de deformación que genera el plegamiento del bandeo de tamaño de grano y de la foliación metamórfica de alta temperatura. Estos pliegues, suaves y muy abiertos hacia techo, se van apretando a medida que se descende en la serie. En los niveles en los que los pliegues llegan a ser cerrados, las estructuras originadas durante el evento metamórfico de alta temperatura llegan a quedar borradas por la deformación posterior (Díaz Azpiroz, 2001). En su lugar, se observa una foliación milonítica de plano axial. Este autor considera ese nivel como el contacto entre las anfibolitas bandeadas, cuya foliación principal es S_1 , y las anfibolitas cizalladas en las que la foliación principal es S_2 . Por lo tanto, la foliación principal de las anfibolitas cizalladas es debida al episodio D_2 .

Esquistos máficos

Los esquistos máficos, también afectados por la ZCS, se diferencian de las anfibolitas cizalladas en que su composición mineral es producto de un metamorfismo de menor grado. En niveles cercanos a la ZCS suele ser habitual encontrar intercalaciones de los esquistos terrígenos de Pulo de Lobo (Castro *et al.* 1996b). En general, los esquistos máficos presentan una foliación milonítica muy penetrativa, con una reducción importante del tamaño de grano y desarrollo de planos paralelos al límite de la zona de cizalla. Estos planos están definidos por cristales prismáticos muy alargados de anfíbol y *ribbons* de plagioclasa, así como por bandas milimétricas de $\text{Epi} \pm \text{Act} \pm \text{Chl}$. A medida que bajamos hacia el muro de la serie, el tamaño de grano disminuye y la foliación metamórfica se va haciendo menos patente. En la parte basal de la serie hay zonas en las que la deformación es tan heterogénea, que afloran bloques de anfibolitas de grano medio, menos deformadas, rodeadas por esquistos máficos muy cloritizados que han sufrido una intensa deformación y que presentan una foliación milonítica muy penetrativa.

1.7.3. Modelo de evolución tectono-metamórfica de las metabasitas

Con posterioridad a la tesis de Bard (1969), han surgido numerosos estudios acerca del metamorfismo en las metabasitas. Se basan tanto en la composición del anfíbol (Bard, 1970, Castro *et al.* 1996b) como en estudios termobarométricos del par Hbl-Pl (Díaz Azpiroz *et al.* 1997). El metamorfismo experimentado por la serie de Acebuches ha sido datado recientemente, mediante $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, por Dallmeyer *et al.* (1993) y Castro *et al.* (1999), arrojando edades entre 328 ± 1.2 Ma y 340.6 ± 1.6 Ma.

Es comúnmente aceptado que las metabasitas de Acebuches sufrieron un evento metamórfico cuyo gradiente está en la actualidad invertido (Bard, 1969, 1970; Crespo-Blanc, 1991; Castro *et al.* 1996b). A partir de esta hipótesis, han sido varios los modelos propuestos para explicar la evolución metamórfica de estas rocas. Bard (*op.cit.*) consideró que la totalidad del apilamiento había sido afectado por un único evento metamórfico de alta temperatura y baja presión, de carácter invertido. Definió en las metabasitas de Acebuches una zonación metamórfica basada en el color de los anfíboles, según la cual el grado de metamorfismo aumentaría hacia el norte. También determinó gradientes geotérmicos elevados (75-100 °C/km) en condiciones de baja presión. Crespo-Blanc (1991), por su parte, consideró que la zona de cizalla Suribérica llevaba asociada un metamorfismo retrógado. Castro *et al.* (1996b) definieron la evolución metamórfica de la serie de Acebuches mediante un metamorfismo AT/BP, sobre el que se impuso un retrometamorfismo asociado a la ZCS. Otros investigadores (Quesada & Munhá, 1990; Dallmeyer *et al.* 1993, Fonseca & Riberiro, 1993 y Quesada *et al.* 1994) consideran que la inversión del gradiente geotérmico de las metabasitas de Acebuches no se debe al carácter originalmente invertido del metamorfismo, sino que fue posterior al evento AT/BP, mediante una inversión tectónica. Por consiguiente, y con respecto a la posición invertida de las isógradas de las metabasitas de la serie de Acebuches, hay dos explicaciones posibles: (a) el metamorfismo pudo tener originalmente un carácter invertido, de forma que las metabasitas fueron calentadas desde arriba, y (b) las metabasitas pudieron ser calentadas desde abajo, es decir, las isógradas se dispondrían inicialmente en una posición normal y sufrieron posteriormente una inversión tectónica.

La serie de Acebuches y su equivalente en Portugal, el complejo ofiolítico de Beja, han merecido el interés de un gran número de investigadores, probablemente debido al carácter oceánico de estas rocas. En los primeros trabajos, llevados a cabo en el límite meridional de la zona de Ossa-Morena, no se conocía el carácter oceánico de las anfíbolitas de Acebuches. Además, la no presencia de un metamorfismo de alta presión fue uno de los argumentos más utilizados para descartar la presencia de una zona de subducción relictas (Bard, 1969; Schermerhorn, 1971, 1975; Munhá, 1979). En trabajos posteriores se tuvo ya en cuenta la presencia de los restos de una antigua corteza oceánica que representaba un límite convergente en el que se habría producido subducción de litosfera oceánica hacia el N (Bard, 1971, 1972; Bard *et al.* 1973; Vegas & Muñoz, 1976; Oliveira, 1980, Vegas, 1980; Ribeiro & Silva, 1983; Simancas, 1983; Pacheco-Santos *et al.* 1985; Santos *et al.* 1987; Ribeiro *et al.* 1987b; Silva *et al.* 1990; Crespo-Blanc, 1991; Giese *et al.* 1994; Castro *et al.* 1996a, b, 1999). Probablemente, el aspecto

más controvertido es la presencia de un metamorfismo AT/BP en una posible zona de subducción. Es por ello que han sido muchos los intentos y teorías para explicar esta característica. Para una explicación más detallada sobre los modelos propuestos, ver Díaz Azpiroz (2001). En nuestro trabajo, seguiremos el modelo de Castro *et al.* (1996a, b), desarrollado posteriormente por Díaz *et al.* (1997), El-Biad *et al.* (1997), Castro *et al.* (1999), El-Himidi (2000), El-Biad (2000) y Díaz Azpiroz (2001). El mencionado modelo consiste en la subducción de una dorsal oceánica bajo el bloque continental representado por la actual zona de Ossa-Morena. Este proceso llevó implícito la migración de una unión triple y el desarrollo de una ventana litosférica (*slab window*) a través de la cual la astenosfera se puso en contacto con la base de la litosfera continental, donde produjo una importante anomalía térmica. Esta anomalía sería la responsable del metamorfismo de AT/BP en el DC de la BMA. A medida que la dorsal sobrepasaba puntos concretos de la placa superior al migrar la unión triple, se produciría la subducción de la nueva placa oceánica en dichos puntos (las metabasitas de Acebuches), la cual sería calentada desde arriba por el bloque continental. Esto explicaría la presencia del gradiente invertido en las metabasitas. El calentamiento de la corteza oceánica favoreció que la parte superior de ésta fuera añadida a la base del bloque continental, de forma que la zona de subducción se iría trasladando hacia abajo, generando la zona de cizalla Suribérica, la cual es la responsable del cabalgamiento del bloque continental y de las metabasitas de Acebuches sobre el prisma de acreción, hoy representado por la unidad de Pulo do Lobo. No obstante, y dado el carácter esencialmente temático de este trabajo, el establecimiento y comprobación de un determinado modelo tectónico no es un punto esencial de la argumentación.

1.7.4. Las plagioclasas de las metabasitas de Acebuches

En numerosos estudios de metabasitas naturales procedentes de rocas metamórficas se ha comprobado que la proporción de la molécula anortita es directamente proporcional a la temperatura a la que se formó la plagioclase (Grapes & Graham, 1978; Laird, 1980; Lair & Albee, 1981; Plyusnina, 1982; Maruyama *et al.* 1983 y Moody & Jenkins, 1983). Normalmente, esta variación no es lineal. En rocas de bajo grado la plagioclase es de composición albitica. Con el incremento de la temperatura se produce el *gap* de la peristerita, que provoca una desmezcla de dos plagioclasas: albita y oligoclase. Un aumento posterior de la temperatura daría lugar a la superación del *solvus* y a la formación de una sola plagioclase, cuya composición correspondería a una oligoclase o a una andesina (Liou *et al.* 1974; Laird, 1980; Laird & Albee, 1981; Plyusnina, 1982; Maruyama *et al.* 1983).

Según los estudios llevados a cabo por Díaz Azpiroz (2001), las plagioclasas de las metabasitas de Acebuches, formadas durante M_1 , presentan una composición que varía de oligoclase a andesina ($\approx An_{30-60}$) en las anfibolitas bandeadas con clinopiroxeno. Aunque la variedad de la composición de las plagioclasas dentro de la mismas muestras llega a ser importante. Se comprueba la existencia de una cierta tendencia hacia composiciones más sódicas en los niveles inferiores de las anfibolitas bandeadas. Esta concuerda con el carácter invertido de M_1 . En los niveles superiores de las anfibolitas cizalladas (M_2), la composición media de la plagioclase varía entre An_{15} y An_{45} . Si se observan los blastos que presentan variaciones

composicionales importantes, se comprueba que presentan una zonación, con un núcleo de andesina y un borde de oligoclasa. En consecuencia, se deduce que las composiciones más cálcicas, observadas en plagioclasas de las metabasitas metamorfizadas, son relictas del metamorfismo de AT/BP (M_1), mientras que las composiciones más sódicas corresponden al evento de retrometamorfismo.

Capítulo 2

ANTECEDENTES DE LA DEFORMACIÓN Y LA ORIENTACIÓN CRISTALOGRÁFICA PREFERENTE DE PLAGIOCLASAS

2. ANTECEDENTES DE DEFORMACIÓN Y ORIENTACIÓN CRISTALOGRÁFICA PREFERENTE DE PLAGIOCLASAS

2.1. ESTRUCTURA Y CRISTALOGRAFÍA DE LAS PLAGIOCLASAS

2.1.1. Introducción

Los feldespatos constituyen alrededor de un 60% de la corteza terrestre, siendo el mineral más abundante en muchos tipos de rocas. La química cristalina de estos minerales es complicada debido a fenómenos tales como exsolución, solución sólida, polimorfismo y, frecuentemente también, el maclado. De esta manera, los feldespatos registran una gran cantidad de información sobre sus condiciones de formación. La interpretación de dicha información no es siempre sencilla, pero tenemos que tener en cuenta que la cristalquímica de estos minerales supone una herramienta de gran importancia y utilidad para el correcto entendimiento de las rocas que los contienen. Para alcanzar un conocimiento apropiado de las relaciones entre feldespatos, es necesario caracterizarlos no sólo de acuerdo a su composición química, sino también a su estado estructural, y este último depende de la temperatura de cristalización y de la consiguiente historia térmica.

El nombre *feldespato* deriva de las palabras alemanas “feld” y “spar”. La palabra “feld” significa *campo* y “spar” es un término utilizado para minerales de colores claros. Antes de 1950 la nomenclatura de las plagioclasas era relativamente sencilla, aunque esto era debido, en gran parte, al enorme desconocimiento que se tenía acerca de las complejidades estructurales de este mineral. El término *plagioclase*, elegido por Breithaupt (1847) en base al ángulo oblicuo entre los dos sistemas principales de exfoliación, viene a referirse a la serie completa de feldespatos sódico-cálcicos. La *oligoclase* fue llamada así por Breithaupt (1826) a partir de *oligos* (pequeño) y *klasis* (romper) debido a que se pensaba que su exfoliación era menos perfecta que la de la albita. La *andesina* fue llamada, originalmente, andesita (usado ahora como nombre de roca) por Abich (1841) a partir de su aparición en los Andes. La *labradorita* fue así llamada por Werner (1780) a partir de un espécimen encontrado en la Isla de St. Paul, en la Península de Labrador. La *bytownita* debe su nombre a Steacy & Rose (1982) y se refiere a Bytown (ahora Ottawa, Canadá). El término *anortita* fue atribuido a este mineral por Rose (1923). Y por último, el término *albita* procede del latín *albus*, que significa blanco, en alusión a su color.

En 1987, las interpretaciones de algunas de las características estructurales de las plagioclasas eran todavía objeto de controversia. Desde un punto de vista elemental, la plagioclasea puede ser considerada únicamente en términos de su composición química y estado estructural. En el primer caso, la composición puede ser calculada; pero en el segundo de los casos, el estado estructural depende de la disposición y complejidad atómica. En cuanto al estado estructural, es incuestionable que hay una única serie de plagioclasas de alta temperatura cuya estructura es

termodinámicamente estable en el *solidus*. Sin embargo, es probable que no haya una única serie de plagioclasas de baja temperatura. Cabe esperar que muestras naturales de plagioclasas asignadas a la serie de baja temperatura, de acuerdo con los datos ópticos y de rayos-X, probablemente no presenten un único conjunto de propiedades estructurales, es decir, que no se pueda predecir necesariamente la distribución atómica a partir, meramente, del contenido de anortita y de un indicador estructural.

2.1.2. Estructura cristalina y química general

Las formas principales que exhiben los cristales de plagioclasa son similares a las de los feldespatos alcalinos. Debido a la ligera oblicuidad del hábito triclinico de las plagioclasas, éstas difieren muy poco de algunos feldespatos monoclinicos. La estructura cristalina de los feldespatos consiste en el marco estructural básico de los tectosilicatos aluminicos, es decir, una red infinita compuesta por tetraedros de SiO_2 y AlO_4 . Los átomos de oxígeno se ubican en los vértices de los tetraedros, de manera que cada vértice comparte su átomo de oxígeno con el vértice del tetraedro contiguo. Centrado en cada tetraedro hay un átomo de Si^{4+} o Al^{3+} . Cada átomo de Si^{4+} contrarresta electroestáticamente los cuatro átomos de oxígeno de su tetraedro, pero en el caso de los tetraedros con Al^{3+} , estos no están equilibrados. Es por ello, que el balance de carga se mantiene por la entrada de iones (M) en los lugares intersticiales. Debido a que hay un lugar intersticial por cada cuatro tetraedros, y que están completamente ocupados, la fórmula ideal de un feldespato es: MT_4O_8 , siendo $M = \text{K}, \text{Na}, \text{Ca}$ y $T = \text{Al}$ y Si . Según sea M , se pueden diferenciar los feldespatos en tres miembros extremos: ortoclasa (KAlSi_3O_8), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Existe otra manera de expresar la fórmula general para los tres tipos de feldespatos, y es:



donde A representa el K y/o Na , y B representa el Ca . Los feldespatos en los que $x = 0$ constituyen los feldespatos alcalinos, mientras que aquellos en los que x tiene un valor comprendido entre 0 y 1 son los feldespatos plagioclasa.

La estructura de estos minerales puede considerarse como una incorporación del Al a la red tetraédrica de SiO_2 y, al mismo tiempo, por la incorporación de Na^+ , K^+ o Ca^{2+} en los huecos disponibles. Cuando un sólo Si^{4+} , por unidad de fórmula del feldespato, es sustituido por Al^{3+} , la estructura puede neutralizarse por la incorporación de un K^+ o un Na^+ . Del mismo modo, cuando dos Si^{4+} son sustituidos por dos Al^{3+} , la carga electroestática de la red puede equilibrarse con la entrada de un catión divalente como el Ca^{2+} . En la estructura de las plagioclasas la cantidad de Al tetraédrico varía en proporción a las cantidades relativas de Ca^{2+} y Na^+ , de modo que se mantenga el equilibrio electroestático. Queda claro que a más Ca^{2+} , mayor es la cantidad de Al^{3+} .

En las plagioclasas, las estructuras cristalinas y las transformaciones son bastante complicadas por la variación en la relación Al/Si en la serie albita-anortita, y por el vínculo de carga $\text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{+3}$ y $\text{Na}^{+} + \text{Si}^{4+}$. La albita de baja temperatura (albita-baja) tiene el modelo de ordenamiento AlSi_3 y la anortita, el modelo Al_2Si_2 (fig.2.1). Este último no puede obtenerse a partir del primero por un mero reemplazamiento de un Si por un Al, sino que es necesaria una reorganización completa.

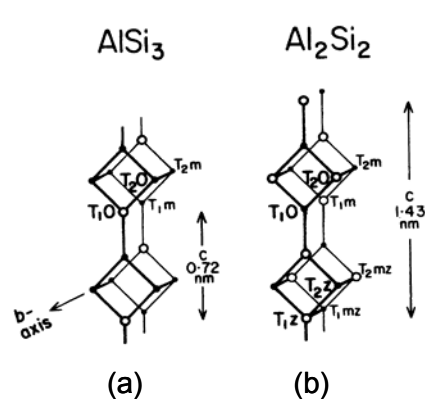


Fig.2.1. Uniones entre nodos de tetraedros en feldespatos. Se representan los átomos de Al (círculos) y de Si (puntos) en los marcos estructurales (a) AlSi_3 y (b) Al_2Si_2 . Los lugares T_1O y T_1m se relacionan mediante un plano de simetría. Los lugares T_2O y T_2m son equivalentes, pero topológicamente diferentes, a los lugares T_1O y T_1m . En el marco Al_2Si_2 los lugares etiquetados con "z" son diferentes a aquellos que no tienen "z", y por ello la distancia c de la celda es el doble en (b) que en (a). De Smith & Brown (1988).

Esta incompatibilidad tipológica es importante para las complejas superestructuras que se encuentran en las plagioclasas de composición intermedia. A altas temperaturas, los átomos T (Al y Si) en el marco AlSi_3 están altamente desordenados, mientras que en el marco Al_2Si_2 permanecen bastante ordenados. Esto es consistente con una regla general que dice que, usualmente, no más de un átomo de Al está unido a un átomo de oxígeno dentro del marco estructural aluminosilicatado.

La fig.2.2 muestra un diagrama ternario con la nomenclatura de los principales tipos de feldespatos. Entre la albita y la ortoclasa (serie de los feldespatos alcalinos) existe una solución sólida completa por encima de los 700°C a $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ kbar}$, mientras que por debajo de esta temperatura hay un *gap* de inmiscibilidad. Sin embargo, el diagrama ternario sugiere una solución sólida completa entre la albita y la anortita (serie de las plagioclasas). La nomenclatura de esta última serie, basada en seis divisorias arbitrarias, viene dada por los términos: albita, oligoclasa, andesina, labradorita, bytownita y anortita, con los siguientes porcentajes molares de An: 0-10, 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 y 90-100, respectivamente. La mayor parte de las propiedades de las plagioclasas varían de manera continua y progresiva con el cambio en su composición química. Entre la ortoclasa y la anortita prácticamente no existe solución sólida. Esto se explica porque la solución sólida entre minerales isomorfos tiende a ser mayor cuando los átomos son sustituidos por otros con la misma carga y tamaño similar. Así, en los feldespatos alcalinos, las cargas son

idénticas en los átomos que se sustituyen (K^+ y Na^+), aunque los tamaños son lo suficientemente diferentes ($\sim 1.3\text{\AA}$ para el K^+ y $\sim 1.0\text{\AA}$ para el Na^+) como para que la solución sólida quede limitada estrictamente a altas temperaturas. Sin embargo, en las plagioclasas los tamaños de los iones Na^+ y Ca^{2+} son casi los mismos y, además, la sustitución $NaSi-CaAl$ está compensada en cuanto a cargas se refiere. Por su parte, entre ortoclasa y anortita la solución sólida se encuentra dificultada por el tamaño de los iones K^+ y Ca^{2+} , así como por su carga.

Los feldespatos que conservan una estructura acorde a su formación a altas temperaturas son llamados feldespatos de alta temperatura (*high-temperature feldspars*). La mayoría de los feldespatos de rocas volcánicas son de este tipo.

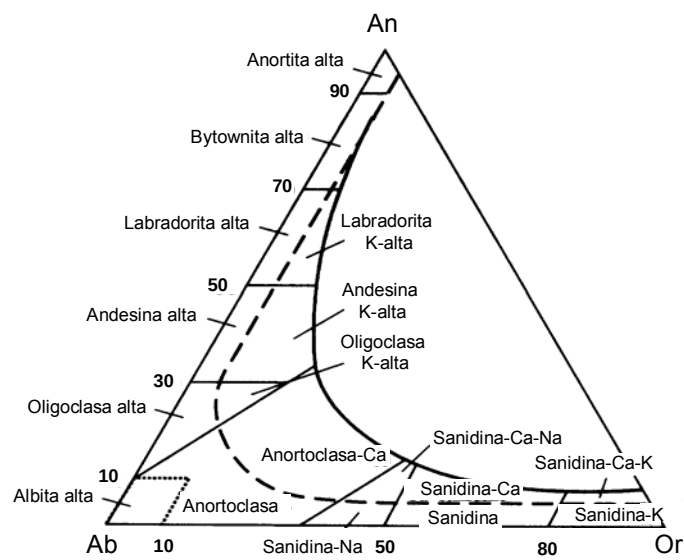


Fig.2.2. Nomenclatura para los feldespatos ternarios desordenados (propuesta por Smith & Brown, 1988).

Sin embargo, los de baja temperatura (*low-temperature feldspars*) son aquellos con estructuras típicas de una cristalización a baja temperatura, o por un lento enfriamiento a partir de elevadas temperaturas, como es el caso de las rocas plutónicas y metamórficas. La diferencia entre los estados estructurales de baja y alta temperatura puede implicar cambios en la geometría de la red cristalina de los feldespatos, con o sin cambio en el tipo de simetría o grupo espacial, y también puede implicar un cambio, aunque difuso, en el grado de ordenamiento de los átomos de Si y Al en los distintos lugares de los tetraedros de la estructura. El saber cómo se ordenan dichos átomos puede obtenerse directamente mediante el cálculo de las distancias interatómicas a través de técnicas de difracción de neutrones o de rayos-X, o incluso mediante técnicas de resonancia magnética nuclear (RMN) o espectrometría de infrarrojos.

Los feldespatos plagioclasas (fig.2.3) cristalizan en el sistema triclínico ($\alpha \neq \beta \neq \gamma$; $a \neq b \neq c$), en la clase $\bar{1}$. Los cristales son normalmente tabulares, paralelos a (010) y en algunas ocasiones alargados según el eje b [010]. En el caso de la anortita, los cristales pueden ser prismáticos y alargados según el eje c [001]. Para la albita pura ($NaAlSi_3O_8$), las formas de baja y alta

temperatura son ambas triclinicas, aunque ésta última sufre una transición alrededor de los 980°C a la forma monoclinica de la monalbita.

Los ángulos y las relaciones cristalográficas en la plagioclasas son: $c(001) \wedge b(010) = 86.24^\circ$ (albita), 85.50° (anortita); $m(110) \wedge M(\bar{1}\bar{1}0) = 59.14^\circ$ (albita), 59.29° (anortita). Para la albita ($C\bar{1}$): $a = 8.14$, $b = 12.8$, $c = 7.16$ Å; $\alpha = 94^\circ 20'$, $\beta = 116^\circ 34'$, $\gamma = 87^\circ 39'$. $a : b : c = 0.636 : 1 : 0.559$. Para la anortita ($P\bar{1}$): $a = 8.18$, $b = 12.88$, $c = 14.17$ Å; $\alpha = 93^\circ 10'$, $\beta = 115^\circ 51'$, $\gamma = 91^\circ 13'$. $a : b : c = 0.635 : 1 : 1.1$.

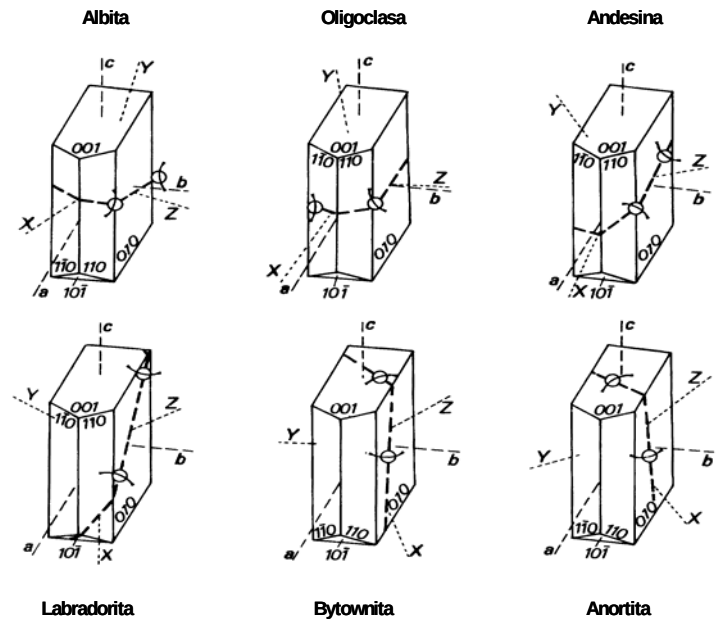


Fig.2.3. Orientaciones ópticas de las plagioclasas de baja temperatura (modificado de Tröger, 1971)

Ha habido varios intentos de representar las relaciones estructurales entre plagioclasas en un diagrama de fases. Mientras algunos son, de alguna manera, meramente especulativos, Smith & Brown (1988) dieron una versión simplificada que se muestra en la fig.2.4. La estructura de la albita es triclinica ($C\bar{1}$) para temperaturas bajas y moderadas, y muestra una distribución Si-Al altamente ordenada. La albita de baja temperatura es estructuralmente parecida a la microclina de baja temperatura, mientras que la albita de alta temperatura (albita-alta) es también triclinica pero, sin embargo, posee una distribución Si-Al muy desordenada, al contrario que su homónimo de baja temperatura. A temperaturas por encima de 920°C existe una variedad monoclinica de la albita, llamada *monalbita*, con una distribución Si-Al totalmente desordenada. En cuanto a la anortita, posee un grupo espacial $P\bar{1}$ a bajas temperaturas, mientras que a elevadas temperaturas la estructura se invierte a $I\bar{1}$. Se consideran como reversibles las transformaciones *monalbita*-albita alta (Kroll *et al.* 1980), la transformación $C\bar{1} \leftrightarrow I\bar{1}$ en el rango composicional labradorita-bytownita (Carpenter & McConnell, 1984) y la transformación $I\bar{1} \leftrightarrow P\bar{1}$ en la anortita.

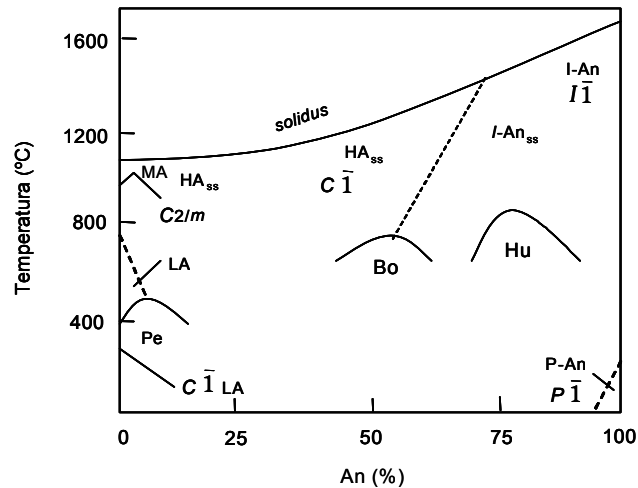


Fig.2.4. Diagrama simplificado que ilustra la variación de las estructuras a través de la serie de las plagioclasas (modificado por Smith & Brown, 1988). HA: albita-alta, LA: albita-baja, MA: monalbita, I-An: anortita de cuerpo centrado, P-An: anortita primitiva, Pe: gap de la Peristerita, Bo: gap de Bøggild, Hu: gap de Hüttenlocher, ss: solución sólida. Las estructuras son del tipo C2/m, C $\bar{1}$, I $\bar{1}$ y P $\bar{1}$ (modificado de Deer et al. 2001).

En las series de plagioclasas de baja temperatura aparecen, en la solución sólida, tres vacíos o *gaps* que se conocen como: peristerita, Bøggild y Hüttenlocher (fig.2.4). Los límites de intercrecimiento se desarrollan generalmente según orientaciones irracionales respecto a la red cristalina de los feldespatos, y las orientaciones varían de manera sistemática con la composición química. En la región de las composiciones de la labradorita aparece el llamado *gap* Bøggild (de An₃₉₋₄₈ a An₅₃₋₆₄). En los términos ricos en Na se encuentra el *gap* de la peristerita entre las composiciones de An_{~0} (estructura de albita) y An_{~25}. En las composiciones más cálcicas, los intercrecimientos en el *gap* Hüttenlocher tienen composiciones entre An₆₅ y An₉₅ (estructura anortita tipo-I).

El eje $\bar{1}$ simboliza un eje de rotoinversión primario, es decir, un eje de orden primario combinado con inversión. Consiste en que el motivo original gira 360°, de modo que vuelve a su posición original y es entonces invertido respecto a un centro. La operación $\bar{1}$ se denomina también *centro de simetría* (o *centro de inversión*, *i*). Las letras C, P e I hacen referencia al tipo de celda unitaria, la cual se define como un pequeño paralelepípedo constituido por las tres direcciones de traslación seleccionadas como traslaciones unitarias (*a*, *b* y *c*). Aunque una celda unitaria es imaginaria, posee una forma real y un volumen específico. Las celdas unitarias con puntos reticulares sólo en los vértices se llaman *primitivas*, mientras que aquellas con puntos adicionales en la red se llaman *no primitivas*. La red espacial o celda unitaria se expresa en función de tres direcciones vectoriales (*a*, *b* y *c*). Las longitudes a lo largo de estos ejes se denominan dimensiones de la celda y se expresan en Angströms (Å). Como se vio más arriba, las plagioclasas pueden mostrar celdas de tipo-C (celda unitaria no primitiva) con puntos adicionales cuyo centrado tiene lugar sobre un par de caras opuestas de la celda según el eje *c*, celdas de tipo-I (celda unitaria no primitiva) con un punto adicional centrado en el centro de la celda, y celdas de tipo-P (celda unitaria primitiva).

Las plagioclasas implican un marco de tetraedros (Si,Al)-O en eslabón (fig.2.1), donde los lugares intersticiales más grandes se encuentran ocupados por iones (Ca,Na). A altas temperaturas, cuando los átomos (Si,Al) están desordenados, las estructuras de las plagioclasas a través de las series desde An_0 a An_{90} son bastante similares a las de la albita-alta (simetría $C\bar{1}$). Mientras que la estructura de la serie de las plagioclasas de alta temperatura tiene simetría $C\bar{1}$ (excepto para An_{100} que funde antes de la transición $I-C$), los miembros intermedios de las series de baja temperatura tienen, composicionalmente, estructuras más complejas. En general, se acepta que las plagioclasas, en el rango composicional An_{25} y An_{80-85} , consisten en intercrecimientos de bloques de estructura lamelar de albita y anortita que alternan con suficiente regularidad como para producir reflexiones tipo “e” en los modelos de difracción. Es por ello que se las llame plagioclasas “e”.

Miembros extremos de la serie de las plagioclasas

Albita

Alrededor de los $\sim 950^\circ$ - 1100°C la albita es monoclinica y presenta una estructura desordenada (*monalbita*). Por debajo de esta temperatura es triclínica y parcialmente ordenada (albita de alta temperatura o albita-alta), y a temperaturas que van desde 400° a 650°C , la albita se presenta completamente ordenada (albita de baja temperatura o albita-baja).

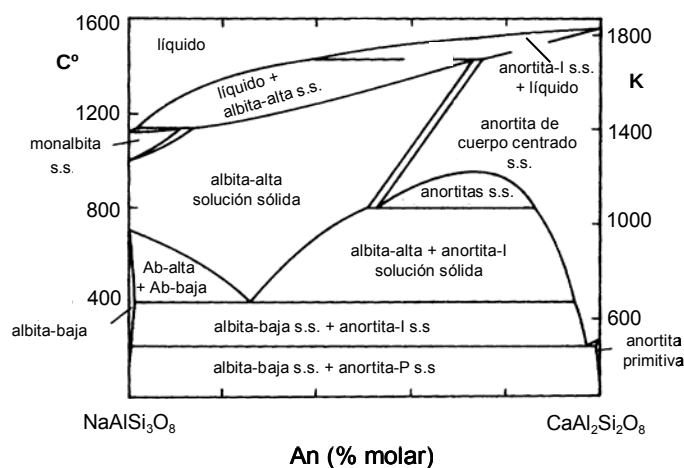


Fig.2.5. Diagrama de fases para la plagioclasa a baja presión. Se trata de una aproximación sencilla a las complejas relaciones de fases en las que todas las transformaciones son de primer orden (modificado de Smith & Brown, 1988).

La albita-alta se invierte directamente a *monalbita* con el calentamiento, y de este modo su estructura queda totalmente desordenada y es llamada *analbita*. No se han observado en la naturaleza albitas de orden estructural intermedio, pero sí han podido ser sintetizadas y han resultado ser aparentemente estables. En cuanto a las albitas intermedias, la mayoría parecen encontrarse próximas tanto a las estructuras (Si,Al) completamente ordenadas (albita de baja

temperatura) como a las desordenadas (albita de alta temperatura). En relación a estas últimas, Prewitt *et al.* (1976) investigaron, mediante difracción de rayos-X, las estructuras de una albita-alta. Los resultados mostraron una estructura según la cual el átomo de Na se dividía en cuatro partes, lo cual sugirió la existencia de una estructura en dominios en la que el Al estaba ordenado, pero ocupando diferentes lugares tetraédricos en cada uno de ellos. Winter *et al.* (1977) estaban de acuerdo con Grundy *et al.* (1967) y Prewitt *et al.* (*op.cit.*) en que no se puede determinar el estado estructural exacto de la albita-alta a partir de parámetros de la red cristalina a temperatura ambiente. Sin embargo, respecto al Na, encontraron que el modelo de anisotropía del átomo de Na dividido en cuatro partes era inadecuado, y sugirieron que las posiciones del Na estaban desordenadas en respuesta a variaciones locales en la distribución (Al,Si).

Anortita

El otro miembro final de la serie de las plagioclasas es la anortita. A bajas presiones y temperaturas su grupo espacial es el $P\bar{1}$. Cuando la temperatura alcanza $\sim 245^\circ\text{C}$ ($\pm 10^\circ\text{C}$?), experimenta una transición de fase reversible de $P\bar{1}$ (primitiva) a $I\bar{1}$ (cuerpo centrado) (fig.2.5). Para los feldespatos alcalinos triclinicos $[(\text{K},\text{Na})\text{Si}_3\text{AlO}_8]$ una cuarta parte de los cationes de los tetraedros son de Al, así que para una estructura (Si,Al) totalmente ordenada todos los Al están concentrados en uno de los cuatro lugares posibles del tetraedro. Sin embargo, para la anortita $[\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ este arreglo no es posible ya que existe igual número de átomos de Si que de Al, y éstos alternan con estricta regularidad a través de la estructura (fig.2.6). La celda de la anortita podría ser monoclinica y de tipo-I centrada, pero la distorsión del par (Si,Al) sobre los iones de Ca (relativamente pequeños) produce una simetría triclinica.

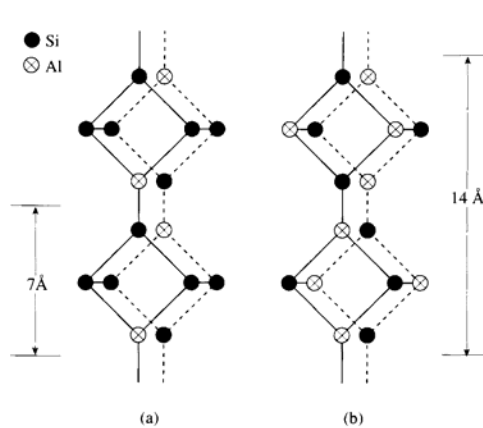


Fig.2.6. Secuencias de tetraedros. (a) Albita completamente ordenada o microclina (Si_3Al) y (b) Anortita (Si_2Al_2). Modificado de Deer *et al.* (2001).

También se producen distorsiones adicionales de la estructura a temperaturas por debajo de los 240°C , las cuales destruyen la relación de cuerpo I centrado y termina en una celda primitiva tipo- P . La estructura consiste entonces en cuatro subceldas con similares (pero no

idénticos) contenidos. Cada una contendría dos fórmulas unidad $[\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ relacionadas por un centro de simetría, de manera que el grupo espacial resultante sería $P\bar{1}$. Las cuatro subceldas estarían relacionadas con cuatro operaciones de pseudosimetría (fig.2.7) donde en relación con los cuatro anillos tipo A, los anillos B, C y D representarían, respectivamente, traslación $c/2$, centrado tipo-C y centrado tipo-I. Como fue explicado por Ribbe (1983b), los pares de anillos C-B y A-D son tipológicamente similares, pero las secuencias Al-Si-Al son diferentes; mientras que para los pares A-C y B-D ocurre lo contrario.

Wenk *et al.* (1973) ilustraron las relaciones entre las celdas unidad para la anortita P , la anortita I y la celda centrada tipo-C de la anortita (fig.2.8). En el caso de la anortita de cuerpo centrado (I), ésta alcanza el estado estructural de cuerpo centrado $I\bar{1}$ a aproximadamente 240°C . Por otro lado, el término de anortita transicional se ha empleado para describir las estructuras de las anortitas en las que las reflexiones de rayos-X no son tan abundantes ni están tan bien definidas como en el caso de la anortita tipo- P , aunque no llegan a estar ausentes ya que también son típicas de una estructura anortita tipo- I estrictamente centrada, pero son más ligeras y difusas. Brown *et al.* (1963) fueron los primeros en sugerir que la anortita sufría una transición de fase térmica reversible de simetría $P\bar{1}$ a $I\bar{1}$. Foit & Peacor (1967) llegaron a conclusiones similares usando un difractómetro Weissenberg de alta temperatura. Otro método para estudiar la transición de anortitas es la resonancia magnética nuclear (RMN), la cual es muy sensible a pequeños cambios en el rango de la estructura, mientras que los rayos-X y la difracción de electrones reflejan sólo grandes cambios de orden-desorden. Algunos de los autores que han empleado este método son, por ejemplo: Brinkmann & Staehli (1968a, b), Czank *et al.* (1970), Laves *et al.* (1970), Czank & Schulz (1971), Staehli & Brinkmann (1974a, b), Sherriff & Hartman (1985) y Phillips & Kirkpatrick (1995).

En la actualidad, existe un conflicto en cuanto a la interpretación de la estructura de la anortita según haya sido estudiada mediante difracción de rayos-X o difracción de neutrones, de manera que existe la duda de si la anortita $I\bar{1}$ (de alta temperatura) es de cuerpo centrado (celda no primitiva) o es del tipo celda primitiva. Los datos de difracción de rayos-X sugieren que la anortita $I\bar{1}$ es la superposición de dominios cuyos marcos tetraédricos son esencialmente idénticos, pero en los que los átomos de Ca ocupan posiciones ligeramente diferentes en cada dominio. Si dicha interpretación fuera correcta, ya que las posiciones del Ca son posiciones $P\bar{1}$, la anortita $I\bar{1}$ podría considerarse como el término medio de dos tipos de dominios $P\bar{1}$. Sin embargo, los resultados de difracción de neutrones indican que todos los átomos, incluyendo los de Ca, ocupan posiciones de cuerpo centrado de manera que la anortita $I\bar{1}$ no es el resultado de dominios $P\bar{1}$.

También se sabe que la anortita sufre una transformación de fase, inducida por la presión, a 26.1 ± 0.6 kbar. Parece que esto implica una transformación a una verdadera celda de cuerpo centrado en el grupo espacial $I\bar{1}$, al igual que se obtuvo con la difracción de neutrones. El mecanismo para la transición es, en gran parte, el basculamiento o *tilting* de los tetraedros que permanecen esencialmente rígidos, es decir, los ángulos $T-O-T$ de la estructura son modificados,

mientras que la longitud de las uniones T-O y de los ángulos O-T-O permanecen relativamente iguales.

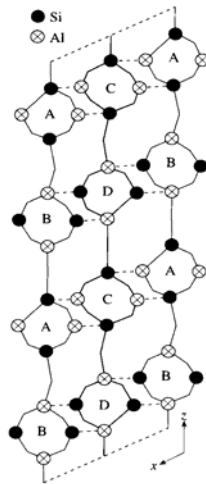


Fig.2.7. Ilustración esquemática de la estructura de la anortita-P proyectada en el plano x-z y mostrando las cuatro subceldas con diferentes anillos de tetraedros (modificado de Ribbe, 1983).

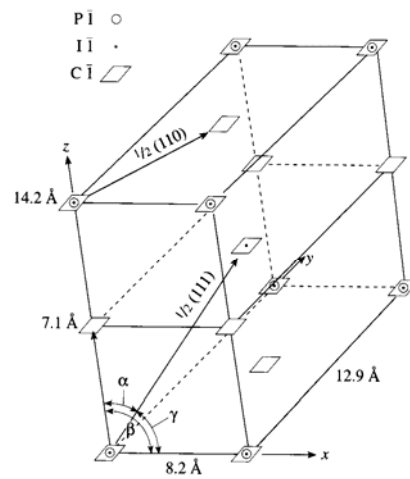


Fig.2.8. Dibujo esquema que ilustra las relaciones entre las celdas unidad ($c \sim 14\text{\AA}$) de la anortita-P primitiva, la anortita-I de cuerpo centrado y la celda centrada tipo C para la albita, excepto plagioclasas de alta temperatura (modificado de Deer et al. 2001).

Plagioclasas de composición intermedia

Como ya hemos visto, los esquemas de ordenamiento de la albita y la anortita son bastante diferentes, y podríamos esperar uno u otro tipo para las plagioclasas de composición intermedia. O bien, (1) cada composición intermedia podría tener un único esquema de ordenamiento que fuese una combinación lineal de la albita y la anortita, o (2) las plagioclasas de composición intermedia podrían consistir en intercrecimientos de exsoluciones macroscópicas de albita y anortita. Pero ninguna de estas posibilidades es válida. La primera de ellas no puede serlo porque los esquemas de ordenamiento de la albita y la anortita son tan diferentes que es imposible generar una combinación lineal de estos dos miembros. La segunda idea también falla debido a las grandes barreras cinéticas del movimiento del Al y el Si a la temperatura del *solvus*. Este problema no ocurre, sin embargo, en los feldespatos alcalinos porque la Ab y la Or tienen la misma relación [Al]:[Si], de manera que estos dos elementos no necesitan intercambiar sus posiciones para que se dé la exsolución y, por otro lado, porque la migración de átomos alcalinos presenta pocas dificultades cinéticas. La alternativa a estas dos posibilidades fallidas pasa por considerar un comportamiento

metaestable de las plagioclasas de composición intermedia, de manera que un enfriamiento descompone la plagioclasa en regiones de estructura albítica y anortítica.

Según el modelo propuesto por Hammonds *et al.* (1996), la transición de fase monoclinica-triclínica en feldespatos se lleva a cabo debido a un reblandecimiento elástico (*elastic softening*). Muchos estudios experimentales y teóricos de estructuras de feldespatos, y sus transiciones, han indicado que los tetraedros (Si,Al) se comportan esencialmente como unidades rígidas, y que las propiedades elásticas dependen, sobre todo, de las curvaturas de las uniones T-O-T y de las interacciones entre los cationes alcalinos y los oxígenos en el marco del tetraedro.

2.2. MECANISMOS DE DEFORMACIÓN: ASPECTOS GENERALES

2.2.1. Introducción

Cuando una roca sufre deformación debido a la actuación de un campo de esfuerzos externo, los constituyentes minerales de dicha roca pueden deformarse tanto de manera frágil, por fracturación, como de manera dúctil, mediante procesos cristalo-plásticos. La manera en la que se deforma un mineral en particular está influenciada por muchos factores, pero especialmente por la temperatura y por la tasa de deformación. Como regla general, las bajas temperaturas y las altas tasas de deformación favorecen la deformación frágil de los minerales, mientras que las altas temperaturas y las bajas tasas de deformación fomentan la deformación dúctil. Esto no quiere decir que el cambio en el estilo de la deformación aparezca simultáneamente en todos los minerales. Las diferentes propiedades cristalográficas de las fases individuales se traducen en que, bajo ciertas condiciones, algunas fases pueden experimentar deformación plástica mientras que otras se deforman de manera frágil. Por ejemplo, la hornblenda y los feldespatos se deforman frágilmente a temperaturas bajas o moderadas, mientras que a altas temperaturas se deforman por procesos cristalo-plásticos. En el caso del cuarzo, sin embargo, la deformación mediante procesos cristalo-plásticos es característica en un rango de condiciones mucho más amplias. Esto significa, por ejemplo, que en granitoides cizallados a baja temperatura, el cuarzo exhibiría características de deformación dúctil, mientras que los feldespatos mostrarían comportamiento frágil.

La deformación plástica en cristales tiene lugar por la presencia de defectos en la red cristalina. Existen tres tipos principales:

- *Vacantes*: lugares vacíos en la red cristalina. Pueden migrar por intercambio con iones vecinos a través de un proceso de difusión.
- *Dislocaciones*: defectos lineales termodinámicamente inestables que se desplazan a través de la red cristalográfica. Están contenidos dentro de la estructura del cristal y se concentran, normalmente, en los límites de grano. Estos defectos distorsionan la red cristalina e implican

deformación interna del cristal. A mayor número de dislocaciones, mayor es la energía interna almacenada (energía elástica). Consecuentemente, si ciertas dislocaciones pueden ser eliminadas, se liberará una cierta cantidad de energía interna. Una dislocación en lazo (*dislocation loop*) es una línea de dislocación curva que delimita un área cerrada dentro de la cual la red cristalina muestra deslizamiento o desplazamiento con respecto al resto del cristal, y está caracterizada por un vector de deslizamiento o *vector de Burgers*.

El tipo de sistema de deslizamiento que se activa en un cristal depende de la orientación y magnitud del campo de esfuerzos y del esfuerzo crítico de cizalla τ_c (*critical resolved shear stress*) para un sistema de deslizamiento dado. De este modo, se debe alcanzar o exceder τ_c para que una dislocación se mueva y se propague hasta producir un plano de deslizamiento activo. La magnitud de τ_c depende fuertemente de la temperatura y, en menor proporción, de la tasa de deformación, del esfuerzo diferencial y de la actividad química de ciertos componentes como el agua. Por lo tanto, es evidente que los sistemas de deslizamiento activos cambian con las condiciones metamórficas y de deformación. Los granos minerales pueden ser clasificados en dos grupos: los que tienen orientación “suave” (*soft orientation*), que son cristales convenientemente orientados para el deslizamiento y con un bajo τ_c , y los que tienen orientación “dura” (*hard orientation*), que son cristales con alto τ_c y que se orientan de modo que el deslizamiento es bastante improbable en ellos (Burg *et al.* 1986).

A escala atómica, el deslizamiento no se produce simultáneamente sobre todo un plano de un cristal, sino que se origina en forma de núcleo en una pequeña zona de alta concentración de esfuerzos, de modo que esta región de deslizamiento se extiende por el plano propagándose como un circuito expansivo hasta que intersecta con un borde de grano y produce un escalón, es decir, una dislocación. Cada dislocación queda definida por dos vectores: el vector l , que es tangente a la línea de dislocación en un punto, y el vector b o vector de Burgers, que representa la dirección de deslizamiento. Cuando l es perpendicular a b , la dislocación se llama transversal o de borde (*edge dislocation*) y sólo se mueve en el plano definido por l y b . Cuando l es paralelo a b , la dislocación se llama longitudinal o helicoidal (*screw dislocation*) y puede desplazarse por cualquier plano paralelo a b . Si la temperatura es alta o la velocidad de deformación es lenta, las dislocaciones transversales pueden saltar de un plano a otro y escalar (*dislocation climb*).

Usualmente, pueden operar simultáneamente varios sistemas de deslizamiento. Para bajos esfuerzos diferenciales suele ser activo uno único, pero a esfuerzos diferenciales mayores pueden operar varios al mismo tiempo. El requisito necesario para lograr que una roca soporte una deformación general, manteniéndose la continuidad de los bordes de grano, es conseguir que la deformación esté uniformemente distribuida por todos los granos que la forman. Para que esto suceda, y los granos experimenten deformación general por deslizamiento intracristalino, suele requerirse que en cada grano operen cinco sistemas de deslizamiento independientes. Esta es la condición de Von Mises (1969). Taylor (1933, 1955) también propuso este mismo número de sistemas de deslizamiento y postuló, además, que en cada grano la deformación debería ser la misma, es decir, homogénea. Este autor

asumió homogeneidad porque en su época (años 30) ésta era la única manera de procesar correctamente los datos con los medios de los que disponía. En el caso de los silicatos, que tienen baja simetría, no se requieren tantos sistemas de deslizamiento y los problemas de espacio a baja temperatura quedan resueltos por *bending* de la red cristalina, *kinking* o fracturación, y a alta temperatura mediante recristalización dinámica o deslizamiento a lo largo de límites de grano. El hecho de que se requieran cinco sistemas de deslizamiento independientes para producir una deformación general se debe a que el proceso de deslizamiento de dislocaciones es una deformación a volumen constante. Para que un incremento de deformación sea a volumen constante debe cumplir la relación: $\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} = 0$ (Jaeger, 1969). Esto significa que, de las seis componentes independientes de la deformación interna que quedan definidas por la matriz

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{12} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{23} & \epsilon_{33} \end{bmatrix}$$

para una deformación infinitesimal y a volumen constante sólo cinco componentes son independientes, de modo que se requieren cinco cizallas simples independientes para producir la misma deformación. Esto es lo que da lugar al requisito de los cinco sistemas de deslizamiento independientes. La operatividad de estos sistemas de deslizamiento produce una distorsión de cada grano y una rotación de los ejes cristalográficos en relación a los ejes de la deformación.

Sin embargo, en cálculos más recientes, como los de Lister (1974), se comprueba que la mayor parte de la deformación en cada grano se resuelve con tres o, como máximo, cuatro sistemas de deslizamiento. Y aunque puedan operar otros sistemas adicionales, los cizallamientos paralelos a estos sistemas suelen ser pequeños.

Cuando diferentes sistemas de deslizamientos intersectan en un cristal, las dislocaciones que migran pueden llegar a *enmarañarse* o entorpecerse y obstruir sus movimientos. Tales enredos de dislocaciones pueden inhibir movimientos de otras dislocaciones formadas recientemente, que se van apilando por detrás de las dislocaciones “bloqueadas”. Entonces, el cristal llega a ser difícil de deformar y se endurece (*strain hardening*). Hay mecanismos que trabajan en contra del proceso del *strain hardening* y que favorecen la deformación plástica, uno de ellos es la difusión, que permite que migren los iones situados en el extremo de los planos extra de las dislocaciones, favoreciendo que éstas se desplacen y escalen esquivando los obstáculos, por ejemplo las impurezas. Este mecanismo recibe el nombre de *dislocation creep*.

- *Límites de grano*: en materiales químicamente homogéneos, los límites de grano son defectos en dos dimensiones que separan granos con redes cristalinas orientadas de distinta manera. En rocas naturales, la situación se complica por el hecho de que la mayor parte de

las rocas son poliminerálicas. La desorientación de la red cristalina asociada a los límites de grano puede considerarse en ocasiones como una desorientación inducida por un conjunto planar de dislocaciones.

Durante la deformación y el metamorfismo, se llega a modificar la configuración de los límites de grano. Los dos procesos más importantes que operan son la migración de límites de grano (*grain boundary migration*) y el deslizamiento de límites de grano (*grain boundary sliding*). El deslizamiento es un movimiento dentro del plano del límite de grano, mientras que la migración es normal al deslizamiento. El deslizamiento aparece bajo condiciones de deformación a elevada temperatura y/o tasas de deformación de agregados de tamaño de grano fino. Los cristales se deslizan unos respecto a otros previniendo el desarrollo de vacíos o huecos mediante el *creep* por difusión (*diffusional creep*) en estado sólido, o solución y precipitación en los límites de granos. Este proceso de deslizamiento de límites de grano puede prevenir tanto el desarrollo de una orientación cristalográfica preferente (OCP) como todo lo contrario, contribuir a la formación de una OCP. Si un agregado mineral de tamaño de grano fino ha experimentado una intensa deformación pero consiste en granos desiguales que carecen de una OCP, esto puede ser interpretado como una evidencia indirecta de deslizamiento de límites de grano como mecanismo de deformación.

La forma de un cristal no puede cambiar instantáneamente porque las distancias entre los nodos de la red cristalina sólo pueden cambiar en pequeñas cantidades. Así, por ejemplo, las dislocaciones en movimiento pueden causar un desplazamiento relativo de las partes de un cristal, de manera que las vacantes se mueven a través de éste y el cristal acaba cambiando de forma. A esto se le llama *deformación intracristalina*. Un importante efecto de dicha deformación es el desarrollo de una orientación cristalográfica preferente, de la cual hablaremos más adelante. Una red cristalina que contiene un gran número de dislocaciones puede llegar a estar ligeramente “ondulada” y, como resultado, el cristal no se llega a extinguir homogéneamente. A esto se le llama *extinción ondulante*, y puede no ser homogénea sino desigual e irregular, sobre todo cuando está asociada a pequeñas fracturas (microscópicamente invisibles) y a *microkinks*. Además de las dislocaciones enredadas (*tangle dislocation*), también pueden aparecer *microkinks* como pequeñas estructuras aisladas en el cuarzo y en los feldespatos. Otra evidencia de deformación, que se observa en cristales deformados, son bandas de deformación lamelar. Consisten en dislocaciones enredadas, pequeños subgranos elongados y grupos de inclusiones sólidas o fluidas que sólo son visibles a través del TEM. A elevadas temperaturas, las microestructuras tales como *extinción ondulante* y *deformación lamelar*, pueden estar ausentes debido a un proceso de recuperación (*recovery*) o *recristalización*.

Veamos a continuación, con más detalle, los procesos de recuperación o *recovery*, y los tipos y mecanismos de *recristalización*. Hacemos especial hincapié en todo lo referente al maclado (tipos y leyes de macla, etc.), que será mencionado en un apartado independiente

debido a la enorme importancia que este mecanismo de deformación tiene en este trabajo de investigación.

2.2.2. Procesos que compiten durante la deformación

Durante la deformación de un cristal existe una continua competencia entre procesos que causan distorsión y procesos que restauran el orden, tales como recuperación y recrystalización. En general, a altas temperaturas y presencia de fluidos en los límites de grano, los procesos que tienen lugar suelen ser los de recrystalización y recuperación. En secciones delgadas únicamente se suelen preservar las estructuras relacionadas con los últimos estadios de los procesos en competencia, formadas muy poco tiempo antes de que la temperatura y/o la tasa de deformación caiga por debajo de un valor crítico, de modo que las estructuras queden preservadas.

2.2.3. Proceso de recuperación (recovery)

Cualquier cristal posee una energía de deformación interna que es mínima cuando está libre de dislocaciones. Si se deforma, aumenta el número de dislocaciones y se incrementa la energía interna por cambios locales en las distancias entre átomos. El incremento de dicha energía es proporcional al incremento de la longitud de dislocaciones por unidad de volumen (densidad de dislocaciones).

Algunos procesos tienden a destruir, ordenar o concentrar las dislocaciones. Estas pueden ser organizadas en la red cristalina de modo que tienda a minimizarse la energía libre del cristal. Durante la deformación, los mecanismos de ordenamiento tienen a conseguir que el cristal progrese hacia una situación de equilibrio con el menor número posible de dislocaciones en su interior. A esto se le llama proceso de recuperación o *recovery*. La evidencia de la recuperación consiste en una concentración de dislocaciones que tiene lugar mediante una evolución desde granos con extinción ondulante a granos con bandas de deformación y con límites de subgrano. Las bandas de deformación representan un estadio intermedio entre la extinción ondulante y los límites de subgrano. Son bandas que se observan bajo el microscopio petrográfico como zonas de extinción aproximadamente uniforme que atraviesan sectores del cristal con una orientación cristalográfica ligeramente diferente. Sin embargo, los límites de subgrano (*subgrain boundary*) separan segmentos del cristal que están ligeramente desorientados respecto a los subgranos vecinos o al grano huésped. La orientación de un límite de subgrano depende de la orientación del sistema de deslizamiento de las dislocaciones que se acumulan en él (Trepied *et al.* 1980). En resumen, en respuesta al proceso de recuperación, las dislocaciones tienden a concentrarse en zonas planares del cristal (límites de subgrano), decreciendo la densidad de dislocaciones en otras partes del mismo.

Los subgranos se reconocen como partes de un cristal que se han separado de partes adyacentes mediante límites discretos y netos de bajo relieve. La orientación cristalográfica

cambia ligeramente de un subgrano al vecino, usualmente menos de 5° . En muchos casos, los límites de subgranos se unen a bandas deformacionales o límites de grano de alto ángulo. Hay otros mecanismos, aunque menos comunes, para formar subgranos: migración lateral de bandas de *kinks*, reducción en la desorientación de límites de grano y migración de límites de grano (Means & Ree, 1988). Si los cristales están separados en subgranos de extinción fuertemente ondulante, con ligeras diferencias de orientación pero con límites borrosos (*fuzzy boundary*), y si tales cristales contienen fracturas, la estructura de los subgranos puede deberse a cataclasis submicroscópica de los granos (Tullis *et al.* 1990).

Un límite de subgrano puede ser imaginado como un plano que separa dos fragmentos de cristales que han rotado ligeramente uno respecto a otro. Tales límites se clasifican de acuerdo a la orientación de los ejes de rotación imaginarios que llevarían a coincidir un subgrano con el adyacente:

- *Tilt boundary*: los ejes de rotación son paralelos a los límites de grano.
- *Twist boundary*: los ejes de rotación son normales a los límites de grano (consisten en dos familias de dislocaciones en hélice que intersectan con diferentes vectores de Burgers).

2.2.4. Recristalización

La recristalización es un proceso por el que se forman nuevos granos, libres de dislocaciones, a expensas de granos fuertemente deformados y cuya densidad de dislocaciones (y por tanto su energía interna de deformación) es alta (Nicolas & Poirier, 1976). Existen dos tipos de recristalización: la dinámica y la estática. De ellas hablaremos a continuación. La recristalización dinámica es la que se produce durante la deformación del agregado, mientras que la estática tiene lugar después de dicha deformación.

Recristalización dinámica

Las evidencias de recristalización dinámica son más difíciles de encontrar que las evidencias de recuperación. Se puede distinguir entre:

- *Fábricas parcialmente recristalizadas*: la distribución de tamaño de grano suele ser bimodal. Caben dos posibilidades: (1) agregados de pequeño tamaño de grano entre granos mayores con extinción ondulante, y (2) subgranos del mismo tamaño que los granos menores y que son, probablemente, nuevos granos formados por recristalización dinámica. El tamaño de grano uniforme de los granos nuevos suele ser debido a la deformación y recristalización ante un esfuerzo diferencial específico.
- *Fábricas completamente recristalizadas*: es difícil distinguirla de una fábrica equigranular no recristalizada. Los granos muestran evidencias de deformación interna, de orientación cristalográfica preferente y de un tamaño de grano relativamente uniforme.

Este tipo de recrystalización suele darse a altas temperaturas y tiene lugar, comúnmente, mediante dos procesos: migración de límites de grano y rotación progresiva de subgranos. Una de las características microtexturales por la cual se puede distinguir un proceso de otro es la orientación cristalográfica de los granos recrystalizados con respecto a los granos huéspedes. La rotación progresiva de subgranos típicamente resulta en un control por parte del grano huésped sobre los granos recrystalizados. Mientras que para los procesos dominados por la migración, los factores que controlan la orientación de los granos recrystalizados pueden ser difíciles de reconocer.

El agregado recrystalizado dinámicamente, de pequeño tamaño, alrededor de un núcleo de un cristal con la misma composición mineral, se dice que tiene estructura manteada (*core-and-mantle structure*). Si el manto es de tamaño de grano extremadamente fino y el mecanismo por el cual se ha formado es incierto, se emplea también en la bibliografía el término de “estructura en mortero”, aunque tiene implicaciones genéticas y es aconsejable no utilizarlo.

Recrystalización por migración de límites de grano

Además del proceso de recuperación al que ya se hizo antes mención, también existen otros procesos que pueden contribuir a reducir la densidad de dislocaciones. Sólo basta con imaginar dos cristales vecinos y deformados, uno con alta densidad de dislocaciones y otro con baja. Los átomos a lo largo de los límites de grano en el cristal con alta densidad de dislocaciones pueden ser desplazados ligeramente de manera que se ajusten a una red cristalina con menor densidad de dislocaciones. Esto produce una migración o desplazamiento local del límite del grano, reduciendo la energía mínima interna del agregado implicado en el proceso, y un crecimiento del cristal menos deformado a costa de su vecino más deformado (fig. 2.9).

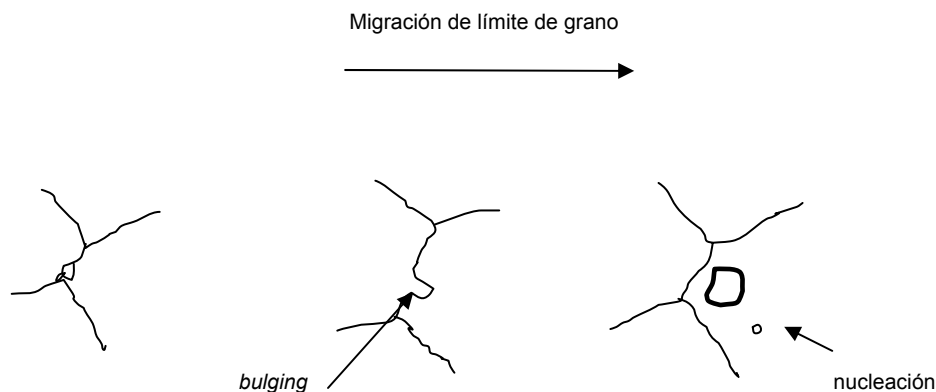


Fig.2.9.Evolución de un límite de grano (en el sentido que la flecha indica) que consiste en un desplazamiento local del límite del grano, que reduce su energía interna formando una especie de vejiguilla (*bulging*) dentro del cristal con mayor densidad de dislocaciones hasta llegar a formar, dentro de él, un nuevo grano e independiente. Modificado de Passchier & Trouw (1996).

En la figura puede verse que el límite del grano se comba, forma una especie de vejiguilla (*bulging*) dentro del cristal con mayor densidad de dislocaciones y llega a evolucionar hasta formar un grano nuevo e independiente. Es posible, aunque menos frecuente, que un pequeño grano nucleee dentro del grano fuertemente deformado y crezca a costa de él. Ambos procesos, nucleación y *bulging*, conducen a una reorganización del material cristalino: los granos antiguos, con alta densidad de dislocaciones, son reemplazados por granos nuevos. Generalmente, la evidencia de recrystalización primaria por migración de límites de grano es la presencia de límites de grano muy irregulares.

Recrystalización por rotación de subgranos

La recrystalización por rotación de subgranos aparece cuando se añaden continuamente dislocaciones a los límites de subgranos. Esto sólo sucede si las dislocaciones son relativamente libres para escalar de un plano a otro de la red cristalina (*climb-accomodated dislocation creep*). En tal caso, el ángulo entre la estructura cristalina, en ambos lugares de los límites del subgrano, incrementa hasta que gradualmente el subgrano no puede ser ya clasificado como parte de un mismo grano y se desarrolla uno nuevo por la desorientación progresiva de los subgranos (fig.2.10).

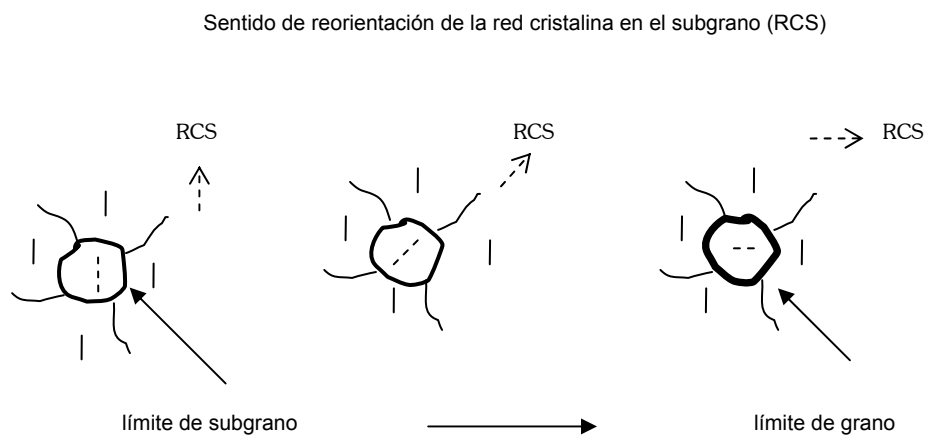


Fig.2.10. Rotación de subgranos en respuesta a la migración de dislocaciones en el límite de un subgrano durante una deformación progresiva con sentido de movimiento dextro. Este proceso termina por causar el desarrollo de límites de grano de alto ángulo y, por lo tanto, de nuevos granos. De hecho, véase como se va reorientando la red cristalina del subgrano conforme progresa la deformación. Modificado de Passchier & Trouw (1996).

Este tipo de recrystalización consiste en una transición gradual de agregados de subgranos a agregados de nuevos granos con aproximadamente el mismo tamaño pero diferente orientación cristalográfica, de modo que se produce una evolución desde límites de subgranos a límites de grano. En la literatura geológica sobre recrystalización de plagioclasas deformadas de forma natural (Vernon, 1975; White, 1975; Brown *et al.* 1980; Sodre Borges & White, 1980; Jensen & Starkey, 1985; Montardi & Mainprice, 1987; Oleson, 1987) y

experimentalmente (Marshall & McLaren, 1977a; Tullis & Yund, 1985, 1991; Dell'Angelo & Tullis, 1989), existen pocas evidencias acerca de la rotación progresiva de subgranos como mecanismo de recrystalización dominante en plagioclasas. En cambio, la mayoría de las características de la recrystalización de plagioclasas son similares al régimen 1 de recrystalización descrito para el cuarzo por Hirth & Tullis (1992), probablemente debido a que el bajo volumen de difusión en los feldespatos (Yund & Tullis, 1991) inhibe la escalada de dislocaciones y, por tanto, la formación de subgranos (Tullis & Yund, 1985).

Recrystalización estática

Cuando en una roca la tasa de deformación decelera, o incluso llega a cesar, el material policristalino no se encuentra en estado de mínima energía interna, aunque la recuperación y la recrystalización hayan sido importantes durante la deformación. Esto se debe a que los cristales todavía contienen dislocaciones, enredos de dislocaciones (*dislocation tangle*) y límites de subgranos, a menudo con bordes ondulados e irregulares.

Si la roca se ve sometida a condiciones de temperatura relativamente baja después de una deformación, la fábrica deformada puede llegar a preservarse sin alterar hasta los siguientes episodios deformacionales. Sin embargo, si la temperatura es relativamente alta cuando cesa la deformación, o si está presente mucha agua a lo largo de los límites de grano, los procesos de recuperación, recrystalización y reducción del área de límites de grano pueden continuar, en ausencia de la deformación, hasta conseguir la roca una mínima energía interna. A estos procesos combinados se les llama recrystalización estática (*static recrystallization* o *annealing*), y con ellos los granos energéticamente inestables son sustituidos por otros más estables, los enredos de dislocaciones se mueven, los límites de grano llegan a ser más rectos y los granos tienden a crecer en tamaño debido a la reducción del área del límite de grano. Incluso, si la densidad de dislocaciones es alta y la temperatura es lo suficientemente alta también, algunos granos pueden llegar a crecer con gran tamaño, comúnmente con forma irregular, a expensa de otros.

La evidencia de la recrystalización estática y de la reducción del área de límites de grano, es la presencia de cristales con bordes rectos o suavemente curvados, los cuales carecen de extinción ondulante o subgranos. Se suele decir en estos casos que están libres de deformación. En una fábrica recrystalizada estáticamente es común reconocer relictos de estructuras más antiguas (en gran parte destruidas), como foliación y porfiroclastos. El crecimiento estático de granos suele quedar reflejado por pequeños granos con una orientación cristalográfica diferente a la de los granos principales en los que se encuentran incluidos y, también, por cristales alargados y libres de deformación que definen una foliación y que pudieron crecer en una roca con una foliación más antigua que condicionó su crecimiento. La recrystalización estática puede terminar dando paso a una recrystalización dinámica si la roca vuelve a verse afectada por un episodio de deformación.

2.3. MECANISMOS DE DEFORMACIÓN EN PLAGIOCLASAS

La plagioclasa es un mineral muy importante en la corteza terrestre, junto con los feldespatos alcalinos, y es por ello que juega un papel clave en la determinación del comportamiento reológico de la corteza. Como ya se ha dicho, los feldespatos constituyen alrededor de un 60% de los minerales de la corteza terrestre, siendo, por tanto, los minerales corticales más comunes.

Los feldespatos de rocas deformadas de manera natural han sido objeto de un gran número de estudios debido a su enorme abundancia en áreas tectónicamente activas (White, 1975; Debat *et al.*, 1978; Jensen & Starkey, 1985; Olsen y Kohlstedt, 1984, 1985; Montardi & Mainprice, 1987; Ji & Mainprice, 1988; Kruhl, 1987b). En general, las investigaciones de detalle en feldespatos alcalinos (Willaime & Gandais, 1977; Gandais & Willaime, 1984; Zheng & Gandais, 1987) han ido siendo cada vez más importantes y han servido para despertar el interés del estudio de las plagioclasas (Marshall & McLaren, 1977a; Olsen & Kohlstedt, 1984), las cuales han sido mucho menos investigadas. En cuanto al comportamiento dúctil de la plagioclasa, se conoce muy poco en comparación con otros minerales como el olivino, la calcita o el cuarzo. Fue recientemente, en la década de los 80, cuando se determinaron por primera vez las estructuras de dislocación (vectores de Burgers) en plagioclasas deformadas dúctilmente (Olsen & Kohlstedt, 1984).

La deformación por maclado mecánico fue reconocida, entre otros, por Laves (1952b) y Lawrence (1970), y fue reproducida experimentalmente por Starkey & Brown (1964) y Borg & Heard (1969, 1970). Toda la información referente a la deformación por deslizamiento de dislocaciones pudo ser demostrada de manera clara cuando se empezó a utilizar el microscopio de transmisión de electrones (TEM) para la visualización y análisis de dislocaciones (White, 1975; Marshall & McLaren, 1977b). Las características de la deformación de plagioclasas han sido también estudiadas a escala microestructural¹ (Wenk, 1937; Wenk *et al.* 1987; Shelley, 1979; Jensen & Starkey, 1985; Kruhl, 1987a). Comparado con la calcita, el cuarzo o la mica, las microestructuras de los feldespatos suelen estar menos desarrolladas aunque, no obstante, presentan modelos más complejos. En general, las microestructuras que se desarrollan durante la deformación son controladas por la velocidad del proceso de recristalización y por la velocidad de la deformación interna de los cristales. En el caso de los silicatos, se deben posiblemente también al contenido de (OH), mientras que los efectos de la presión hidrostática, sin embargo, no están tan claros. No obstante, existen indicios de algunos tipos de estructuras intergranulares, como láminas de deformación, debidas al efecto de dicha presión (Avé Lallemant & Carter, 1970). Las microestructuras son también función de la historia térmica sufrida por la roca desde que la deformación cesó, de manera que, por ejemplo, una roca que se ha deformado intensamente bajo condiciones de baja temperatura puede experimentar recuperación y recristalización si se mantiene a temperatura moderada durante un largo periodo de tiempo tras el cese de la deformación. Bajo condiciones de deformación a

¹ En la terminología utilizada en el estudio de la OCP de metales y cerámicas, textura es equivalente a la expresión OCP. En geología, sin embargo, textura es sinónimo de microestructura, es decir, la forma de los granos, su disposición y sus subestructuras internas tales como maclas, láminas de deformación y similares. Será por esta razón que empleemos el término de microestructura.

baja temperatura o alta tasa de deformación, las rocas suelen presentar evidencias de deformación como granos aplanados con bandas de deformación, láminas de deformación, extinción ondulante, etc. Si la deformación, por el contrario, ocurre a altas temperaturas o bajas tasas de deformación, el proceso de difusión en estado sólido es importante a escala granular, de modo que los bordes de grano pueden moverse así como producirse también recristalización.

Ord y Hobbs (1989) asumen que los modelos de reología del cuarzo controlan la resistencia de la corteza superior, mientras que la reología de los feldespatos controla la corteza media e inferior. Las rocas miloníticas de la corteza superior contienen a menudo bandas de cuarzo interconectadas, lo que indica que el cuarzo controla el comportamiento reológico de dichas rocas; sin embargo, las bandas monominerálicas de feldespato están a menudo ausentes. Las investigaciones sobre la deformación en feldespatos bajo condiciones de alta temperatura en rocas de facies anfibolita y granulita, evidencian que el feldespato se deforma plásticamente, pero que no forma bandas monominerálicas interconectadas a menos que su abundancia modal sea muy alta, como en el caso de las anfibolitas o de las anortositas (Ji & Mainprice, 1990; Kruse & Stünitz, 1999). Por lo tanto, los datos reológicos obtenidos a partir de estudios experimentales de deformación en agregados monominerálicos de feldespatos pueden no ser apropiados para la modelización de la reología de la corteza media e inferior. Algunos estudios, como el de Rosenberg & Stünitz (2003), sugieren que los datos reológicos obtenidos a partir del *creep* de dislocaciones en rocas monominerálicas de plagioclasas podrían no representar de manera adecuada el comportamiento reológico de una corteza inferior-media de facies anfibolita. Además, aplicando únicamente las leyes de flujo del *creep* de dislocaciones, se tiende a sobreestimar la resistencia de la corteza.

Bajo las condiciones corticales más comunes, los feldespatos son algunas de las fases más resistentes en las rocas, siendo rara la deformación dúctil en ellos. Mientras que en el cuarzo y en las micas el deslizamiento y la escalada de dislocaciones, así como la recristalización dinámica, son procesos comunes, los feldespatos suelen persistir como porfiroclastos con tendencia a fracturarse (Mittra, 1978). En casos excepcionales, los feldespatos se deforman por movimiento de dislocaciones, pero incluso en estos casos esta deformación dúctil contribuye mínimamente a la deformación total de la roca. Las dislocaciones en plagioclasas intermedias que se deforman bajo condiciones de facies granulita han sido analizadas por Olsen & Kohlstedt (1984, 1986), y su estudio reveló una importante deformación dúctil por deslizamiento intracrystalino y maclado. Las microestructuras y los mecanismos de recristalización de las plagioclasas deformadas son, a menudo, interpretados comparándolos con los del cuarzo (Lafrance *et al.* 1996).

Los estudios llevados a cabo en estos últimos años sugieren que las microestructuras de recristalización de las plagioclasas son producidas por tres mecanismos de recristalización, similares a los de recristalización dinámica en el cuarzo, y dependientes de la temperatura y la tasa de deformación. Estos mecanismos son: recristalización por *bulging*, recristalización por rotación de subgranos y recristalización por migración de límites de grano a alta temperatura

(Fitz Gerald & Stünitz, 1993). El proceso de recrystalización dinámica es un mecanismo importante para el desarrollo de fábricas, además de la reorientación reticular debida al deslizamiento de dislocaciones y/o maclado. Sin embargo, se conoce muy poco sobre el efecto de la recrystalización dinámica en el desarrollo de fábricas (Urai *et al.* 1986). Muchas características de la recrystalización de las plagioclasas son similares al régimen 1 de recrystalización descrito para el cuarzo por Hirth & Tullis (1992), probablemente debido a que el bajo volumen de difusión en los feldespatos (Yund & Tullis, 1991) inhibe la escalada de dislocaciones y, por tanto, la formación de subgranos (Tullis & Yund, 1985). Los cambios microestructurales asociados con el incremento de temperatura sugieren que la secuencia de mecanismos de recrystalización en las plagioclasas difiere de la del cuarzo, el cual progresa desde recrystalización por *bulging* a recrystalización por rotación y, finalmente, a recrystalización por migración de límites de grano. La principal razón para el diferente comportamiento del cuarzo y de la plagioclasa es que en el régimen de bajas temperaturas, la recrystalización de la plagioclasa puede implicar un cambio en la composición química. La recrystalización de los feldespatos difiere de la del cuarzo en varios aspectos. En primer lugar, el desequilibrio químico puede contribuir a la recrystalización sindeformacional o incluso representar el principal medio potencial para su recrystalización (Vernon, 1975; White, 1975; Stünitz, 1998). La recrystalización sindeformacional de feldespatos se ha interpretado algunas veces como el resultado de la nucleación y crecimiento de granos de feldespato con diferente composición (Borges & White, 1980; Gapais, 1989) y muchos estudios describen una diferencia composicional entre los granos más antiguos y los recrystalizados dinámicamente (Vernon, 1975; White, 1975; Brown *et al.* 1980; Brodie, 1981; Watts & Williams, 1983; Olesen, 1987; Yund & Tullis, 1991; Fitz Gerald & Stünitz, 1993; Molli, 1994; Stünitz, 1998). En segundo lugar, la deformación experimental de agregados de plagioclasa de tamaño de grano fino ha mostrado la aparición de una transición entre *creep* de dislocaciones y *creep* por difusión (*diffusion creep*) inducido por la temperatura, la actividad de agua y la tasa de deformación (Tullis & Yund, 1991; Tullis *et al.* 1996). Esto está de acuerdo con recientes investigaciones en rocas naturales, lo cual sugiere que la plagioclasa puede deformarse por *diffusion creep* en condiciones de facies anfíbolita (Gower & Simpson, 1992; Selversone, 1993) y granulita (Martelat *et al.* 1999). Este régimen de *creep* por difusión a alta temperatura no es tan común en agregados deformados de cuarzo.

En experimentos de laboratorio y muestras deformadas naturalmente se ha observado que el comportamiento de plagioclasas y feldespatos alcalinos es bastante similar y, por lo tanto, pueden tratarse conjuntamente. La deformación de los feldespatos depende fuertemente de las condiciones metamórficas. Este comportamiento ha sido analizado por varios autores (Tullis & Yund, 1980, 1985, 1987; Hanmer, 1982; Tullis, 1983; Dell'Angelo & Tullis, 1989; Tullis *et al.* 1990; Tullis & Yund, 1991; Pryer, 1993) y es descrito a continuación, de acuerdo con el incremento de temperatura y con la tasa de deformación.

- **Grado metamórfico muy bajo (<300°C):** los feldespatos se deforman principalmente por fracturación frágil y flujo cataclástico. Los fragmentos de grano muestran una fuerte deformación intracristalina, incluyendo fallas en escalón, planos de clivaje torcidos y maclas, así como extinción ondulante desigual y subgranos con límites imprecisos. El estudio de tales estructuras por TEM ha mostrado que son debidas a microfracturas a pequeña escala (Tullis & Yund, 1987). Bajo estas condiciones, son importantes las leyes de macla de Albita y Periclina en las plagioclasas (Seifert, 1964; Vernon, 1965; Borg & Heard, 1969, 1970; Lawrence, 1970; Kronenberg & Shelton, 1980; Passchier, 1982; Jensen & Starkey, 1985).

- **Grado metamórfico bajo (300°-400°C):** los feldespatos se siguen deformando principalmente por microfracturación interna, pero asistida en menor grado por deslizamiento de dislocaciones (*dislocation glide*). Pueden presentar maclas de deformación de bordes afilados (*tapered twins*), maclas dobladas (*bend twins*), extinción ondulante, bandas de deformación y bandas de *kink* con límites afilados (Pryer, 1993). Las estructuras núcleo-manto están ausentes y aparecen sistemas de fracturas antitéticas, más comunes a bajas temperaturas, y sintéticas a temperaturas mayores.

- **Grado metamórfico medio (400°-500°C):** aparece la escalada de dislocaciones (*dislocation climb*) y comienza a ser importante la recrystalización, especialmente a lo largo de los bordes de granos. La recrystalización se produce por nucleación y crecimiento de nuevos granos (Borges & White, 1980; Gapais, 1989; Gates & Glover, 1989; Tullis & Yund, 1991) y es visible en sección delgada por el desarrollo de mantos de feldespato de tamaño de grano fino con límites netos respecto a núcleos de granos más antiguos. Son típicas las estructuras manteadas y las zonas de microcizalla de granos recrystalizados en el interior de núcleos de feldespatos (Passchier, 1982). La fracturación de feldespatos llega a ser menos común bajo estas condiciones, pero el *microkinking* es abundante, probablemente asociado con fracturas cataclásticas en lugares de formación de *marañas* de dislocaciones (Tullis & Yund, 1987). Si aparecen grandes *kink bands*, estos tendrán límites poco definidos (Pryer, 1993). De acuerdo con Tullis *et al.* (1990), las zonas de cataclasis submicroscópicas pueden sufrir recrystalización y transformación en pequeñas zonas de cizalla dúctil, desapareciendo gran parte de la evidencia de un fallamiento frágil más temprano. Hacia altas temperaturas, el maclado por deformación es menos abundante

- **Grado metamórfico medio-alto (>500°C):** es frecuente la escalada de dislocaciones y la recuperación (*recovery*) (Vidal *et al.*, 1980; Olsen & Kohlstedt, 1985; Pryer, 1993). Aparecen los dos tipos de recrystalización dinámica: migración de límites de grano y rotación de subgranos. Todavía siguen apareciendo estructuras núcleo-manto, pero los límites entre núcleo y manto son menos netos que a temperaturas más bajas. Los granos aparecen usualmente libres de deformación, aunque se pueden encontrar bandas de *microkinks* aisladas.

Según los estudios llevados a cabo por Rosenberg & Stünitz (2003), los procesos de deformación y los mecanismos de recrystalización de las plagioclasas en facies de anfibolitas están fuertemente influenciados por cambios de temperatura relativamente pequeños, dentro del rango 580°-670°C, de modo que el comportamiento de la plagioclase cambia

drásticamente con la temperatura. Por otra parte, a baja tasa de deformación, la plagioclasa se comporta de manera rígida, de modo que la deformación interna queda limitada a la fracturación para las temperaturas más bajas (por debajo de 580°C) y a *creep* de dislocaciones para temperaturas intermedias. La recrystalización sindeformacional a temperaturas intermedias implica rotación progresiva de subgranos con migración local de límites de grano. A mayor deformación, el desequilibrio composicional es probablemente el principal motor para la recrystalización a bajas temperaturas, mientras que la recrystalización se debe a la energía de deformación interna para altas temperaturas. Un cambio en la resistencia mecánica, con el incremento de temperatura, sólo puede ser explicado por una mayor energía de activación para el movimiento de dislocaciones en las plagioclasas, en comparación con otras fases. Aunque la energía de activación de dislocaciones en la plagioclasa sea algo mayor que para el cuarzo (Luan & Paterson, 1992; Gleason & Tullis, 1995; Hirth *et al.* 2001), no parece probable un cambio en la resistencia relativa entre cuarzo y plagioclasa en el rango de temperatura de 580° a 670°C. Así, el cambio de resistencia relativo de la plagioclasa con el incremento de temperatura no puede ser explicado mediante la deformación por *creep* de dislocaciones. A temperaturas más altas, la recrystalización tiene lugar por migración de límites de grano, y el mecanismo de deformación predominante no es la plasticidad intracrystalina sino el deslizamiento de límites de grano acomodado por difusión. La plasticidad intracrystalina es un proceso activo de deformación y es importante en la formación de nuevos granos, pero no acomoda la alta deformación a elevadas temperaturas.

La recrystalización dinámica puede cambiar muchos factores que tienen una relación directa con el comportamiento mecánico, por ejemplo: la orientación cristalográfica de los granos, la concentración de impurezas, los defectos químicos y la estructura de borde de grano. La recrystalización dinámica es un importante mecanismo en el desarrollo de fábricas de agregados policristalinos, así como la orientación cristalográfica debida a deslizamiento de dislocaciones y/o maclado (Nicolas & Poirier, 1976).

2.4. TIPOS DE MACLAS EN PLAGIOCLASAS

2.4.1. Introducción

El término de macla se utiliza para parejas de cristales de la misma composición y estructura, que se encuentran en contacto y relacionados por una ley de macla que implica una rotación o reflexión según una dirección o plano de la red cristalina. Los individuos maclados pueden diferir ligeramente de composición, aunque ningún estudio ha puesto de manifiesto variaciones sistemáticas.

La red cristalina de los feldespatos presenta pseudosimetría, y las operaciones de maclado resultan en una casi coincidencia de las estructuras de las unidades macladas. Los dos individuos de una macla están relacionados por operaciones de transformación de simetría entre sus redes cristalinas y la superficie que las separa, a la que se llama plano de composición. En las maclas mecánicas o de deformación, el plano de composición separa una zona del cristal deformado de otra que no lo está. Los átomos en la parte deformada se mueven paralelamente a una dirección de deslizamiento en una cantidad proporcional a sus distancias respecto al plano de composición. A escala atómica se producen dos complicaciones, de las cuales la segunda es la más importante: (1) solamente en las estructuras muy simples, el movimiento de los átomos es estrictamente paralelo a la dirección de deslizamiento, aunque en los feldespatos se requieren pequeños movimientos adicionales, y (2) el maclado de los feldespatos con estructura muy ordenada es problemático ya que las verdaderas maclas de deslizamiento solamente pueden producirse si la distribución (Al,Si) queda invariante o casi invariante después del deslizamiento (Laves, 1952). Esto es debido a que el movimiento de deslizamiento transforma las posiciones T_10 en T_{1m} y viceversa, y lo mismo ocurre con T_20 y T_{2m} (fig.2.1). Si la ocupación de los dos lugares T_1 y T_2 es estadísticamente igual, entonces el deslizamiento no afecta a dicha ocupación. Si, sin embargo, T_10 es significativamente diferente de T_{1m} , entonces la estructura después del deslizamiento quedará desordenada en el sentido de Thomson *et al.* (1974), de modo que tales estructuras no son verdaderas maclas y deberían llamarse pseudomaclas.

Las operaciones de transformación en las redes cristalinas de un cristal maclado son aplicables a cualquier otra red cristalina independientemente de cuál sea su geometría y su estructura. Consisten en:

- *Inversión* respecto a un punto llamado centro de macla.
- *Reflexión* sobre un plano llamado plano de macla
- *Rotación* de 180° alrededor de un eje, también llamado eje de macla o de hemitropía. En cualquier caso, se comprende fácilmente que los planos de simetría y ejes de orden par (2, 4 y 6) de un cristal sencillo no pueden ser al mismo tiempo elementos de simetría morfológica de la macla, porque si así fuera la reflexión o rotación se llevaría a cabo sobre un elemento

de simetría del cristal y éste coincidiría consigo mismo, no existiendo dos cristales sino uno solo. Se exceptúan, naturalmente, los ejes de orden impar (ternarios).

Ya que las plagioclasas son centrosimétricas, las operaciones de maclado quedan restringidas a rotación y reflexión. Ahora bien, la reflexión sobre un plano de la red cristalina es equivalente a la rotación binaria alrededor de la normal al plano seguida de una inversión y, por lo tanto, todas las maclas de los feldespatos se consideran maclas de rotación en las que el eje de macla, que relaciona individuos adyacentes, es paralelo a una dirección de la red cristalina que se considera, casi, un eje de simetría de la estructura. En efecto, ya se sabe que la coexistencia de un centro de inversión con un plano o eje de simetría supone la existencia simultánea de los tres elementos. En el caso de los cristales centrados, el eje y el plano de macla son perpendiculares entre sí y corresponden a direcciones y planos cristalográficos (filas y planos reticulares) que contienen un centro de simetría. En este caso, la macla se puede enunciar indistintamente por la notación del plano o por el eje de la macla.

El origen del maclado en plagioclasas de rocas deformadas ha sido objeto de muchas investigaciones y discusiones. Este proceso es un mecanismo de deformación que aparece a bajas temperaturas o a altas tasas de deformación e implica, por lo tanto, altos esfuerzos diferenciales. El maclado es muy frecuente en los feldespatos en general, de hecho, es muy raro encontrar feldespatos sin maclar, sobre todo desde que se utilizan microscopios de transmisión de electrones (TEM) que permiten la detección de micromaclas. Una buena descripción del maclado en plagioclasas, en términos de simetría y pseudosimetría de la red cristalina, fue dada por Friedel (1926, 1964) y posteriormente revisada por Burri *et al.* (1967). La teoría francesa del maclado desarrollada por Bravais, Mallard y Friedel implica el concepto de que la facilidad de maclado está inversamente relacionada con la oblicuidad de la macla. La oblicuidad es la medida del ángulo entre la normal al plano de macla y la fila reticular casi normal a éste. En el caso de la macla de Albita, Donnay (1943) calculó la oblicuidad para plagioclasas de varias composiciones, y Gay (1956) extendió su estudio e incluyó estados estructurales de alta y baja temperatura. La teoría predijo que la facilidad de maclado debía ser mayor para plagioclasas de composición intermedia y menor hacia ambos extremos de la serie, y que debía ser similar para plagioclasas de alta y baja temperatura excepto en los términos más sódicos.

Aunque existen unos 20 tipos diferentes de leyes de maclas, sólo unas pocas son realmente importantes. Es el caso de las maclas de Albita-Periclina, Carlsbad, Albita-Carlsbad, Baveno y Manebach, entre otras (fig.2.11). De todas ellas, las maclas de Albita y Periclina son las más comunes, sobre todo la primera de ellas, y las que mayor información proporcionan. Éstas pueden originarse no solo por crecimiento, como el resto de maclas, sino también por deslizamiento y por transformación de simetría o deformación, como veremos a continuación, en el siguiente apartado. Las diferentes leyes y tipos de maclas las comentaremos más adelante, en los apartados 2.4.3 y 2.4.5, respectivamente.

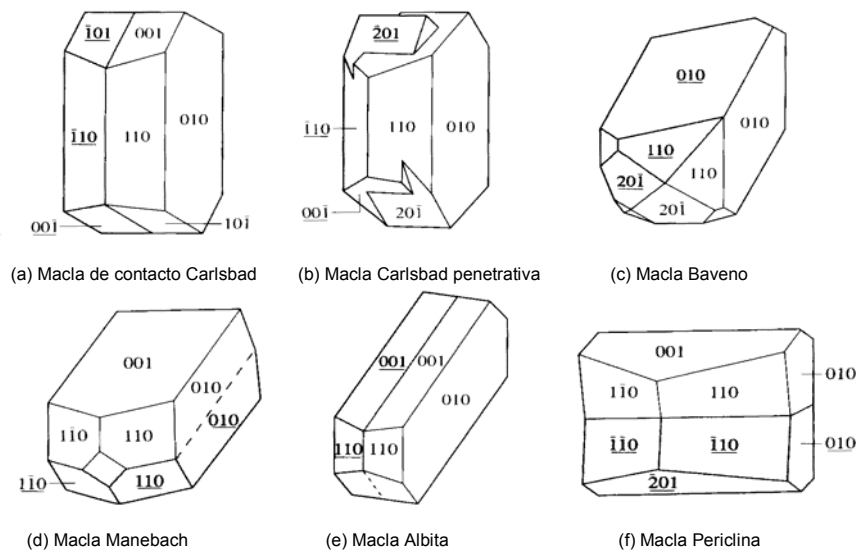


Fig.2.11. Algunos de los tipos de maclas más comunes en feldespatos. Las maclas de Albite, Periclina, Manebach y Baveno corresponden a la ley normal, mientras que la macla de Carlsbad es de ley paralela o compleja. Aparte de éstas, existen posibles combinaciones entre ellas. Las maclas de Albite y Periclina son polisintéticas y el resto son sencillas. Modificado de Deer et al. (2001).

2.4.2. Génesis de las maclas

Las maclas pueden originarse por varios mecanismos que no son siempre fáciles de reconocer a partir de la simple observación de su morfología. Buerguer (1945) clasificó las maclas como maclas de crecimiento, transformación y deslizamiento (estas últimas también llamadas maclas mecánicas).

• Maclas de crecimiento

Este tipo de maclas se pueden producir por un error en la propagación de la estructura de la cara en crecimiento, aunque normalmente las evidencias de tales errores se pierden durante la nucleación. En maclas sencillas de contacto o interpenetrativas, estos errores pueden aparecer en etapas muy tempranas, durante el crecimiento, pero no necesariamente durante la nucleación inicial ya que esto podría incrementar la energía libre total de formación de núcleos y reducir, por lo tanto, la frecuencia de maclado.

• Maclas de transformación

Se producen cuando un cristal sufre una pérdida de simetría a un grupo de simetría inferior. Los cambios de simetría en los feldespatos implican transformaciones de $2/m$ a $\bar{1}$, y suponen la pérdida de dos tipos de operaciones de simetría. Este tipo de maclas pueden aparecer por ordenamiento o por cizallamiento espontáneo, y pueden estar influenciadas por factores externos tales como la anisotropía del esfuerzo. Esto sólo ocurre en feldespatos empobrecidos en anortita, siendo este el caso, por ejemplo, de las maclas de Albite y Periclina.

- **Maclas de deslizamiento**

También se las llama maclas mecánicas. Microscópicamente, el maclado mecánico consiste en una cizalla simple de la red cristalina según un plano de deslizamiento y una dirección de deslizamiento sobre dicho plano. Este plano es el plano de macla, pero la dirección de deslizamiento no tiene por qué coincidir necesariamente con el eje de macla, ya que depende de si la macla es normal o paralela (esto lo veremos en el siguiente apartado). A nivel microscópico lo que ocurre es que los planos atómicos paralelos al plano de macla son desplazados unos respecto a otros en la dirección de deslizamiento de la macla. El maclado mecánico requiere elevados esfuerzos de cizalla, de hecho, es muy difícil que las maclas nucleen en redes cristalinas libres de dislocaciones. Se suelen iniciar, por el contrario, en zonas de alta concentración de esfuerzos como los *kinks* y las bandas de deformación o fracturas. En muchos casos se observa, incluso, que casi siempre la propagación de maclas es más fácil que la nucleación de otras nuevas.

El maclado mecánico es similar al deslizamiento de dislocaciones (*dislocation glide*) en algunos sentidos, aunque existen importantes diferencias. El deslizamiento de dislocaciones consiste en el desplazamiento por cizalla de un plano entero de un cristal sobre una superficie de deslizamiento, de modo que la porción deslizada del grano tenga la misma orientación que el grano original, concentrándose toda la deformación por cizalla en el plano de deslizamiento. Sin embargo, el maclado implica deformación por cizalla uniforme, y la porción maclada es la imagen especular de la red cristalina original. Otra diferencia es que la cantidad de deformación por deslizamiento de dislocaciones es ilimitada, mientras que en el caso del maclado la deformación queda limitada a la de la propia macla. Tanto en un caso como en otro, el deslizamiento de dislocaciones y el maclado son insensibles a la presión ya que no implican cambios de volumen. Sin embargo, a diferencia del deslizamiento de dislocaciones, el maclado es relativamente insensible a la temperatura y a la tasa de deformación ya que las maclas, a diferencia de las dislocaciones, no dependen de la activación del proceso de escalada de dislocaciones, el cual es función directa de la difusión intracristalina. Para la mayoría de los materiales, el maclado mecánico parece requerir mayores esfuerzos que el deslizamiento de dislocaciones, de modo que el primero tiende a ser más común a bajas temperaturas y en materiales de baja simetría con pocos sistemas de deslizamiento. Algunas maclas desaparecen cuando se eliminan los esfuerzos, siempre y cuando el esfuerzo sea menor que un valor crítico dado. Estas son las llamadas maclas elásticas, descritas por primera vez por Mügge (1888) y posteriormente por Cahn (1954).

Las maclas mecánicas o de deslizamiento se producen, sobre todo, en feldespatos empobrecidos en ortosa, por movimiento de átomos bajo la influencia de esfuerzos externos. Las maclas de Albite y Periclina son las únicas que se pueden formar por deslizamiento, dependiendo de la dirección del esfuerzo aplicado. Sólo si la estructura no se encuentra en un estado de desorden después del deslizamiento, las maclas mecánicas se ven favorecidas por movimientos de dislocaciones a altas temperaturas. Los esfuerzos de cizalla críticos que se requieren para formar este tipo de maclas son bastante altos.

2.4.3. Clasificación morfológica: Leyes de maclas

La estructura de los feldespatos exhibe muy diferentes tipos de pseudosimetrías y, de acuerdo con el maclado, es muy común que encontremos diferentes tipos de leyes de macla. En líneas generales, las leyes de maclas más comunes se dividen en tres grupos: normales, paralelas y complejas. Las maclas normales tienen sus ejes de macla normales a una posible cara del cristal, la cual es paralela al plano composicional. Para un cristal centrosimétrico, este proceso de maclado es equivalente a una reflexión en el plano de composición. Las maclas paralelas tienen como eje de macla una posible arista del cristal (es decir, un eje de zona) y el plano de composición es paralelo al eje de macla y no necesita ser necesariamente una cara del cristal. Algunas veces, un individuo *B* está relacionado con un individuo *A* a través de una ley de macla normal, y un individuo *C* se relaciona con el *B* a través de una macla paralela con el mismo plano composicional que el de la macla normal (fig.2.12). Se dice entonces que *C* y *A* están relacionados por una ley de macla compleja. El eje de macla de la macla compleja resultante permanece en el plano composicional y es normal a una posible cara del cristal (es decir, a 90° del eje de macla de la macla paralela). El individuo intermedio, *B*, que se relaciona con *A* y *C* por las leyes de macla simples, puede estar o no presente.

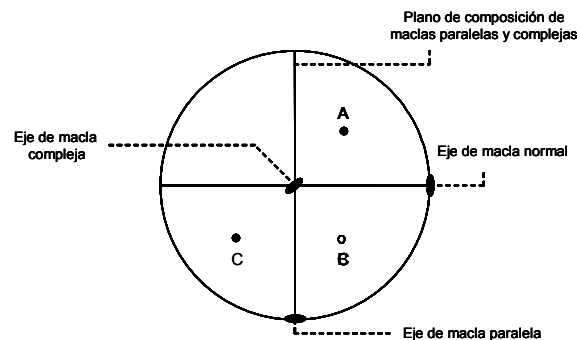


Fig.2.12. Representación estereográfica de las relaciones entre los elementos de maclas normales, paralelas y complejas. Modificado de Deer et al. (2001).

En cualquiera de los dos casos, al plano normal al eje de macla se le llama plano de macla (Bloss, 1971). La oblicuidad o desajuste angular entre los individuos maclados, que es una medida de la pseudosimetría, raramente excede los 5° (Cahn, 1954). El tipo de maclado no es determinado únicamente por las operaciones geométricas de rotación y reflexión, las cuales dan lugar a una clasificación de maclas en normales, paralelas y complejas, sino también por la simetría y pseudosimetría.

• Maclas Normales

Como ya hemos comentado, los feldespatos son centrosimétricos. Es debido a ello que las maclas normales pueden ser descritas tanto por rotación según el eje de macla como por reflexión según el plano de macla. Las leyes de macla más importantes son Albita, Manebach y

Baveno. Hay un tipo de macla, la macla X, que es dudosa ya que no se observa en feldespatos triclinicos. Esta es idéntica a la macla Carlsbad en feldespatos monoclinicos (Dowty, 1980; Wooster, 1981).

- La macla de Albita es muy frecuente en feldespatos triclinicos y es casi siempre polisintética. Existe una continuidad tipológica a través del plano de composición ya que las posiciones T_10 en un lado de dicho plano se corresponden con las posiciones T_{1m} al otro lado. Este tipo de maclas pueden originarse tanto por crecimiento como por transformación de simetría monoclinica a triclinica y deslizamiento, proporcionando una topoquímica invariante o casi invariante.
- La macla de Manebach aparece tanto en feldespatos monoclinicos como triclinicos y sólo puede originarse por crecimiento, siendo la mayoría maclas de contacto sencillas en las que la red cristalina rota alrededor de la normal a (001).
- La macla de Baveno aparece tanto en feldespatos monoclinicos como triclinicos, pero en este último caso se establece una diferencia entre Baveno derecha (plano de macla (021)) y Baveno izquierda (plano de macla $(0\bar{2}1)$). Estas maclas son maclas de contacto y sólo se originan por crecimiento. Wooster (1981) presentó un modelo para la macla Baveno que requiere una rotación alrededor de la normal a (021) y que produce una superficie composicional escalonada paralela al eje a .

• Maclas Paralelas

Las maclas paralelas se definen por un eje racional de rotación, un plano de macla irracional y un plano composicional que incluye a los ejes de macla. Solamente la macla de Periclina aparece por pseudomeroedría (este concepto lo veremos en el apartado 2.4.4) y es por ello que sea imposible encontrar este tipo de macla en feldespatos monoclinicos. La macla de la Periclina es la única macla paralela que es completamente coherente y que se origina por cualquiera de los tres mecanismos posibles: crecimiento, transformación o deslizamiento. Las posiciones de los planos de composición son tales que las maclas de Ala y Periclina son paralelos a (001) cuando $\gamma = 90^\circ$, y Carlsbad es paralela a (100) cuando $\alpha = 90^\circ$. En feldespatos monoclinicos, Manebach y Ala son idénticas; mientras que en feldespatos triclinicos, sin embargo, el plano composicional de Ala no difiere de (001) en más de 6° . Ya que γ varía muy poco de los 90° en plagioclasas de composición básica-intermedia, la diferencia entre Manebach y Ala puede llegar a ser muy pequeña.

<u>Tipo macla</u>	<u>Eje macla</u>	<u>Plano composición</u>
Ala	[100]	(0kl)
Periclina	[010]	(h0l)
Carlsbad	[001]	(hk0)

• Maclas Complejas

Se producen normalmente por rotación de 180° alrededor de la normal a un borde de una cara dada, la cual es también el plano de composición. Este tipo de maclas implican únicamente tres bordes de celda (a , b y c) y los tres planos principales [(100), (010) y (001)]. Hay seis posibilidades y los nombres que se utilizan son los nombres combinados correspondientes a las maclas normales para cada cara (Albita, Manebach, X) y las maclas paralelas para cada borde (Ala, Periclina, Carlsbad).

Nombre	Operaciones
Albita-Ala	$\perp[100](010)$
Manebach-Ala	$\perp[100](001)$
X-Periclina	$\perp[010](100)$
Manebach-Periclina	$\perp[010](001)$
X-Carlsbad	$\perp[001](100)$
Albita-Carlsbad	$\perp[001](010)$

Las maclas complejas nunca han sido reconocidas como maclas de contacto sencillas. Las dos maclas que implican a la macla X son dudosas ya que ésta nunca se ha observado, ella sola, en los feldespatos triclinicos. De las otras cuatro, las dos que implican a la Albita (Albita-Ala y Albita-Carlsbad) son las más comunes.

2.4.4. Clasificación estructural

Aparte de la clasificación morfológica de leyes de macla del apartado anterior, la clasificación más racional en los agregados biáxicos debería hacerse en función de su estructura cristalina. Todos los feldespatos maclados pertenecen al grupo de maclas originadas por pseudomeroedría (Smith, 1974). En relación a esto, podemos encontrar dos tipos de maclas:

• Maclas por pseudomeroedría (*pseudomerohedry twins*)

El elemento de simetría de la macla es un elemento de pseudosimetría de la red de los cristales considerados individualmente. Es decir, la red de la macla tiene pseudosimetría superior a la simetría de la red de los cristales que la componen. Esto es lo que ocurre en las plagioclasas, que son pseudomonoclínicas porque los ángulos α y γ tienen valores próximos a los 90° . Este tipo de maclas es imposible encontrarlas, por tanto, en feldespatos monoclinicos ya que ninguna fila de la red cristalina es un eje pseudosimétrico ni tampoco ninguno de los planos resulta ser un plano pseudo-espejo para todos los nodos de la estructura.

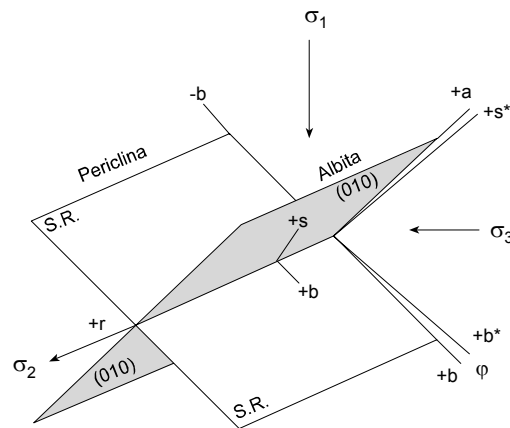


Fig.2.13. Vista tridimensional de los elementos geométricos de las maclas mecánicas de Albite y Periclina, y los ejes de esfuerzo relacionados con el maclado mecánico. El esfuerzo compresivo máximo se localiza en el cuadrante donde los sentidos de cizalla del maclado de la Albite y la Periclina son positivos y negativos, respectivamente. Las líneas de deslizamiento son b y s , y los planos de deslizamiento son la sección rómbica (RS) y (010) para la Periclina y la Albite, respectivamente. La línea r de la sección rómbica es perpendicular a b , b^* y s . La oblicuidad es $\varphi = b \wedge b^* = s \wedge s^*$. Modificado de Egydio-Silva & Mainprice (1999).

Los feldespatos triclinicos sólo se desvían ligeramente de la simetría y geometría de los monoclinicos, de manera que $[010]$ es un pseudoeje y (010) un pseudoplaneo, y pueden funcionar como elementos de macla. Este es el caso de las maclas de la Albite y la Periclina. En el caso de la macla de la Albite, las redes triclinicas de los dos elementos de la macla dan lugar a una red pseudomonoclinica casi común, ya que son simétricos respecto al plano de macla (010) , que es el plano de simetría monoclinico, y la operación de macla es reflexión en (010) , lo que equivale a una rotación de 180° alrededor del eje b^* , que es la normal a (010) . El plano de macla y el plano de composición son el mismo plano racional, (010) . El ángulo entre b y b^* es la oblicuidad (φ), que varía entre 0° y 4° en los feldespatos (fig.2.13). Para la macla de la Periclina, b es el eje de macla. El plano composicional, también llamado *sección rómbica*, es el plano irracional que contiene a b y a la normal de b en (010) , llamada r . El plano de macla es el plano perpendicular a b que contiene a r , un plano casi perpendicular al plano de composición.

Ley de macla	Plano de macla	Eje de macla	Plano de composición
Albite	(010)	eje irracional $\perp (010) \equiv b^*$	(010)
Periclina	plano irracional $\perp b$	b	sección rómbica $(k0l)$

Estos dos tipos de maclas tienen la misma oblicuidad y sus planos composicionales forman casi ángulo recto. Además, solo aparecen en feldespatos triclinicos y son las únicas que resultan de una pérdida de simetría (maclas de transformación, *transformation twins*) o de un incremento de la simetría (maclas de deslizamiento, *glide twins*).

• **Maclas por pseudomeroedría reticular (*lattice pseudomerohedry twins*)**

El elemento de simetría de la macla lo es también de pseudosimetría en una red múltiple del retículo de los cristales maclados. Estas son las maclas más frecuentes. En ellas, la red simple de los cristales maclados forma parte de una red múltiple casi común a ellos y que posee una simetría pseudorrómbica. En efecto, en lugar de un eje binario son tres (b , c y el normal a ambos), ya que la existencia de dos de ellos, que son perpendiculares entre sí, lleva consigo la aparición de un tercero normal a los otros dos.

Este tipo de maclas, que comprende el resto de maclas de los feldespatos, se producen cuando una red múltiple presenta pseudosimetría y la operación de macla resulta en casi una coincidencia de los nodos de la malla múltiple. La macla de Carlsbad es un claro ejemplo. Esta macla se produce por rotación de 180° alrededor de $[001]$ o por reflexión en un plano perpendicular a $[001]$ (fig.2.14). Debido a las dimensiones de las celdas unidad, la fila $[001]$ es casi perpendicular a $[201]$, de modo que la rotación de 180° alrededor de $[001]$ produce una casi coincidencia de $[201]$ y $[\bar{2}0\bar{1}]$.

La macla de Carlsbad tiene usualmente como plano de composición a (010) , pero cualquier plano $(h0l)$ en la zona $[001]$, o cualquier superficie formada por una combinación de estos planos, es teóricamente una superficie de composición posible. Las maclas de Carlsbad pueden ser curvadas, irregulares o con superficies de escalonamiento composicional, aunque la mayor parte del área del plano de macla es paralela a (010) .

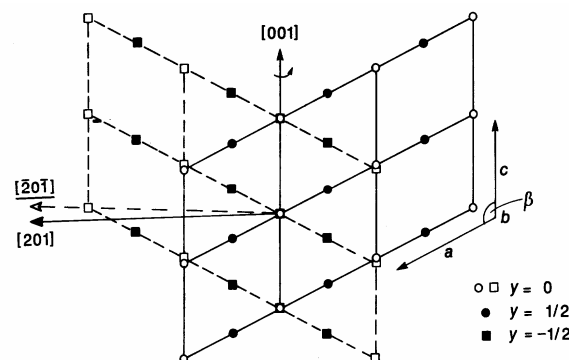


Fig.2.14. Representación de la red cristalina de la macla Carlsbad en la sanidina. La proyección es paralela a a y b en (010) . Los nodos de la estructura antes de maclar ($\circ, \bullet$) y después ($\square, \blacksquare$) se relacionan por rotación alrededor de la fila $[001]$ o por reflexión en (100) . Modificado de Smith & Brown (1988).

2.4.5. Algunos tipos de maclas

Las primeras investigaciones sobre el maclado en feldespatos fueron revisadas por Smith (1962) y Burri (1962, 1964), aunque se han llevado a cabo trabajos más recientes y detallados por parte de otros autores, como Smith & Brown (1988). Estos últimos discutieron sobre los diferentes procesos que dan lugar a las maclas, es decir, crecimiento, recristalización, transformación, reemplazamiento o deformación mecánica (*glide twinning*).

Se han ilustrado en la fig.2.11 algunas de las maclas más comunes en feldespatos. Las maclas de Carlsbad, Baveno y Manebach se encuentran tanto en feldespatos monoclinicos como triclínicos, principalmente con sólo dos individuos maclados, pero algunas veces con tres, cuatro o incluso seis. Las plagioclasas muestran, a menudo, un maclado repetitivo a escala microscópica. Ocasionalmente se trata de maclas sencillas tipo Manebach y, más raramente, maclas tipo Baveno. Las maclas de Carlsbad, sin embargo, son bastante comunes y pueden ser tanto sencillas como múltiples. Las más frecuentes de todas son las maclas múltiples de Albita y Periclina (la de Albita raramente está ausente) y otras maclas como, por ejemplo, Aclina, Ala, Albita-Carlsbad y Albita-Ala no son infrecuentes tampoco.

Las relaciones entre las maclas y la estructura cristalina de los feldespatos fue discutida por Taylor *et al.* (1934), y es resumida e ilustrada a continuación:

• Carlsbad

Macla de tipo paralela, con eje [001] y plano de composición (100) para feldespatos monoclinicos, y muy cercano a éste para los triclínicos. Para comprenderla mejor, ver la fig.2.15. Las líneas negras gruesas conectan átomos de Si con el fin de representar una cadena sencilla que se dispone paralela al eje x. En la estructura sin maclar, otra cadena se sitúa en la misma dirección y es producida por reflexión en el plano (010), el cual contiene los átomos A de oxígeno. Las posiciones marcadas como A_T son aquellas relacionadas con A por ejes de macla que son paralelos a z y que permanecen en el plano de reflexión horizontal. Se entiende que A_T permanece cercano a A y, además, que el efecto del eje de macla en los átomos de valencia dos (D_1 y D_2), es llevarlos a la coincidencia casi exacta de uno con el otro. Comenzando con los átomos A_T de oxígeno, se puede construir una cadena relacionada con la primera a través del eje de macla.

Dowty (1980) examinó las posibles estructuras que podrían aparecer en los límites de una macla de tipo Carlsbad con plano de composición (100) en adición a maclas Carlsbad (monoclinicas) y Albita-Carlsbad (triclínicas) con plano de composición (010). Cuando (010) era el plano de composición, las estructuras en los límites eran muy similares a aquellas en las estructuras monoclinicas y triclínicas. Implicaban dislocaciones con el vector c en la dirección x. El plano de composición (100) tiene, sin embargo, estructuras muy poco probables en un feldespato normal, lo cual podría explicar la rareza de tales maclas (Wooster, 1981).

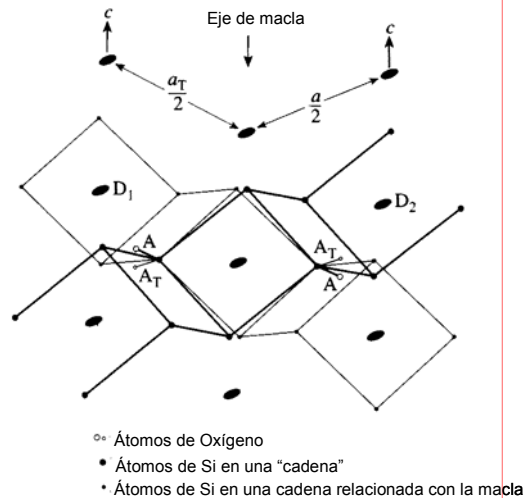


Fig.2.15. Proyección (010) de la macla de Carlsbad. Las líneas más gruesas conectan átomos de Si en orden a representar una cadena sencilla paralela al eje x . En la estructura sin maclar se observa otra cadena (a trazo más fino), en la misma dirección que la anterior y producida por reflexión en el plano (010) que contiene a los átomos de oxígeno. Modificado de Deer et al. (2001).

• Baveno

Macla de tipo normal, con eje $\perp(021)$ y plano de composición (021). Se ilustra en la fig.2.16. Debido a la naturaleza pseudotetragonal de esta proyección a lo largo de la dirección x (ejes de cadena), las cadenas tales como las marcadas con X y X_T están relacionadas en la estructura sin maclar; no sólo por el plano espejo MM , sino también por GG , el plano de pseudo-deslizamiento de simetría (021). Las diferencias en las posiciones de los átomos producidos por maclado a través de GG , y aquellas producidas por reflexión a través de MM (como en un cristal sin maclar), son tan pequeñas que no se pueden indicar claramente en el diagrama.

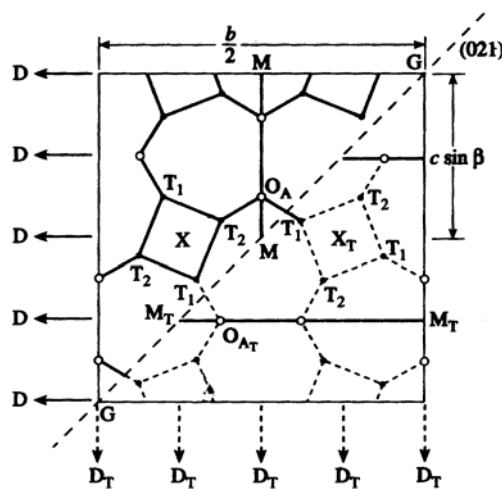


Fig.2.16. Proyección en (201) que ilustra la macla de Baveno (modificado de Taylor et al. 1934). Ver texto para más detalle.

La diferencia entre las dos posiciones es revelada, sin embargo, por las posiciones de átomos T equivalentes. Cuando se compara la posición relativa de los átomos T_1 , T_2 y O_A a ambos lados del plano de composición, se comprueba que debe haber actuado una operación de maclado a través de dicho plano (fig.2.16). En la macla producida por reflexión en (021) , los planos espejos $M_T M_T$ se encuentran aproximadamente a ángulo recto de MM , y los átomos de valencia dos D_T se hallan casi normales a los D .

• Manebach

Macla de tipo normal, con eje $\perp(001)$ y plano composicional (001) . Se ilustra en la fig.2.17. Por encima de la línea horizontal MM (plano de macla) se muestra una banda de anillos formando un eslabón. En el cristal sin maclar, la estructura por debajo de MM está relacionada con la de arriba a través del eje divalente D que pasa por los átomos A de oxígeno. Los átomos de Si unidos a los O_A se encuentran, por lo tanto, en dos planos: por encima y por debajo del plano que contiene a D .

En el caso de la macla de Manebach, el silicio se encuentra en la posición Si_T , y tiene las mismas coordenadas x que los átomos Si (considerando el eje x como paralelo al plano de macla MM).

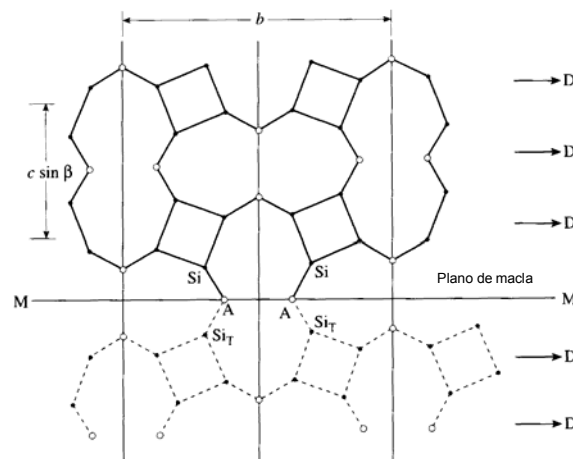


Fig.2.17. Proyección en (201) que ilustra la macla de Manebach (modificado de Taylor et al. 1934). Ver texto para explicación.

• Albita y Periclina

Los cristales de plagioclasa son a menudo tabulares según (010) , como en el caso de la ley de la Albita, y alargados en algunas ocasiones paralelamente al eje x y más raramente al eje z . En el caso de la Periclina, sin embargo, el hábito es alargado según el eje y . Ambos tipos de maclas aparecen muy frecuentemente en feldespatos alcalinos triclinicos, y de las dos leyes la más común es la de Albita. Las estructuras de feldespatos triclinicos no se desvían demasiado

de la simetría monoclinica. (010) es un plano pseudo-espejo y b es un pseudo-eje de valencia dos.

- En la macla de Albita [macla normal, eje irracional $\perp(010)$, plano de composición racional (010) que coincide con el plano de macla], la unión de las maclas individuales según (010) resulta en un plano espejo real que relaciona las estructuras triclinicas a ambos lados (fig.2.18), o lo que es lo mismo: reflexión en (010) o rotación de 180° sobre el eje b^* , que es la normal al plano (010). La macla de Albita es normalmente polisintética y como $(010) \wedge (001) \approx 86^\circ$, el plano $\perp(001)$, bien como cara cristalina o como plano de exfoliación, está cruzado por estriaciones o surcos paralelos. Estas estriaciones suelen ser tan finas que no son visibles a simple vista.

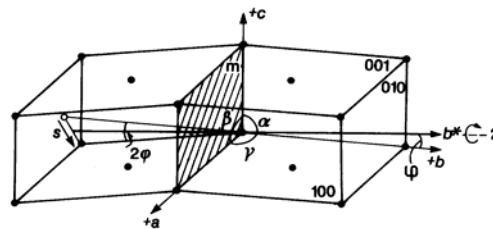


Fig.2.18. Representación de la red cristalina de la macla de Albita en plagioclasas. La operación de macla es reflexión en (010) o rotación de 180° alrededor de b^* . La estructura cristalina también puede maclarse por deslizamiento paralelo a s , aumentando la magnitud de deslizamiento con la distancia al plano m . Modificado de Smith & Brown (1988).

- La macla de Periclina [macla normal, eje [010] que equivale a un eje de simetría monoclinico, plano de composición o sección rómbica ($h0l$)] también es polisintética y las estriaciones resultantes pueden verse sobre (010) según una dirección que no es constante y que varía con la composición de la plagioclase (fig.2.19). En la unión de la macla, b es un verdadero eje divalente que relaciona las dos estructuras triclinicas. En cuanto a la sección rómbica, ésta se ilustró en la fig.2.13. Queda definida como el plano que contiene a b y a la normal de b en (010), llamada r ; y su posición angular es definida en relación a (001). Dicha posición se especifica por el ángulo σ medido en el plano (010) entre las trazas de la exfoliación (001) y las de la sección rómbica. La variación en esta posición angular con la composición es muy grande, desde -18° para la anortita a $+100^\circ$ para la microclina. La sección rómbica es cercana a (001) para plagioclasas de composición intermedia, pero nunca forma más de 15° con respecto a (100).

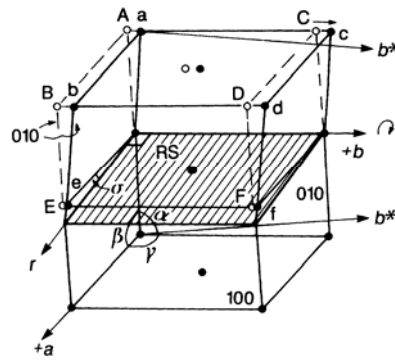


Fig.2.19. Representación de la red cristalina de la macla de Periclina en plagioclasas. La operación de macla es rotación alrededor de b o reflexión en el plano perpendicular a b y que contiene a r , el cual bisecta a los dos planos (010). La estructura también puede maclarse por deslizamiento paralelo a b . Las posiciones de los nodos antes del maclado se muestran con (o) y con letra mayúsculas (A-F); después de maclar se utilizan letras minúsculas (a-f). El plano de composición es la sección rómbica (RS, plano rayado) que contiene a b y r . El ángulo rómbico es $\sigma = r \wedge a$ y es negativo en esta figura. Modificado de Smith & Brown (1988).

Ilustramos dos ejemplos de sección rómbica en la fig.2.20. En el caso (a) σ tiene un valor positivo y pequeño, en (b) σ tiene un valor negativo ligeramente mayor. La localización de la sección rómbica también podría ser descrita, por otro lado, a través del uso de la propiedad del rombo según la cual sus diagonales intersectan en ángulos rectos. Una diagonal es el eje y y la otra es la intersección de la sección rómbica con el plano (010).

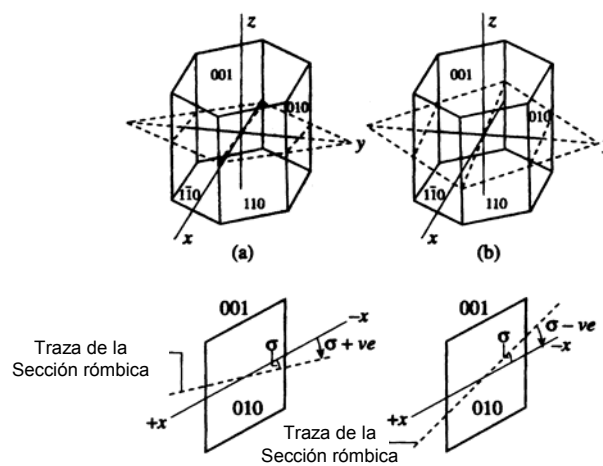


Fig.2.20. Sección rómbica (indicada por líneas discontinuas) en dos orientaciones diferentes. La posición de la sección rómbica se especifica por el ángulo σ que forma su traza con la traza de (001), medido sobre el plano (010). En el ejemplo de la izquierda σ toma un valor positivo, y en el de la derecha toma un valor negativo. Modificado de Deer et al. (2001).

Así, el plano de macla de la Periclina puede ser definido como aquél que contiene al eje y y que corta a (010) según una línea a 90° de y . A diferencia de las maclas de Ala y Carlsbad, que difieren poco de (001) y (100), respectivamente, la *sección rómbica* de la Periclina representa el plano de composición. Además de la composición, la temperatura y la presión también influyen en la posición angular de la *sección rómbica*, lo cual puede ser utilizado para obtener información petrogenética. Una vez se forma la macla de la Periclina, el plano de composición no puede cambiar de posición a menos que se produzca recristalización.

Los feldespatos monoclinicos no pueden mostrar maclas de Albita o Periclina ya que para ellos los ejes de macla ($\perp(010)$, b) coinciden con el verdadero eje divalente de la estructura sin maclar. La orientación del plano de macla de la Periclina puede dar información útil sobre la composición química y las condiciones petrogenéticas de la cristalización (Stewart & Von Limbach, 1967; Grundy & Brown, 1974; Thompson & Hovis, 1978; Brown *et al.* 1984; Smith & Brown, 1988). Lawrence (1970) sugirió, utilizando la orientación preferente de la albita para determinar las direcciones de los esfuerzos principales, que las maclas de Albita y Periclina pueden producirse bajo las mismas condiciones de esfuerzo. Por el contrario, Olsen & Kohlstedt (1985) observaron que la macla de la Periclina era menos frecuente que la macla de la Albita en las plagioclasas estudiadas en una zona de cizalla y sugirieron que el esfuerzo de cizalla necesario para producir esta última debía ser más pequeño.

En el caso de las maclas de Albita y Periclina, se intercambian las posiciones T_10 por T_1m y, similarmente, T_20 por T_2m , aunque no se intercambia T_1 por T_2 (Laves, 1952, 1965). Como consecuencia, el maclado mecánico podría destruir el orden en la estructura $C\bar{1}$ de la albita de baja temperatura y forzar al Al a ocupar una posición que no sea T_10 . Así, el maclado en esta estructura ordenada sería imposible. Para la albita de alta temperatura y la analbita (también $C\bar{1}$) el Al y el Si están muy desordenados, lo contrario de lo que sucede en el caso de la anortita ($I\bar{1}$ ó $P\bar{1}$) para la mayoría de las temperaturas. Debido a que las maclas de Albita y Periclina no intercambian las posiciones T_1 y T_2 para el caso de plagioclasas albiticas de alta temperatura, estas maclas no pueden destruir su orden y, por lo tanto, deben producirse con relativa facilidad. Las plagioclasas intermedias son, sin embargo, más complejas ya que consisten en: (a) dominios similares al de la albita ($C\bar{1}$), la cual presumiblemente no puede maclarse a bajas temperaturas debido a su grado de ordenamiento, y (b) dominios similares a la anortita ($I\bar{1}$), la cual presumiblemente sí que puede maclarse. En general, a baja temperatura, donde hay ordenamiento a escala de los dominios, el maclado mecánico es más fácil conforme se pasa de albita a anortita. Por el contrario, a altas temperaturas existe un desorden completo y no hay muchas diferencias (Starkey, 1967). Sin embargo, la exsolución es bastante común en las plagioclasas intermedias y dificulta la propagación de maclas.

En las maclas de Albita y Periclina, el movimiento de bandas atómicas es hacia el extremo positivo del eje c (viéndolo desde el extremo positivo del eje b). La cantidad de cizalla en ambas leyes de macla es pequeña y, además, es la misma en ambos casos. Para An_{55} el ángulo de cizalla es $7^\circ 50'$ (dos veces la oblicuidad) y la cantidad de cizalla es 0.137; así, el máximo acortamiento posible en una muestra debido al maclado es del 7% (Borg & Heard,

1970). En general, el maclado en ambas leyes puede aparecer simultáneamente ya que los planos de deslizamiento de ambos tipos de maclas se sitúan cercanos a los 90° para las plagioclasas de baja temperatura, entre An₂₅ y An₁₀₀, y para las de alta temperatura. Las maclas de Albite y Periclina también pueden formarse por crecimiento, aunque el maclado mecánico consiste en maclas polisintéticas a pequeña escala, afiladas y/o curvas y restringidas a pequeñas porciones del grano, siendo más numerosas en bordes de grano y bordes internos. A diferencia de esto, las maclas de crecimiento consisten en maclas de mayor tamaño, pero menos frecuentes, que suelen ser rectas, paralelas y atraviesan todo el grano de un extremo a otro.

2.4.6. Evidencias de maclado en muestras naturales de plagioclasas

Son muchos los autores que han investigado la frecuencia relativa de las diferentes leyes de maclas en relación a factores químicos, estructurales y ambientales. Así, por ejemplo, Turner (1951) llegó a la conclusión de que en rocas metamórficas era relativamente difícil encontrar plagioclasas macladas, y que cuando aparecían solían ser del tipo maclas sencillas y no múltiples; también observó que las maclas de Albite y Periclina eran más frecuentes que las de Carlsbad u otro tipo. Gorai (1951) llegó a similares conclusiones y comprobó que en rocas ígneas eran muchas las plagioclasas que estaban macladas y que, en general, todas las leyes de maclas estaban bien representadas. Este autor también encontró que en rocas volcánicas había otros tipos de maclas aparte de la de Albite, Periclina y Aclina, y que eran más abundantes en plagioclasas cálcicas que en sódicas.

Ha habido numerosos estudios sobre las maclas de Albite y Periclina en plagioclasas deformadas naturalmente, pero el significado de estas observaciones está limitado por errores en la identificación de la ley de macla y por incertidumbres en la identificación del origen mecánico o de crecimiento de tales maclas (Smith, 1974). Por ejemplo, hay algunos trabajos sobre la tendencia de la macla de tipo Albite a dominar en plagioclasas sódicas, y de la Periclina, sin embargo, en plagioclasas cálcicas (Turner, 1951; Crawford, 1966). No obstante, para la mayoría de las composiciones de plagioclasas ambos tipos de maclas debieran ser igualmente frecuentes, ya que el ángulo entre los planos de deslizamiento de ambas es cercano a los 90°. De hecho, Vernon (1965) observó igual número de maclas de Albite y Periclina en gneises máficos, en el caso de maclas identificadas como de origen mecánico. De modo similar, el maclado ha sido considerado más común en rocas metamórficas de tamaño de grano grueso, y menos común en las de tamaño de grano fino (Gorai, 1951; Turner, 1951). Sin embargo, esta correlación puede reflejar una diferencia entre granos originales deformados y granos recrystalizados de tamaño fino (Goode, 1978; Borges & White, 1980; Brown *et al.* 1980; Brodie, 1981).

Turner (1951) y Smith (1974) resumieron algunas observaciones que indicaban que el maclado mecánico en rocas metamórficas es más común bajo condiciones de alto grado. Esto es consecuente con que el maclado mecánico es más fácil que se desarrolle en plagioclasas de composición sódica e intermedia. También observaron que las maclas en rocas ígneas eran a menudo polisintéticas, lo cual puede ser otro indicador de que el maclado mecánico es

solamente posible a altas temperaturas, donde el estado estructural es desordenado (Starkey, 1967).

A través del estudio de las relaciones entre maclas lamelares truncadas y la morfología del cristal en las plagioclasas, Vance (1961) concluyó que el maclado polisintético (lamelar múltiple) podría ser primario además de secundario (maclas de transformación), y también que el maclado primario estaba favorecido por el crecimiento euhedral y por una rápida recristalización. Este autor apuntó a que el maclado primario de la Albita y la Periclina era común en rocas ígneas, pero raro en plagioclasas metamórficas. Vance (*op.cit.*) estaba más a favor de los factores ambientales y no de la propia estructura del cristal y su composición como factor de influencia dominante en el maclado de las plagioclasas. Wickman & Lundström (1939), al igual que Vance (1961), cuestionaron las supuestas relaciones entre la anchura lamelar y la composición química en maclas de Albita en oligoclasas. Lundström (1971) investigó y midió las anchuras de la macla de Albita lamelar en una oligoclasa (An_{15}) de la pegmatita de Ytterby (Suecia) y en un fenocristal de labradorita (An_{66-67}) del volcán Surtsey (Islandia). Los resultados en ambos casos fueron diferentes.

Una limitación de la utilidad del diagnóstico del maclado de la Periclina, observada por otros autores, es que el plano de composición no siempre coincide con la sección rómbica. Esta situación puede darse cuando el estado estructural de un feldespato no cambia después de que se haya maclado, ya que aunque los ángulos reticulares y la sección rómbica pueden cambiar, el plano de composición original puede permanecer inalterable. En realidad, se han utilizado comparaciones entre planos composicionales de Periclina, tanto observados como calculados, para inferir los cambios estructurales que aparecen como consecuencia del maclado (Laves & Schneider, 1956; Smith, 1958). Starkey (1967), sin embargo, expresó el criterio de que las maclas polisintéticas de Albita y Periclina en plagioclasas son de origen secundario más que de origen primario (maclas de crecimiento). Examinó datos publicados de parámetros de celdas y secciones rómbicas (orientación σ del plano de macla de la Periclina) para 105 plagioclasas, y mostró que éstos podrían proporcionar información sobre la historia térmica de los cristales en relación a la roca huésped.

En el estudio de plagioclasas llevado a cabo por Seifert (1964) en el granito de Nonewaung (Woodbury, Connecticut, USA), este autor sugirió que la indiferencia en la existencia de un plano u otro de composición en maclas de plagioclasas que presentan exsolución, puede resultar de la necesidad de romper los fuertes lazos de unión en las plagioclasas macladas. También discutió la diferencia entre leyes de maclas que prevalecen en rocas ígneas (Manebach, Carlsbad y Baveno) en comparación con las plagioclasas de rocas metamórficas. En su estudio, las maclas de Manebach y Albita, así como la de la Periclina, fueron interpretadas como maclas primarias (de crecimiento) en el primero de los casos, y como secundarias en el segundo caso. La conclusión de Laves (1952a, 1965) de que la albita y las plagioclasas sódicas no pueden sufrir maclado mecánico, al menos a alta temperatura, fue impugnada por Vogel & Siefter (1965). Laves (1974) retomó la discusión e intentó clarificar la terminología utilizada para describir los diferentes tipos y orígenes.

Brown & Macaudière (1986) investigaron, mediante microscopía óptica y electrónica, el maclado mecánico en plagioclasas básicas de una meta-anortosita de Escocia. Las maclas mecánicas (ambas leyes, Aclina y Periclina) aparecían bien desarrolladas, algunas con una estructura en escalera (*ladder*), visible con el TEM. Estos autores discutieron la facilidad del maclado (o pseudomaclado) como una función del contenido de anortita, incluso pudieron calcular la supuesta temperatura de equilibrio.

Brown (1989a, b) estudió el maclado en exsoluciones de peristeritas y apuntaron que aunque el verdadero maclado de deslizamiento en la albita-baja es imposible, se pueden producir pseudomaclas si los esfuerzos son lo suficientemente altos y el tiempo durante la aplicación de dicho esfuerzo es el suficiente para invertir el orden (Si,Al) durante la difusión.

2.4.7. Estudios experimentales de maclado mecánico en plagioclasas

Hay un gran número de estudios experimentales acerca del maclado mecánico de tipo Albita y Periclina en plagioclasas, incluyendo las investigaciones llevadas a cabo por Emmons & Gates (1943), Muir (1955), Gay & Brown (1956), Borg & Handin (1966), Borg & Heard (1967, 1968, 1970), Sheifert & VerPloeg (1977) y Marshall & McLaren (1977), quienes reconocieron la posibilidad de que el maclado de las leyes de la Albita y la Periclina pudieran desarrollarse no sólo durante el crecimiento, sino también durante la transformaciones sólidas de fases y deslizamientos, como ya fue sugerido por Van Werveke (1883, en Borg & Handin, 1966).

Los resultados para las plagioclasas de composición albita y anortita confirman las predicciones hechas de acuerdo con a la estructura del cristal y con diversas consideraciones sobre el grado de ordenamiento. Sin embargo, los resultados en plagioclasas de composición intermedia son menos claros. Los experimentos muestran que la albita de baja temperatura y la peristerita no se pueden maclar mecánicamente, ni a temperatura y presión ambiente (Mügge & Heide, 1931), ni tampoco a temperaturas por encima de los 800°C y presiones superiores a 10 kbar (Borg & Heard, 1970). No obstante, una muestra de albita desordenada previamente a la deformación mostró abundante maclado bajo condiciones de 800°C y 10 kbar, aunque no se macló, sin embargo, a 25°C y 10 kbar (Borg & Heard, 1970). A diferencia de la albita, la anortita puede maclarse con relativa facilidad. Mügge & Heide (1931), de hecho, fueron capaces de producir maclas a presión y temperatura ambiente. Borg y Heard (*op.cit.*) no observaron maclas en muestras deformadas a 25° y 10 kbar, pero sí abundantes maclas a 800°C y 10 kbar. Las observaciones de TEM para estas últimas muestras mostraron que los límites de las maclas de Periclina implicaban un vector movimiento de $1/2[001]$ (Marshall & McLaren, 1974), como predijo Starkey (1963).

La situación para las plagioclasas intermedias es bastante menos clara. Borg y Heard (1969, 1970) observaron que las plagioclasas con composiciones An₃₀-An₇₇ que inicialmente presentaban un estado estructural desordenado, no podían ser macladas a temperaturas inferiores a los 800°C. Sin embargo, en experimentos de deformación a 800°C y 8-10 kbar se observaba abundante maclado (confirmado con el TEM por Marshall & McLaren, 1977b). Una

muestra de An_{60} , con estado estructural altamente ordenado, mostró las maclas mejor desarrolladas, la mayoría de ellas de tipo lamelar. Estos autores realizaron experimentos a altas presiones en plagioclasas de varias composiciones y observaron que el maclado mecánico solamente aparecía en especímenes deformados por encima de los 800°C y con presiones de confinamiento de 8-10 kbar. Enfatizaron que si las maclas de Albita y Periclina observadas eran de origen mecánico, era posible deducir la orientación de los esfuerzos principales que las produjeron.

Borg & Heard (1969) indujeron maclas mecánicas de Albita y Periclina en siete plagioclasas: An_1 y An_{59} (desordenadas), An_{32} , An_{39} y An_{53} (ligeramente desordenadas), y An_{76} y An_{95} (transición a anortita), a 800°C y 8-10 kbar de presión de confinamiento. No se detectó ningún maclado microscópico en una albita ordenada (Ab_1) y una oligoclasa (An_{20}), ni tampoco en feldespatos de composición An_{11} y An_{14} o labradoritas-bajas (An_{51}). El deslizamiento paralelo a (010) con dirección de deslizamiento a $\approx 13^{\circ}$ de [001] apareció en algunos cristales ricos en sodio. Estudios adicionales de deformación de las mismas plagioclasas, así como de otros tipos, fueron llevados a cabo por Marshall & McLaren (1977).

A partir de experimentos de recristalización, Lofgren (1974) observó que la morfología de los cristales de plagioclasas depende muchísimo del grado de enfriamiento (ΔT), cambiando de cristales tabulares cuando el ΔT es pequeño, a cristales esqueléticos, dendritas y esferulitas cuando el ΔT es mayor. Lofgren & Donalson (1975) mostraron experimentalmente que las morfologías esqueléticas, curvadas y ramificadas de los cristales de plagioclasa encontrados en rocas bandeadas (*comb-layered*) resultaron de un sobreenfriamiento.

Seifert y VerPloeg (1977) encontraron que para muestras de An_{50} con un estado estructural de ordenamiento bajo-intermedio, y deformadas a presiones de 5-7 kbar, era común el maclado mecánico a temperaturas $\geq 800^{\circ}\text{C}$ y que éste aumentaba con el incremento de la temperatura. Relacionaron la frecuencia de maclado con la transformación a un estado estructural más ordenado. La interpretación de los resultados resulta difícil porque al desorden en plagioclasas intermedias se le suma los efectos del maclado. Además, a altas temperaturas ($\geq 800^{\circ}\text{C}$) son necesarias para el maclado en muestras con un estado estructural desordenado, al menos para las tasas de deformación experimental más rápidas. Tal activación térmica está usualmente asociada con procesos controlados por difusión, lo que puede indicar que la difusión es necesaria para producir maclas o pseudomaclas en los dominios $C\bar{1}$ e $I\bar{1}$ (Laves, 1974).

2.5. ORIENTACIÓN CRISTALOGRÁFICA PREFERENTE Y ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTOS SOBRE LOS SISTEMAS DE DESLIZAMIENTO ACTIVOS EN PLAGIOCLASAS

2.5.1. Introducción

Para reconstruir la historia geológica de las rocas metamórficas es necesario comprender los mecanismos que producen la orientación cristalográfica preferente que desarrollan sus minerales. Estos mecanismos son, por ejemplo, deformación plástica, nucleación orientada, crecimiento durante la recrystalización, cristalización bajo un campo de esfuerzos y rotación mecánica de granos, etc.

La mayor parte de las rocas deformadas muestran una orientación cristalográfica preferente (OCP) de los minerales que las constituyen. En el caso de cristales con forma planar o alargada según una dirección cristalográfica, como es el caso de anfíboles y micas, la OCP coincide con la fábrica planar o lineal definida por la orientación sistemática de los cristales. La orientación cristalográfica preferente puede formarse por recrystalización estática y/o dinámica, aunque para el caso de minerales de hábito equidimensional el mecanismo más importante es la deformación intracrystalina por *creep* de dislocaciones. Este proceso cambia la forma del cristal y, por lo tanto, las interacciones con granos vecinos implican una rotación del grano con respecto a los ejes de deformación infinitesimal o finita. El maclado mecánico tiene un efecto rotacional similar. Cuando existen varios sistemas de deslizamiento activos (de ellos hablaremos más adelante, en el apartado 2.5.4), el comportamiento rotacional de los granos y el modelo de la OCP resultante llega a ser más complejo.

Podemos considerar dos situaciones principales bajo las cuales se puede desarrollar una orientación cristalográfica preferente en rocas deformadas: (1) a baja temperatura o a elevada tasa de deformación, donde no existe recrystalización aunque, no obstante, el desarrollo de la OCP puede producirse tanto por rotación de granos heterodiamétricos como por deslizamiento intracrystalino y rotación de granos, y (2) a alta temperatura o a baja tasa de deformación, donde sí se produce recrystalización generalizada, y el modelo de OCP que se forma en la roca llega a depender de muchos factores, algunos de los cuales son (Schmid, 1994):

- *Sistemas de deslizamiento operativos* y cantidad de desplazamiento en cada uno de ellos.
- *Forma del elipsoide de la deformación finita*: de aplastamiento, constriccional o plano. Este factor determina en qué dirección rotan los cristales y, por tanto, la forma de la fábrica resultante.
- *Valor de la deformación finita*. Normalmente, si el tipo de flujo no cambia durante la deformación, el modelo de OCP aumenta su intensidad con el incremento de la deformación y sufre únicamente ligeros cambios en la geometría.

- *Vorticidad cinemática.* En materiales inicialmente isótropos, las historias de deformación no coaxial conducen a modelos de OCP con simetría monoclinica, mientras que la deformación progresiva coaxial conduce a modelos con mayor simetría cristalina.
- *Actividad de la recrystalización dinámica.* La recrystalización puede influir en los modelos de OCP de varias maneras, pero el efecto es difícil de predecir. Puede producirse un descenso en la intensidad de la fábrica por generación de granos nuevos orientados al azar; o puede verse reforzada por la eliminación de ciertos granos con densidad de dislocaciones relativamente alta. Los granos que se encuentran orientados desfavorablemente para el deslizamiento pueden llegar a ser eliminados por este proceso si llegan a desarrollar una alta densidad de dislocaciones debido a la deformación a la que se ven sometidos por parte de los granos vecinos (Jesell, 1987; Ree, 1990). Tanto en un caso como en el otro se han obtenido pruebas experimentales de ambos procesos.
- *Crecimiento de granos a partir de una solución.* En muchos minerales la tasa de crecimiento depende de la dirección cristalográfica y el crecimiento de tales minerales puede, por tanto, producir una orientación preferente (Shelley, 1979, 1989, 1994).

Teóricamente, debería ser posible utilizar los modelos de OCP como fuente de información de los seis parámetros comentados arriba. Sin embargo, los conocimientos acerca del desarrollo de una OCP son todavía escasos. La comparación de modelos de OCP con ejemplos naturales de rocas sometidas a temperaturas o geometrías de deformación conocidas puede proporcionar un indicio de la influencia de estos parámetros en el desarrollo de la OCP. Sin embargo, en OCP naturales normalmente se desconoce la historia de la deformación, de modo que puede haber sido más compleja de lo que se asume. La orientación cristalográfica preferente se utiliza a menudo para inferir la historia termomecánica de las rocas, debido a que el modelo o patrón que se desarrolla durante la deformación es una función de la geometría de la deformación así como del mecanismo de deformación. La mayoría de los trabajos que se han hecho sobre OCP se han centrado en aquellos minerales con cristalografía sencilla, por ejemplo, con simetría trigonal como el cuarzo y la calcita.

2.5.2. Orientación cristalográfica en plagioclasas

La plagioclasa es, volumétricamente (39%), uno de los minerales más abundantes en la corteza terrestre (Ronov & Yaroshevsky, 1969). En particular, es muy común en rocas metamórficas de alto grado tales como anfibolitas y granulitas, las cuales constituyen principalmente la corteza continental inferior. En tales condiciones de presión y temperatura, la plagioclasa se deforma plásticamente por deslizamiento de dislocaciones y recrystalización dinámica (White, 1975; Vernon, 1975; Mashall & McLaren, 1976; Olsen & Kohlstedt, 1985; Oleson, 1987). Se conoce muy poco sobre el mecanismo de recrystalización dinámica y su influencia en el desarrollo de las fábricas de plagioclasas, a pesar de que esta información es

importante para entender mejor la formación de zonas de cizalla dúctil en la corteza profunda y la anisotropía de la corteza inferior.

El conocimiento de la OCP de las plagioclasas es muy útil porque es el mineral más abundante en muchas rocas metamórficas empobrecidas o carentes de cuarzo o calcita, como es el caso de los metagabros y las anfibolitas (siendo este último el caso que nos ocupa en esta tesis). Pero a pesar de su abundancia, se conoce muy poco acerca de su orientación preferente. A diferencia de otros minerales, la orientación cristalográfica de la plagioclase se ha medido en muy pocas ocasiones y, además, en la mayoría de los casos sólo se ha hecho referencia a las orientaciones de las maclas de Albita o a la de los ejes de la indicatriz óptica. En muy pocos casos se han determinado las orientaciones de otras direcciones cristalográficas que no sean éstas. Esta ausencia de información sobre la OCP de plagioclasas resulta bastante llamativa, aunque la razón no es difícil de entender si tenemos en cuenta que para determinar la OCP con la platina universal se pueden emplear varios días en lugar de varias horas como en el caso de otros minerales.

A diferencia del cuarzo o la calcita, la plagioclase se deforma más o menos como un cuerpo rígido bajo condiciones de facies de esquistos verdes, como cabe esperar a partir de la diferencia entre la temperatura de inicio de la recrystalización dinámica de la plagioclase (500°C) y la del cuarzo (300°C). Por otro lado, las orientaciones preferentes de la plagioclase registran mejor que las del cuarzo o la calcita los eventos deformacionales en condiciones de facies de anfibolitas. Además, proporcionan importante información acerca del comportamiento reológico, así como de los mecanismos de deformación en la corteza (Wenk *et al.* 1986, Ji *et al.* 1988, Benn & Allard 1989).

Sin embargo, nos encontramos, una vez más, con la dificultad de que se conoce muy poco sobre la OCP de estos minerales durante la deformación. Como ya hemos mencionado, los trabajos de OCP en plagioclasas (Wenk *et al.* 1986, Kruhl 1987, Ji & Mainprice, 1988; Benn & Allard 1989) son bastante más escasos que los realizados en otros minerales como el cuarzo, la calcita o el olivino. Esta escasez de datos a la que hemos hecho mención se debe no sólo al proceso tan laborioso de medida con la platina universal, sino también a otros dos factores: (1) su variabilidad química (de $\text{Na}_2\text{AlSi}_3\text{O}_8$ a $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), la cual va acompañada de continuos cambios en los parámetros de la red cristalina, y (2) su simetría triclinica. Ji *et al.* (1994) mencionaron otras dos dificultades. La primera es la dependencia del contenido de anortita en la determinación de la OCP, y la segunda consiste en la dependencia de las secciones elegidas para el análisis óptico. Este último caso queda resuelto mediante la medida de todos los granos maclados en un total de tres secciones ortogonales de una misma muestra.

Dependencia del contenido de anortita en la determinación de la OCP

Debido a que la plagioclase es triclinica, los ejes de la indicatriz óptica no coinciden con los ejes cristalográficos. Por lo tanto, la orientación cristalográfica no puede ser deducida directamente a partir de la medida de los ejes ópticos, sino que debe ser reconstruida a partir de la medida

de éstos y de otros elementos estructurales planares, tales como planos de exfoliación o planos composicionales de maclas, utilizando la platina universal. Tal reconstrucción está basada en las relaciones angulares entre los ejes ópticos y las direcciones y/o planos cristalográficos, que son función del contenido de anortita tal y como puede verse en los estereogramas de Burri *et al.* (1967) (fig.3.7).

Ya que la platina universal no indica si las direcciones de los ejes ópticos medidos son positivas o negativas, hay cuatro posibles orientaciones de estos ejes para cada una de las direcciones y planos cristalográficos de Burri *et al.* (*op.cit.*). Estas cuatro orientaciones están distribuidas simétricamente respecto al eje Y de la indicatriz óptica, pero sola una de ellas es correcta porque es la que mejor se ajusta, o más se aproxima, a una de las curvas de uno de los elementos cristalográficos en cuestión. Este aspecto se explicará con más detalle en el capítulo de Metodología. Según Ji *et al.* (1994), si en una plagioclasa con un contenido de anortita dado más de una orientación coincidiese con una de las curvas de migración, dentro de un margen de error de medida con la platina universal de $\pm 5^\circ$, no podrían determinarse con total seguridad el resto de las direcciones cristalográficas. De igual modo, si una de las cuatro orientaciones ajustase al mismo tiempo a más de una curva, dentro del margen de error especificado, tampoco podría identificarse de forma inequívoca el elemento cristalográfico al que ajusta ni tampoco determinar, por lo tanto, la orientación cristalográfica completa de la plagioclasa. Sin embargo, estas posibilidades de incertidumbre en los ajustes quedan resueltas con el programa informático *PLAG-9* creado a tal efecto, como se explicará más adelante, en el capítulo de metodología (apartado 3.4).

Ji *et al.* (1994) analizaron si con la utilización de la platina universal se podía determinar, de forma inequívoca, la orientación cristalográfica de una plagioclasa cualquiera que fuese su contenido en anortita. Se basaron en los diagramas de Burri *et al.* (1967), pero no consideraron todas las curvas de migración sino tan sólo algunos casos particulares: las curvas de las maclas de Albita-Periclina y las de los planos de exfoliación (010) y (001). Con todo ello, llegaron a las siguientes conclusiones:

- Para determinar de forma inequívoca la orientación cristalográfica completa de un cristal de plagioclasa en los rangos An_{35-70} y An_{85-100} , se requiere el conocimiento de la orientación de un único plano de macla (Albita o Periclina) o de un plano de exfoliación [(010) o (001)], además de las tres direcciones de los ejes ópticos.
- La orientación cristalográfica de plagioclasas con composición An_{75-85} no puede ser determinada de forma inequívoca utilizando uno o dos sistemas de exfoliaciones, porque en este rango composicional es imposible distinguir entre las exfoliaciones (010) y (001) de acuerdo con su orientación relativa con respecto a las tres direcciones ópticas (Jensen & Starkey 1985, Kruhl 1987). Las curvas de migración de Burri *et al.* (1967) para maclas de Albita y Periclina son simétricas con respecto a las direcciones ópticas, haciendo ambigua la determinación de la orientación cristalográfica si se desconoce la identidad de las maclas. Para la identificación de las leyes de macla hay que utilizar otros métodos ópticos independientes.

- Para la determinación de la orientación de la plagioclasa con contenido de anortita inferiores a An_{35} , no es suficiente con la única medida de una exfoliación (010) o de un plano composicional de macla, como el de Albite por ejemplo. Esto se debe a que más de una orientación cristalográfica de entre las cuatro posibles puede ajustar a una de las curvas de migración de Burri *et al.* (1967). Por esta misma razón, la medida de un sistema de exfoliación (001) o la medida de los planos de macla de la Periclina tampoco permite la determinación de la orientación de plagioclasas con An_{15-30} , sino que únicamente permiten la determinación de la orientación cristalográfica de plagioclasas con composición An_{10-25} . Dentro del rango composicional An_{15-30} no se puede determinar la OCP completa de las plagioclasas de forma inequívoca aunque se conozca la orientación de dos sistemas de planos de macla o dos sistemas de exfoliación y se haya medido, además, la orientación de la indicatriz óptica.

Todo esto, junto con la escasa presencia de maclas en plagioclasas de composición albite y oligoclasa, explica el porqué algunos autores (Shelley, 1977, 1979, 1989; Ji & Mainprice, 1988; White, 1990; Kruhl 1993) tuvieron que utilizar la orientación de la indicatriz óptica para inferir, indirectamente, la orientación cristalográfica de estas plagioclasas. Todas estas incertidumbres quedan también resueltas con la aproximación utilizada con el programa *PLAG-9*.

Dependencia de la orientación de las láminas delgadas en la determinación de la OCP

Este segundo problema se deriva del hecho de que para la determinación de la OCP sólo se pueden utilizar granos maclados. Debido a que el grado de rotación posible de la platina universal se encuentra limitado a 45° , es imposible medir la orientación de planos de maclas que forman ángulos inferiores a 45° respecto a la sección delgada. Las secciones son generalmente cortadas paralelamente a los planos XZ, XY y ZY, donde X es el eje largo del elipsoide de la deformación finita y corresponde aproximadamente a la lineación de estiramiento, Z es el eje corto del elipsoide de deformación finita, que resulta ser aproximadamente normal a la foliación, e Y es normal a los otros dos ejes y, por tanto, perpendicular a la lineación y paralelo a la foliación. Estas equivalencias son admisibles para rocas con deformación moderada o intensa, como las estudiadas en esta tesis en donde las fábricas pueden ser consideradas como “pasivas”, en el sentido de Passchier & Trouw (1996). El número de granos medidos en una sección dada depende del grado de orientación preferente. Así, por ejemplo, si los planos (010) estuviesen fuertemente orientados paralela o subparalelamente a la foliación (plano XY), sería esperable encontrar una alta frecuencia de planos (010) visibles en la sección XZ. Si la frecuencia de granos maclados en una sección dada es mayor al 90%, la medida de la OCP puede ser considerada representativa de la fábrica total de la muestra (Ji *et al.* 1994). Sin embargo, en muchos casos la fracción de granos medidos en cualquiera de las secciones dadas es menor al 90% y, por lo tanto, la medida de la

OCP en cada sección no es representativa de la roca total. Para resolver esta dificultad, Kruhl (1987a) propuso sumar todas las medidas realizadas en tres secciones ortogonales. Este método ha sido aplicado al estudio de las plagioclasas por numerosos autores (Kruhl 1987a, b; Benn & Allard, 1989, Siegesmund & Kruhl, 1991; Barruol, 1993; Seront *et al.* 1993).

Algunos autores (Wenk *et al.* 1986, Ji & Mainprice, 1988; Benn & Allard, 1989; Ague *et al.* 1990) utilizaron, para la medida de la OCP de las plagioclasas, solamente aquellos granos que presentaban dos sistemas de exfoliación [(010) y (001)] o dos planos de macla (Albita y Periclina). Sin embargo, la medida de la OCP por este método representa selectivamente una parte de la fábrica de la roca y no necesariamente la fábrica total. Para medir la OCP en plagioclasas de una manera correcta, Ji *et al.* (1994) propusieron la utilización de dos de las tres secciones ortogonales y así economizar tiempo respecto al método de Kruhl que utilizaba las tres secciones. La razón es que los granos que están desfavorablemente orientados en una sección dada podrán ser medidos en cualquiera de las otras dos secciones. Sin embargo, Kruhl (1987a) demostró que la utilización de dos secciones deja regiones de la muestra sin investigar, introduciendo un sesgo en las determinaciones de OCP.

2.5.3. Tipos de OCP en plagioclasas y sentido de cizalla inferido por la OCP

Este aspecto será abordado con mayor profundidad en el capítulo de discusión. Los principales tipos de OCP en plagioclasas son aún poco conocidos y se resumirán en la discusión.

A veces se observa una OCP más uniforme con el incremento de la deformación, lo cual, a priori, puede resultar inesperado. Una baja intensidad de la fábrica, asociada a un incremento de temperatura y deformación, puede ser el resultado de procesos de deformación en los que la plasticidad intracristalina juega un papel secundario y está en consonancia con que el principal mecanismo de deformación consista en deslizamiento a lo largo de límites de grano (Edington, 1976; Padmanabhan & Davies, 1980).

La oblicuidad entre la orientación cristalográfica preferente y el marco estructural definido por la orientación de minerales (lineación de estiramiento y foliación), es un indicador fiable del sentido de cizalla para minerales tales como el olivino, el cuarzo y la calcita (Bouchez *et al.* 1983). En agregados policristalinos, donde los granos se deforman debido a la actividad dominante de un único sistema de deslizamiento, la asimetría de la fábrica resulta de la alineación de los planos y direcciones de deslizamiento con el plano y la dirección de cizalla, respectivamente. Por lo tanto, las asimetrías de las fábricas se han aplicado a la determinación del sentido de cizalla en los estudios cinemáticos de rocas enriquecidas en olivino (Nicolas *et al.* 1973), cuarzo (Bouchez & Pécher, 1981) y calcita (Schmid *et al.* 1981).

Como sabemos, la plagioclasea es un constituyente principal en las rocas de la corteza superior e inferior, en particular en las rocas metamórficas de alto grado, las cuales carecen en muchos casos de los indicadores cinemáticos más usuales como los proporcionados por el cuarzo y la calcita. Bajo estas condiciones de alto grado, la plagioclasea se comporta dúctilmente y su OCP podría proporcionar información relevante acerca del sentido de cizalla, siempre y

cuando seamos capaces de comprender su comportamiento plástico (sistemas de deslizamiento y maclado). Además, el conocimiento de la OCP permite inferir los sistemas de deslizamiento dominantes si se asume que la fábrica se formó por deslizamiento intracristalino (Bouchez *et al.* 1983). Este conocimiento de la OCP, junto con los estudios microestructurales, haría posible que pudiéramos entender mejor su deformación plástica y supondría una gran contribución a un mejor conocimiento de la anisotropía de la corteza inferior. Además, ha sido establecido que la reología de la corteza podría ser considerada muy similar a la reología de los feldespatos (Tullis, 1979), aunque su importancia ha sido limitada por Rosenberg & Stünitz (2003). Consecuentemente, una información detallada sobre las propiedades deformacionales y los micromecanismos de flujo y características de los feldespatos es necesario para un mejor entendimiento de la deformación cortical, de ahí el enorme interés de estos minerales.

2.5.4. Sistemas de deslizamiento activos en plagioclasas

El conocimiento tan vago que se tiene de la deformación plástica de las plagioclasas, es decir, de sus sistemas de deslizamiento y de sus leyes de flujo, se debe al enorme desconocimiento que hoy en día se sigue teniendo sobre la OCP de este mineral.

En cuanto a la estructura de los feldespatos, las uniones más fuertes son las del tipo Al-O y los tetraedros Si-O ó las uniones T-O. Los planos de deslizamiento más sencillos serán aquellos que intersecten el menor número de uniones T-O por unidad de área. Usando este criterio, los planos de deslizamiento más sencillo serían: (010) con dos uniones T-O por unidad de celda, seguido por (001), (110), ($\bar{1}\bar{1}0$) y ($10\bar{1}$) con cuatro uniones cada uno y, finalmente, (100) y (111) con seis uniones (Tullis, 1983; Gandais & Willaime, 1984).

Varios estudios han vinculado los modelos de las orientaciones cristalográficas preferentes (OCP) con la operatividad de ciertos sistemas de deslizamiento específicos. En el cuarzo, por ejemplo, el deslizamiento basal es el sistema de deslizamiento dominante a baja temperatura. En el caso de cizalla pura este sistema de deslizamiento produce un máximo de ejes *c* perpendicular al plano de aplastamiento (Schmid, 1994), mientras que en el caso de cizalla simple ese máximo es asimétrico y se sitúa inclinado respecto al plano de cizalla (Dell'Angelo & Tullis, 1989). En condiciones de deformación a más alta temperatura y baja tasa de deformación, estos máximos se localizan como pequeños círculos alrededor de los ejes de compresión (Tullis *et al.* 1973).

Los sistemas de deslizamiento pueden ser identificados mediante la observación de los defectos cristalinos con el microscopio de transmisión de electrones TEM (Blacic & Christie, 1984; Hobbs, 1985). En líneas generales, la modelización teórica y numérica del desarrollo de fábricas, utilizando sistemas de deslizamiento preseleccionados, ha tenido bastante éxito (Etchecopar, 1977; Lister, 1977; Lister & Price, 1978; Lister *et al.* 1978; Lister & Paterson, 1979; Lister & Hobbs, 1980; Etchecopar & Vasseur, 1987; Jesell, 1988), pero hay que tener en cuenta que los estudios teóricos parten de premisas que pueden no ser correctas y requieren simplificaciones para llevar a cabo los cálculos. Además, sólo se han simulado agregados

monominerálicos, mientras que la mayoría de fábricas de interés suelen ser poliminerálicas. El mayor éxito, pero posiblemente también la aproximación más laboriosa al desarrollo de la OCP, es el obtenido mediante la deformación experimental de rocas a altas presiones y temperaturas, en combinación con los análisis de los defectos cristalinos observados mediante el TEM (Green *et al.* 1970; Tullis *et al.* 1973; Dell'Angelo & Tullis, 1989). No se puede asumir que la operatividad de un sistema de deslizamiento signifique necesariamente que éste sea el mecanismo causante de una OCP (Shelley, 1986; Olsen & Kohlstedt, 1986). Sin embargo, los defectos cristalinos en rocas deformadas de manera natural se pueden formar con posterioridad al desarrollo de la OCP (White, 1979; Ord & Christie, 1984). A pesar de todo, la explicación de fábricas de feldespatos en rocas metamorizadas regionalmente, a menudo sólo se basan en esta presunción.

El plano de deslizamiento más comúnmente observado en plagioclasas deformadas experimental y naturalmente es (010) (Borg & Heard, 1970; Marshall & McLaren, 1977a; Montardi & Mainprice, 1987; Olsen & Kohlstedt, 1984; Kruse, 1998; Kruse & Stünitz, 1999). En cuanto a las direcciones de deslizamiento, [100] es poco usual y [001] es la más frecuente, aunque esta última ha sido inferida únicamente por algunos autores (Kruhl, 1987a, b; Kruse *et al.* 1992). El deslizamiento según (010)[001] parece actuar de manera dominante en condiciones metamórficas de grado medio-alto (Borg & Heard, 1970), aunque también parece actuar, de manera subordinada, el sistema de deslizamiento (010)[100] (Montardi & Mainprice, 1987; Ji & Mainprice, 1988; Ullemeyer *et al.* 1994). Este último parece ser más importante bajo condiciones de alta temperatura (Kruhl, 1987a).

Se conoce relativamente muy poco acerca de la actividad relativa de los diferentes sistemas de deslizamiento en plagioclasas con la deformación. Hay muy pocos trabajos publicados sobre plagioclasas, y los que hay se basan en una amplia variedad composicional de la plagioclase y de la roca total, así como en un amplio rango de condiciones metamórficas y de deformación. En la actualidad, no hay hipótesis empíricas consistentes para la interpretación de las OCP en plagioclasas, y se desconoce si existen intentos de modelizar numéricamente el desarrollo de dichas OCP. El conocimiento de la OCP permite inferir los posibles sistemas de deslizamiento dominantes, siempre y cuando se asuma que la fábrica se deformó por deslizamiento intracristalino (Bouchez *et al.* 1983). Pero en el caso de las plagioclasas no se puede inferir directamente la OCP a partir de sólo medidas de la indicatriz óptica como ya se ha indicado. Tales medidas no sólo son muy laboriosas con la platina universal, como ya se verá a lo largo de este trabajo, sino que además se requiere que haya maclas o planos de exfoliación presentes en un número suficiente de granos para hacer que las medidas sean estadísticamente significativas.

Como apuntó Shelley (1986), se pueden considerar varios mecanismos de orientación para explicar un posible desarrollo de la orientación cristalográfica preferente en las plagioclasas. Además, bajo condiciones metamórficas de alta temperatura, es decir, facies de anfibolitas-granulitas, la ductilidad es mucho mayor y, consecuentemente, el deslizamiento intracristalino es un mecanismo potencialmente importante (Olsen & Kohlstedt, 1984, 1986; Ji

& Mainprice, 1988, 1990). Olsen & Kohlstedt (1984) y Montardi & Mainprice (1987) encontraron que el sistema de deslizamiento que predomina en las andesinas y labradoritas deformadas de manera natural es también (010)[001]. Además, Montardi & Mainprice (*op.cit.*) encontraron muchas dislocaciones con dirección de deslizamiento según [100] en plagioclasas cálcicas (An_{68-70}) en facies de anfibolita retrometamórfica (Musgrave Range, Australia). Otros autores como Ague & Wenk (1990) observaron también abundantes dislocaciones en las direcciones [001] y [110] en plagioclasas de composición intermedia (An_{25-42}) deformadas intensamente a altas temperaturas (facies de granulitas). Olsen & Kohlstedt (1984), por su parte, encontraron gran número de dislocaciones con direcciones de deslizamiento según [110] y $[1\bar{1}0]$, que fueron catalogadas como secundarias por localizarse en subgranos. Estos autores sugirieron que a altas temperaturas se deben tener en cuenta la escalada y el deslizamiento de dislocaciones en los feldespatos. Es probable que a altas temperaturas se activen los sistemas de deslizamiento $(001)\frac{1}{2}[110]$ y (010)[001], al igual que en la sanidina deformada experimentalmente por Scandale *et al.* (1983), de modo que conforme decrece la temperatura, el sistema (010)[001] llega a ser el dominante. Ya que la deformación plástica en los feldespatos está dominada por el marco estructural Al-Si, cabría esperar similares sistemas de deslizamientos en feldespatos alcalinos y plagioclasas (Gandais & Willaime, 1984; Ague & Wenk, 1990).

Según los estudios realizados por Heidelberg *et al.* (2000) en agregados cizallados de albita pura (Ab_{98}) deformada experimentalmente por *creep* de dislocaciones (*dislocation creep*), bajo condiciones de presión y temperatura correspondientes a la parte superior de las facies de los esquistos verdes y a la parte media de las facies de las anfibolitas (900°C, 15Kbar, 10^{-5} a $10^{-6}s^{-1}$), el sistema de deslizamiento dominante es (001)[100]. Estos mismos autores identificaron también este mismo sistema de deslizamiento en muestras de baja temperatura, a pesar de no ser la plagioclase la única fase existente y ser, además, composicionalmente más anortítica. Otros autores como Kruhl (1987a) y Siegesmund *et al.* (1994) observaron que, para plagioclasas en rocas de facies anfibolita-granulita, los planos (001) eran subparalelos a la foliación y las direcciones [100] eran subparalelas a la lineación. Kruhl (1987a, b) sugirió que el sistema de deslizamiento (001)[100] es más activo en rocas de mayor grado metamórfico y/o mayor contenido en anortita, aunque esto no resulta consistente con los resultados experimentales obtenidos por Heidelberg *et al.* (2000), quienes observaron este mismo sistema de deslizamiento para bajas temperaturas. Por otro lado, el sistema de deslizamiento (010)[001] ha sido inferido como común en plagioclasas deformadas naturalmente (Ji *et al.* 1988; Ji & Mainprice, 1990; Kruhl, 1987a, b; Kruse & Stünitz, 1999; Olsen & Kohlstedt, 1984, 1985), aunque para Heidelberg *et al.* (2000) este sistema no parece haber jugado un papel importante durante la deformación plástica.

Varios estudios han puesto de manifiesto que los sistemas (001)[100] y (010)[001] se activan simultáneamente. Kruhl (1987a, b) infirió que ambos sistemas de deslizamiento eran activos en plagioclasas de rocas de facies esquistos verdes-anfibolita, cerca de la línea Insúbrica (Alpes Occidentales). Fitz Gerald *et al.* (1983) utilizaron el TEM para estudiar la albita deformada naturalmente bajo condiciones de grado metamórfico de esquistos azules, y

encontraron que dominaba el sistema de deslizamiento en los planos (010) y (001). En las plagioclasas, el plano (010) tiende a disponerse en posición paralela a la foliación y [001] a la lineación en condiciones metamórficas de grado medio-alto (Olsen & Kohlstedt, 1985; Montardi & Mainprice, 1987; Ji & Mainprice, 1988; Mainprice & Nicolas, 1989; Dornbusch *et al.* 1994). Sin embargo, bajo condiciones de grado metamórfico muy alto, [100] tiende a ser paralelo a la lineación (Kruhl, 1987a; Dornbusch *et al.*, 1994). En zonas de cizalla, el polo de (010) tiende a mostrar asimetría externa con respecto a la fábrica de la roca que contiene a las plagioclasas deformadas. Este criterio puede ser usado para determinar el sentido de cizalla de manera similar a como se utiliza en el caso de los ejes *c* del cuarzo.

Se han determinado varios sistemas de deslizamiento a partir de plagioclasas deformadas experimentalmente. Marshall y McLaren (1977a,b) determinaron que el deslizamiento dominante en cristales sencillos de albita orientada con la dirección de compresión bisectando al ángulo agudo entre (010) y (001) y deformada a 800°C, 1 GPa y 10^{-5} s^{-1} (es decir, régimen 1 de *creep* de dislocaciones) era según (101̄). Por el contrario, Heidelberg *et al.* (2000) estudiaron en agregados de albita recristalizada, encontrando que los sistemas de deslizamiento aprovechaban el plano (001). Ji & Mainprice (1988) han estudiado los posibles sistemas de deslizamiento en plagioclasas de composición An_{0-80} , a partir de rocas de alto grado procedentes de muy diferentes ambientes tectonometamórficos (Tabla II.1).

TABLA II.1. Descripción de las muestras estudiadas por Ji & Mainprice (1988). Presentan una fábrica óptica bastante intensa y, a pesar del amplio rango de ambientes geológicos, todas ellas presentan grandes similitudes.

Localización	Composición	Ambiente geológico	Condiciones de deformación
Río Haast (Nueva Zelanda)	$\text{An}_{0.5}$	Metamorfismo regional	Facies anfíbolita
Isla Zabargad (Mar Rojo)	An_{25-45}	Manto diapírico Metamorfismo de contacto	750-950°C 1 GPa
Banco de Gorringe (SO Portugal)	An_{32-40}	Falla transformante	600-700°C 300-400 MPa
Manto Jotun (Noruega)	An_{40-50}	Zonas de cizalla dúctil	600°C P ?
Finero (Alpes meridionales, Italia)	An_{50}	Tectonita de colisión	900°C 1 GPa
Aut.-Allier (Macizo Central, Francia)	An_{80}	Metamorfismo regional	Facies anfíbolita

Ji & Mainprice (1988) observaron a través del TEM una mayor densidad de dislocaciones en el plano (010) y que las microestructuras de todas las muestras presentaban abundantes dislocaciones de tipo helicoidal (*screw dislocation*) según la dirección [001], con

una menor densidad según [100]. Esto está de acuerdo con un sistema de deslizamiento dominante (010)[001] y otro secundario (010)[100], siendo ambos responsables de la OCP de las plagioclasas. A pesar de todos los intentos realizados por Ji & Mainprice (*op.cit.*) para la identificación de sistemas de deslizamiento en plagioclasas, bajo muy diversas condiciones composicionales y tectonometamórficas, Kruhl (1989) discrepó de los resultados obtenidos ya que sólo utilizaron la orientación de la indicatriz óptica en sus cálculos, cuando lo que realmente interesa es la orientación de otros planos y direcciones de la red cristalina para entender los mecanismos de deformación de la plagioclase. Y excepto para plagioclasas de composición An_{20} , los ejes de la indicatriz óptica se desvían de los ejes cristalográficos. Otros inconvenientes que plantea son los siguientes:

- Trabajos previos de Ji & Mainprice parecen haber demostrado que para plagioclasas con composición $An_{<50}$, la relación entre los ejes de la indicatriz óptica y los ejes cristalográficos son: $\alpha \wedge [100] \approx 17^\circ$, $\beta \wedge \perp(001) \approx 32^\circ$ y $\gamma \wedge \perp(010) \approx 24^\circ$. Kruhl (1989) no comparte esta idea de que α , β y γ se sitúen próximos a [100], [001] y $\perp(010)$, respectivamente, y menos para este porcentaje de anortita. Además, Ji & Mainprice obtuvieron la mayoría de sus medidas en plagioclasas de composición $\leq An_{40}$.
- Ji & Mainprice (1988) calcularon las orientaciones preferentes con tan sólo 40 medidas, y Kruhl se plantea hasta qué punto este número tan bajo es significativo desde el punto de vista estadístico, aunque no llega a proponer ningún número en concreto.
- Kruhl (1989) también critica el hecho de que las medidas las han realizado en dos de las tres secciones posibles, con lo que los diagramas mostrarían un claro efecto de selección, dejando a un lado muchos granos susceptibles de ser medidos. Además, Kruhl (*op.cit.*) propone que no debe asumirse que el comportamiento deformacional de las plagioclasas esté siempre influenciado por los sistemas de deslizamiento que en este mineral pueden llegar a desarrollarse.

Teniendo en cuenta todo lo comentado en este apartado sobre el estado actual de conocimientos de los sistemas de deslizamiento en plagioclasas, y como colofón, discutiremos en el capítulo de Discusión todo lo referente a los sistemas inferidos, en nuestro caso, en las muestras de Almonaster la Real y Veredas.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1. TRABAJO DE CAMPO

La zona de estudio se localiza en el SO de España, en la parte N de la provincia de Huelva y dentro de la Reserva Natural de Sierra de Aracena y Picos de Aroche. Este parque natural comprende, de forma parcial, las hojas 916 (Aroche) y 917 (Aracena) del mapa topográfico de España a escala 1:50.000. El trabajo en campo de las metabasitas de Acebuches se ha centrado en la hoja 917, concretamente en las hojas parciales 1-3 y 1-4 a escala 1:10.000 del *Centro de Estudios Territoriales y Urbanos de la Consejería de Obras Públicas y Transportes* de la Junta de Andalucía (fig.3.1). En la primera de ellas se sitúa Veredas y en la otra Almonaster la Real.

La utilización en este trabajo de una escala de tanto detalle ha sido imprescindible ante la necesidad de realizar una cartografía que permitiese definir con claridad las complejas estructuras del dominio oceánico y la localización, lo más exacta posible, de las muestras de los dos cortes geológicos seleccionados para este estudio, que se sitúan en el pueblo de Almonaster la Real (en el camino de subida al Cerro San Cristóbal) y en la aldea de Veredas, situada al Oeste de Almonaster. La complejidad estructural de la zona y la escasa anchura del afloramiento de la metabasitas de Acebuches (aproximadamente 1 km en su parte más ancha), justifican el detalle de la escala cartográfica utilizada.

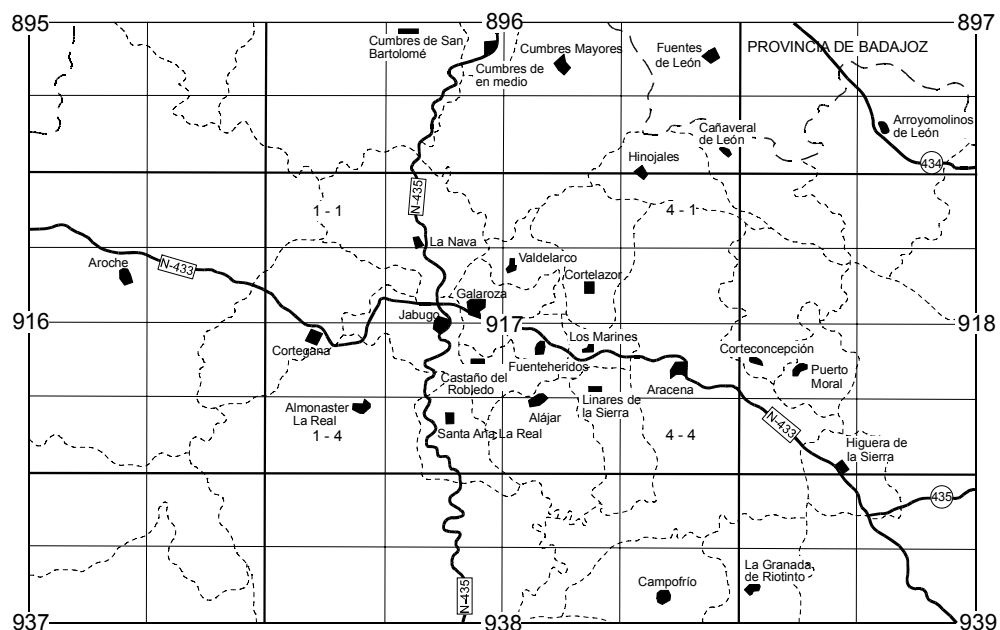


Fig.3.1. Localización geográfica del área de estudio. Ocupa las hojas parciales 1-3 y 1-4 de la hoja 917 de Aracena.

Durante la realización de este trabajo se han tomado un total de 25 muestras, todas ellas orientadas. Se tomaron 18 en Almonaster la Real, en el camino de subida al Cerro San Cristóbal, y las otras 7 en las cercanías de la aldea de Veredas (ver la localización en la fig.3.2 y en la Tabla III.1). Hemos realizado un exhaustivo análisis microestructural, al que haremos referencia en el apartado 4.1 (capítulo de resultados), según el cual hemos decidido estudiar sólo 12 de las 25 muestras: siete corresponden al corte de Almonaster la Real (muestras B.0601-2, B.0601-4, B.0601-7, B.0601-11, B.0601-15 y B.0601-16) y cinco al de Veredas (muestras B.0602-1 a B.0602-5)¹. Las razones para tal elección han sido varias:

- Las muestras situadas a muro de la serie de las metabasitas (muestras 17 y 18 de Almonaster la Real y muestra 6 de Veredas) se encuentran afectadas por la zona de cizalla Suribérica (ZCS), hasta tal punto que se encuentran muy deformadas, alteradas y presentan un tamaño de grano muy reducido. Todo ello ha impedido el reconocimiento al microscopio de granos de plagioclasa maclados en los que pudieran medirse la orientación cristalográfica con la platina universal.
- El gran número de muestras tomadas en Almonaster la Real (18 en total) abarcan sectores de la lámina anfibolítica que son equivalentes desde un punto de vista litológico debido a la repetición de los distintos litotipos de las metabasitas por efecto de los múltiples cabalgamientos que las afectan. Por ello se decidió hacer una selección de un conjunto de siete muestras que fueran representativas de todo el corte. Para ello, se escogieron dos muestras situadas hacia techo de la serie, aunque no afectadas por la zona de cizalla Norte (muestras 2 y 4, anfibolitas bandeadas con clinopiroxeno), otra muestra de la parte media de la serie (muestras 7, anfibolita bandeada sin clinopiroxeno) y, finalmente, cuatro muestras más (muestras 11, 14, 15 y 16, anfibolitas cizalladas, situadas a muro de la pila de anfibolitas y afectadas por la zona de cizalla Suribérica. La zona de cizalla Norte (ZCN) es una cizalla delgada (4-5 m de espesor medio), de deformación muy heterogénea y caracterizada por una intensa milonitización de las anfibolitas de grano grueso. Debido a estas características hemos intentado evitarla durante el muestreo. Lo que hemos analizado es la deformación asociada al episodio de alta temperatura que afectó, con mayor intensidad, a la mitad superior de las anfibolitas. Esto es lo que hemos pretendido estudiando las muestras 2, 4 y 7.
- Además, en la elección de las muestras del corte de Almonaster la Real, se tomó en cuenta aquellas muestras para las que contábamos con una referencia de la temperatura de deformación (evento metamórfico M_1 definido por Díaz Azpiroz, 2001). Las temperaturas calculadas por este autor fueron obtenidas utilizando el geotermómetro Hb-Pl de Holland & Blundy (1994) y quedan resumidas en la Tabla III.2 y representadas en la fig.3.3.

¹ A partir de ahora, mencionaremos las muestras por su número y omitiremos la clave para mayor comodidad.

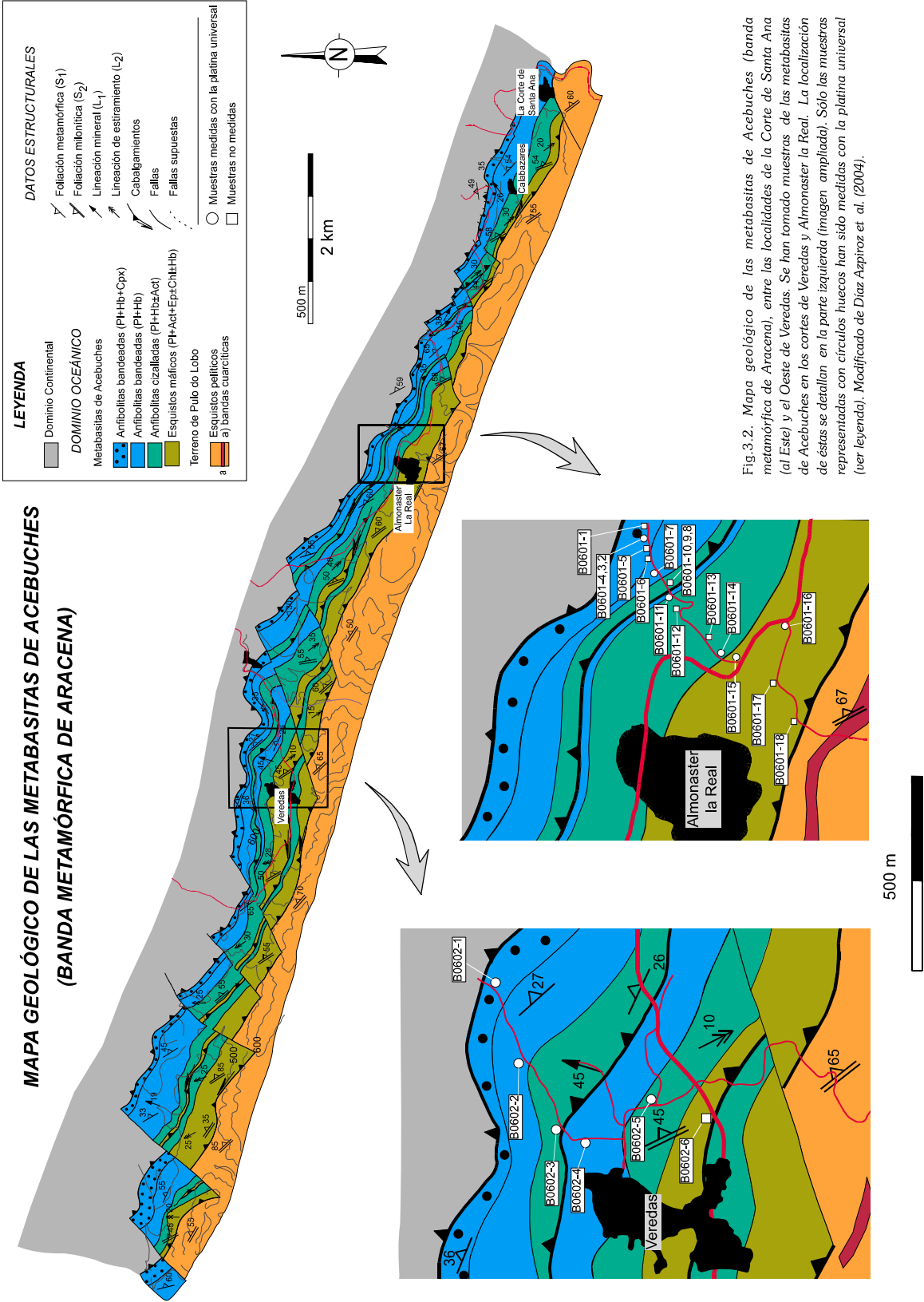


TABLA III.1. Situación de las muestras de Almonaster la Real y Veredas, tanto en coordenadas U.T.M. (Unit Transversa Mercator) en el Huso 29N, como en coordenadas geográficas (latitud y longitud). Ver fig.1.1 para ver la localización geográfica donde han sido tomadas las muestras (camino marcado en trazo rojo) y la fig.3.2 para la localización geológica de las mismas.

Coordenadas de las muestras de Almonaster La Real				
Muestras	UTM (HUSO 29N)		Geográficas	
	X	Y	Longitud	Latitud
B.0601-1	695405	4194328	6°O 46' 42"	37°N 52' 29"
B.0601-2, 3, 4	695375	4194323	6°O 46' 43"	37°N 52' 29"
B.0601-5	695346	4194317	6°O 46' 44"	37°N 52' 29"
B.0601-6	695323	4194310	6°O 46' 45"	37°N 52' 29"
B.0601-7	695289	4194292	6°O 46' 46"	37°N 52' 28"
B.0601-8, 9, 10	695270	4194260	6°O 46' 47"	37°N 52' 27"
B.0601-11	695232	4194252	6°O 46' 49"	37°N 52' 27"
B.0601-12	695200	4194229	6°O 46' 50"	37°N 52' 26"
B.0601-13	695138	4194154	6°O 46' 53"	37°N 52' 24"
B.0601-14	695103	4194119	6°O 46' 46"	37°N 52' 23"
B.0601-15	695094	4194076	6°O 46' 55"	37°N 52' 21"
B.0601-16	695183	4193959	6°O 46' 51"	37°N 52' 17"
B.0601-17	695042	4193975	6°O 46' 57"	37°N 52' 18"
B.0601-18	694947	4193917	6°O 47' 01"	37°N 52' 16"

Coordenadas de las muestras de Veredas				
Muestras	UTM (HUSO 29N)		Geográficas	
	X	Y	Longitud	Latitud
B.0602-1	691526	4195932	6°O 49' 19"	37°N 53' 24"
B.0602-2	691328	4195858	6°O 49' 27"	37°N 53' 22"
B.0602-3	691145	4195756	6°O 49' 35"	37°N 53' 19"
B.0602-4	691112	4195692	6°O 49' 36"	37°N 53' 17"
B.0602-5	691216	4195530	6°O 49' 32"	37°N 53' 11"
B.0602-6	691185	4195389	6°O 49' 33"	37°N 53' 07"

TABLA III.2. Tabla con las claves de las muestras de Almonaster la Real utilizadas por Díaz Azpiroz (2001) y por nosotros en este trabajo, así como la equivalencia entre ellas. La distancia hace referencia al techo de la lámina de las anfibolitas. Las muestras en negrita son las que se han medido con la platina universal. La temperatura ha sido calculada por Díaz Azpiroz (2001) utilizando el geotermómetro Hb-Pl de Holland & Blundy (1994) asumiendo una presión de 4 Kbar.

Muestras Díaz Azpiroz (2001)	Muestras Este trabajo (2004)	Dist. (m)	T(°C) 4 Kbar
893 22	B.0601- 1		
893 24	B.0601- 2	31	790
893 25	B.0601- 3	44	852
893 26	B.0601- 4	59	826
893 27	B.0601- 5	66	793
893 28		72	779
893 30	B.0601 -6	112	781
893 31	B.0601- 7	156	727
893 32	B.0601- 8	166	692
893 34	B.0601- 9	197	727
893 35	B.0601-10		
893 36	B.0601-11	209	
893 37	B.0601-12		
893 39	B.0601-13	286	746
	B.0601-14	352	
893 40	B.0601-15	391	699
893 41	B.0601-16	453	
	B.0601-17		
	B.0601-18		

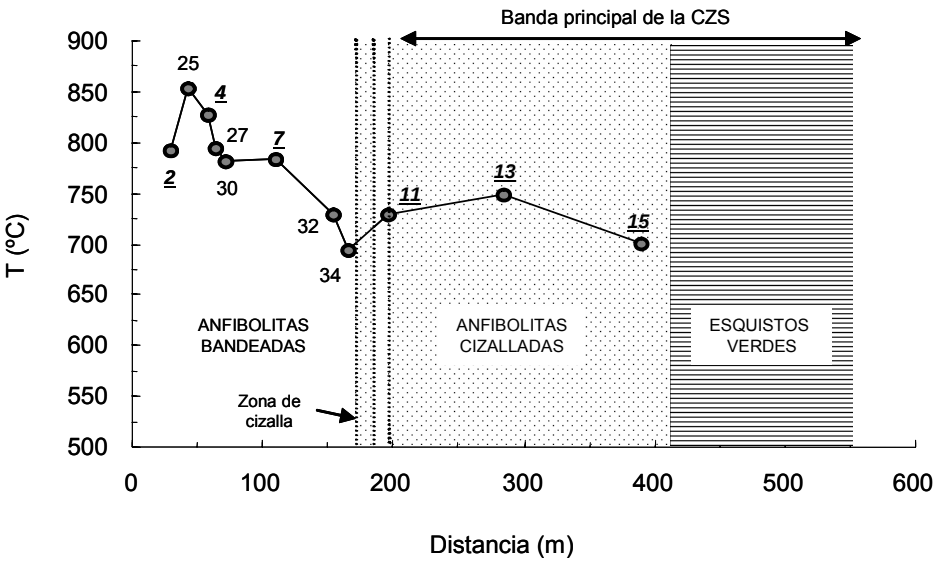


Fig.3.3. Representación de las muestras de Almonaster la Real en un perfil de temperatura metamórfica frente a la distancia al techo de la serie de las metabasitas. Únicamente se han representado las muestras de las que se tiene una estimación de la temperatura (ver Tabla III.1). Para abreviar, en el caso de las muestras de Díaz Azpiroz (2001) se ha empleado como número de muestra los dos últimos dígitos de las claves empleadas en la mencionada tabla. En nuestro caso, hemos hecho igual (obviando la referencia B.0601). Las muestras subrayadas en negrita son las de este trabajo, las otras son las de Díaz Azpiroz (2001). Las líneas verticales discontinuas limitan zonas de cizalla dentro de la serie de las metabasitas de Acebuches.

- En el caso del corte de Veredas, se hizo la elección de acuerdo con la experiencia adquirida con las muestras ya estudiadas en el corte de Almonaster la Real. En todas ellas se pudo medir la orientación de las plagioclasas, con excepción de la muestra 6, situada en un sector de intensa deformación de la zona de cizalla Suribérica. En este último caso, al igual que ocurrió con las muestras 17 y 18 de Almonaster la Real, el elevado grado de alteración y el reducido tamaño de grano hicieron imposible la medición de la orientación cristalográfica con la platina universal. Ver Tabla III.3.

Tabla III.3. Distancia al techo de la lámina anfibolítica de las muestras tomadas en el corte de Veredas. Aquellas que aparecen sombreadas son las que se han utilizado para medir la orientación cristalográfica preferente de las plagioclasas con la platina universal (ver texto). Las temperaturas del metamorfismo fueron calculadas por Díaz Azpiroz (2001) con el geotermómetro Hb-Pl de Holland & Blundy (1994).

Muestras Veredas	Distancia (m)	T (°C) 4 Kbar
B.0602-1	3	827
B.0602-2		
B.0602-3	255	731
B.0602-4		
B.0602-5		
B.0602-6		

La muestra 1 fue tomada en las anfibolitas bandeadas con clinopiroxeno, mientras que las muestras 2 y 4 pertenecen a las anfibolitas bandeadas sin clinopiroxeno. La muestra 3 corresponde a anfibolitas cizalladas. El hecho de que la muestra 3 se sitúe estructuralmente por encima de la muestra 4 (anfibolitas bandeadas), se debe a la presencia de una escama de la zona de cizalla Suribérica que afecta, en Veredas, a la parte media de la lámina de las metabasitas (fig.3.2). Por debajo de esta escama vuelven a aflorar las anfibolitas no cizalladas.

3.2. PREPARACIÓN DE SECCIONES ORIENTADAS

Como ya se ha indicado, el trabajo de campo iba encaminado a la realización de un estudio sistemático de la orientación cristalográfica preferente (OCP) de las plagioclasas en las metabasitas de Acebuches, en dos cortes geológicos levantados en las localidades de Almonaster la Real y Veredas (al norte de la provincia de Huelva). Todas las muestras se han tomado orientadas en el campo. De cada una de ellas se han cortado tres láminas según tres secciones perpendiculares, de manera que se ha llevado a cabo, en cada una de las tres secciones de cada muestra, la medida sistemática de la OCP. Esto es lo que recomienda Kruhl (1987a) en contraposición a otros autores como Ji *et al.* (1994) y Schulmann *et al.* (1996), los cuales consideran que sólo dos secciones son suficientes. Más adelante se discutirán ambas propuestas y se justificará la elección tomada en este trabajo.

Las secciones fueron cortadas paralelamente a los planos XZ, XY y ZY del elipsoide de deformación finita de acuerdo con el siguiente criterio: la foliación se asume paralela al plano XY, siendo X la dirección coincidente con la lineación de estiramiento, Y la normal a la lineación dentro del plano de foliación y Z la normal a la foliación. Este supuesto es aproximadamente válido para rocas con deformación moderada a fuerte, como las estudiadas en este trabajo (Ramsay & Huber, 1983). Para el estudio de la OCP en plagioclasas, hemos seleccionamos un área de 20 mm² en cada sección delgada y hemos procedido a medir un máximo de 100 granos por cada lámina, con un tamaño de grano medio superior a 30 µm. Los granos inferiores a 30 µm resultaban demasiado pequeños para ser medidos con la platina universal, de ahí que nos viéramos obligados a prescindir de ellos.

Las muestras se referencian con la sigla “B.” seguida del mes (mm) y año (aa) en el que fueron tomadas en el campo y, finalmente, el número de la muestra (n), es decir, de la siguiente manera: “B.mmaa-n” (por ejemplo, B.0601-1 es la muestra número 1 tomada en el campo en junio de 2001). Además, para el trabajo con la platina universal hemos diferenciado cada una de las láminas de las muestras añadiéndoles las letras A, B ó C. La lámina A es siempre paralela al plano de foliación principal (plano XY) y las otras dos, siempre perpendiculares a la foliación, se orientan de la siguiente manera:

- En los casos donde ha sido posible confirmar la existencia de lineación, gracias a la orientación preferente de los ejes largos de los cristales de plagioclasa y/o de anfíbol observados en los cortes paralelos a la superficie de la foliación, se han realizado dos cortes: uno paralelo a la

dirección de la lineación (plano XZ) y el otro perpendicular a éste (plano YZ, láminas B y C respectivamente). En la mayor parte de los casos, las muestras con una lineación patente corresponden a las metabasitas afectadas por la segunda fase de deformación (zona de cizalla Suribérica).

- Cuando no se observa la lineación, un corte es paralelo a la dirección de la foliación (lámina C) y el otro perpendicular al primero, es decir, según el buzamiento (lámina B). Esto es debido al alto cabeceo que suele presentar la lineación L_1 en las zonas de mayor grado metamórfico (fig.3.4 y 3.5) en las que la lineación es raramente visible en el afloramiento pero sí en laboratorio. Este es el caso de la muestra 1 del corte de Veredas (fig.3.5) en donde se puede apreciar claramente la orientación de la lineación, marcada con una línea gruesa discontinua sobre el plano de la foliación. Se trata de una anfibolita bandeadada de tamaño de grano medio-grueso, no afectada por la zona de cizalla Norte (ZCN), y con orientación N112°E/ 27°SO. Precisamente en esta muestra, se supone que la foliación es cercana al plano XY del elipsoide de deformación finita y que el corte paralelo a la dirección de la foliación es cercano al plano YZ de dicho elipsoide. En otros casos, la incertidumbre en la localización de la lineación nos ha llevado a proponer una variación máxima de unos 30° alrededor de la normal a la dirección de foliación para la posición de la lineación L_1 en las zonas de alto grado metamórfico (primera fase de deformación). Este ángulo se ha determinado mediante la estadística de orientación de las lineaciones L_1 (fig.3.4).

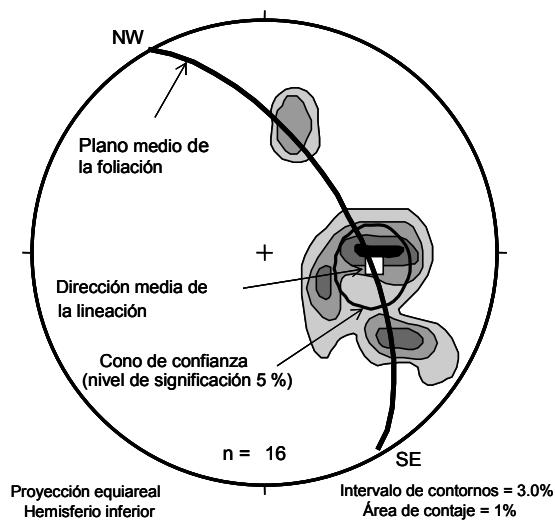


Fig.3.4. En esta figura se aprecia que el cabeceo medio de la lineación de la primera fase de deformación (L_1) de las metabasitas de Acebuches es de unos 70° al SE, medido sobre el plano medio de la foliación de esa misma fase. La dirección media se ha calculado mediante la estadística del vector resultante, y el resultado es 51° de inmersión según la dirección N97°E. El cono de confianza para un nivel de significación del 5% tiene un ángulo de semiapertura de 14°. Esto significa que el cabeceo de la lineación podría variar entre 56° y 84° al SE. Los datos corresponden al sector de la lámina de metabasitas de Acebuches entre las localidades de Cortegana y Almonaster la Real. Los 16 datos proyectados fueron tomados por Díaz Azpiroz (2001) y por el Grupo de Investigación RNM-120 de la Junta de Andalucía.

En lo referente a L_2 , se encuentra siempre bien desarrollada. Como se observa por la posición de esta lineación (fig.3.2), apreciamos que desde Veredas hacia el Oeste (al menos en aquellas muestras en las que la lineación es visible), el cabeceo de la lineación de segunda fase (L_2) es contrario al de las muestras de Almonaster la Real. Si bien en este último caso la lineación L_2 pincha siempre hacia el SE, conforme nos movemos hacia Veredas (es decir, hacia el O geográfico) la lineación L_2 se dispone casi horizontal hasta llegar un punto, al Oeste de la aldea de Veredas, en el que el cabeceo de la lineación cambia de sentido y pincha hacia el NO. Esto podría estar relacionado con la mayor intensidad de la componente de cizalla simple en la ZCS en Almonaster la Real, que sería menos acusada desde Veredas hacia el Oeste, lo cual implicaría una tendencia de la lineación L_2 hacia la horizontalidad, o inclinándose hacia el NO. La explicación detallada de esta variación puede encontrarse en Díaz Azpiroz (2001).

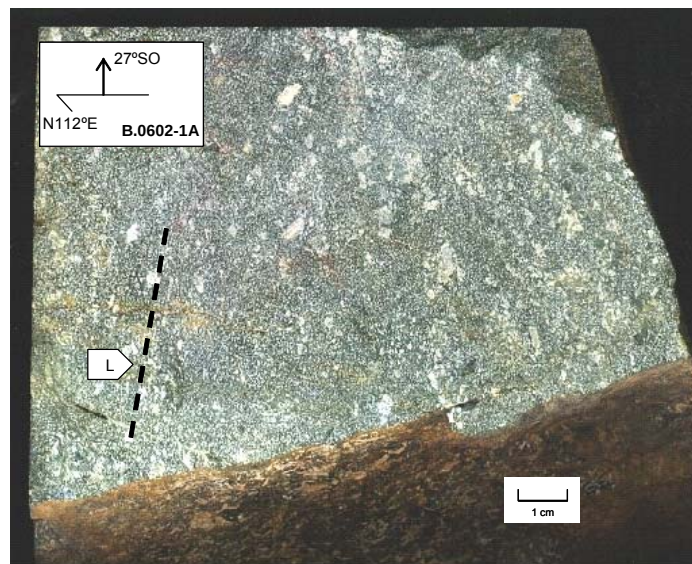


Fig.3.5. Fotografía del plano de foliación de la muestra 1 (B.0602-1A) del corte de Veredas. En la parte superior izquierda se indica la orientación de la muestra (N112°E/ 27°SO) y con una línea de trazo grueso discontinuo se representa la orientación de la lineación (L), con alto cabeceo, definida por la orientación preferente de los ejes largos de los cristales de plagioclasa. Ver texto para más detalle.

3.3. USO DE LA PLATINA UNIVERSAL Y DE OTROS MÉTODOS PARA MEDIR LA ORIENTACIÓN CRISTALOGRAFICA DE PLAGIOCLASAS

A continuación comentamos el método que hemos seguido en este trabajo para el manejo de la platina universal. Más adelante, en el apartado 3.3.3, comentaremos otros métodos similares utilizados por autores como Wenk *et al.* (1986) y Kruhl (1987a) para el estudio de la orientación cristalográfica preferente en plagioclasas. En nuestro caso, para el estudio preliminar de la foliación y otras superficies de discontinuidad, así como de la homogeneidad de dominios microscópicos, se empleó un microscopio petrográfico convencional. Para la medición de la orientación cristalográfica preferente (OCP) de los cristales de plagioclasa se utilizó un microscopio petrográfico equipado con una platina universal marca Leitz de cuatro ejes (fig.3.6a). Tales ejes son: el eje de rotación interno (*eje A₁*), el eje N-S de basculamiento (*eje A₂*), el eje E-O de basculamiento o giro de control (*eje A₃*) y el eje de rotación externo (*A₄*). Para más detalle, ver la fig.3.6b.

Para la medida de la OCP es necesario utilizar una reglilla rectangular o escala graduada que sirva de guía y permita la constante movilidad de la sección delgada sin perder la referencia de su orientación. Son esenciales también dos semiesferas de cristal con índice de refracción cercano al promedio de los minerales que se pretenden medir (en el caso de las plagioclasas este valor es de 1.56) entre las cuales se monta la lámina delgada (fig.3.6c-d). Para que la lámina pueda deslizarse entre las semiesferas, y para evitar reflexiones de la luz entre un elemento y otro, se emplea una sustancia aceitosa incolora, por ejemplo glicerina, que es estable y no es corrosiva. El empleo de la platina universal para la determinación de la OCP y el análisis de la microfábrica resultante, consiste en la medida de la orientación de una superficie planar de discontinuidad visible (plano de macla) y la medida de dos de los tres ejes de la indicatriz óptica de cada individuo del grano maclado. Todos los datos de la fábrica a medir quedan referidos a las coordenadas de la sección orientada. Un paso preliminar en cada medida, por lo tanto, es orientar la sección delgada de manera que los bordes de la lámina mantengan una relación fija con la escala graduada o reglilla, la cual se encaja en una ranura de la placa que sirve de soporte para la semiesfera del cristal superior (fig.3.6d). De este modo, la base de la lámina montada se mueve paralelamente al contacto con el brazo inferior de la reglilla, a lo largo de la dirección E-O del microscopio, mientras que el conjunto de la escala graduada y la lámina pueden moverse, como una sola unidad, a lo largo de la dirección N-S del microscopio. El método de medida consiste en empezar a medir por uno de los extremos de la lámina, situando el grano a medir en el centro del retículo. Una vez medido, se desplaza la lámina en sentido E-O hasta que el grano medido desaparece del centro del retículo y se sitúa en él un nuevo grano. Una vez se ha realizado un barrido completo llegando al extremo opuesto de la lámina, se desplaza ésta una unidad de medida de la reglilla en dirección N-S y se procede de igual manera. Como las medidas de los ejes ópticos se hacen respecto al plano de la lámina anotándose un ángulo de dirección (0° a 360°), otro de inmersión (0° a 90°) y un sentido de inmersión (derecha o izquierda), resulta necesario transformar esas medidas a medidas estándar (dirección de inmersión e inmersión, a lo que hemos llamado *azimut* y *buzamiento*) para poder representarlas, posteriormente, en proyección equiareal (hemisferio inferior). Para ello se van introduciendo los datos originales, conforme son

medidos en la platina universal, en el programa informático *PLAG-9*, el cual se encarga de hacer los cambios de coordenadas, entre otras cosas. El funcionamiento del programa se explicará con mayor detalle en el apartado 3.4.

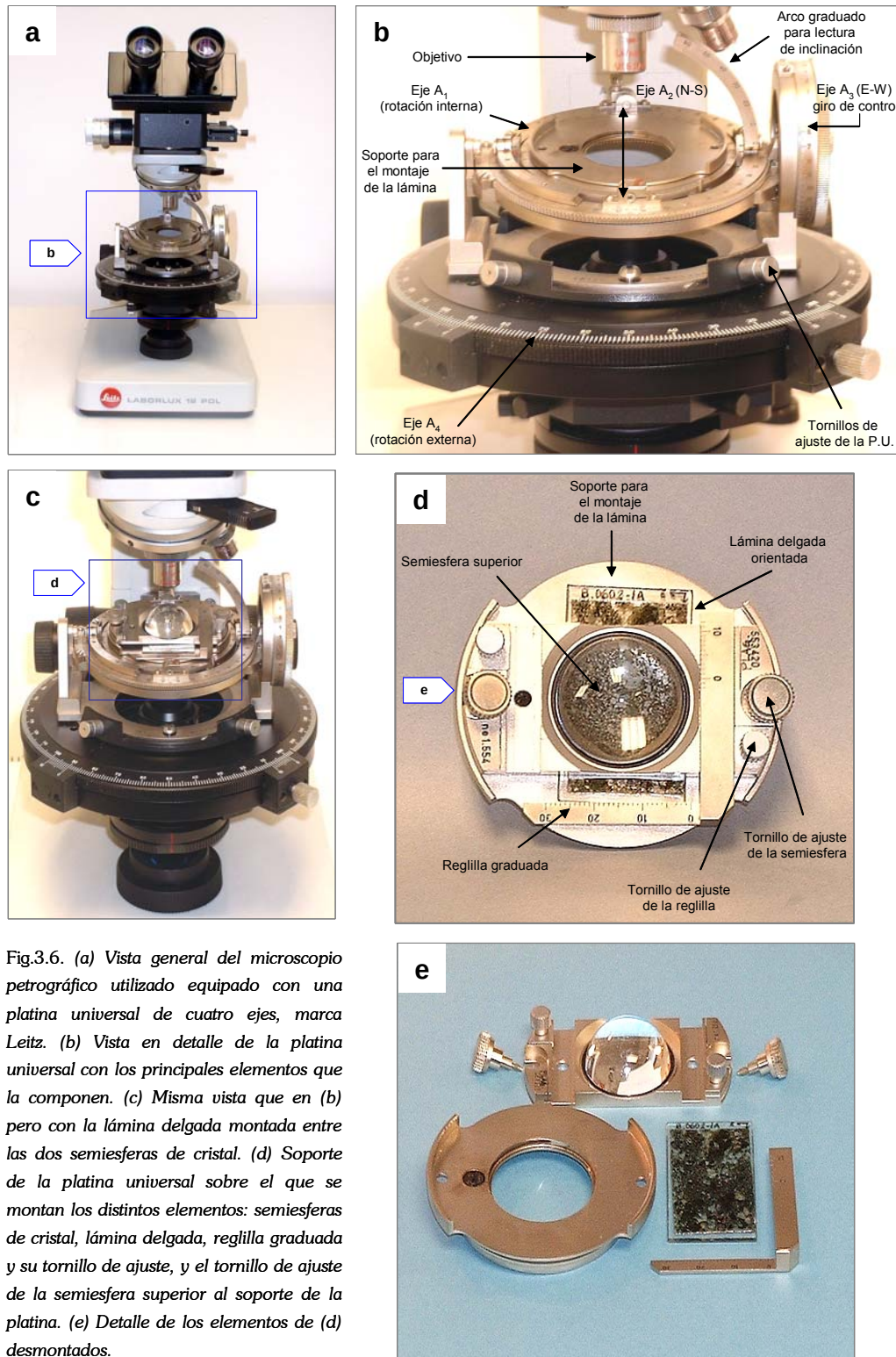


Fig.3.6. (a) Vista general del microscopio petrográfico utilizado equipado con una platina universal de cuatro ejes, marca Leitz. (b) Vista en detalle de la platina universal con los principales elementos que la componen. (c) Misma vista que en (b) pero con la lámina delgada montada entre las dos semiesferas de cristal. (d) Soporte de la platina universal sobre el que se montan los distintos elementos: semiesferas de cristal, lámina delgada, reglilla graduada y su tornillo de ajuste, y el tornillo de ajuste de la semiesfera superior al soporte de la platina. (e) Detalle de los elementos de (d) desmontados.

3.3.1. Localización de los ejes de la indicatriz óptica en plagioclasas

Una vez seleccionado un grano de plagioclasa maclado, con los ejes de basculamiento de la platina universal (ejes A_2 y A_3) a cero grados y los nícoles cruzados, se rota la lámina según el giro interno (A_1) hasta llevar uno de los dos individuos maclados a su posición de extinción. Posteriormente, se bascula según el giro de control E-O unos 30° de manera que en la mayoría de los casos el grano quedará iluminado. A continuación, se bascula según el eje N-S hasta llevar el grano a su posición de extinción más cercana. Se invierte el basculamiento según E-O unos 60° hacia la posición de iluminación y se rota, de nuevo, según N-S hasta la extinción. Repitiendo el basculamiento en N-S y la rotación según el giro interno (para varios basculamientos en E-O) la sección será llevada a su completa extinción, la cual se mantendrá para cualquier ángulo de basculamiento E-O. En tales condiciones, un eje de la indicatriz óptica está, en ese momento, alineado paralelamente al eje E-O del microscopio. Se hace entonces la lectura de la dirección de inmersión e inmersión según las coordenadas de la platina.

El eje de la indicatriz en posición E-O debe ser identificado como X, Y ó Z. Para ello, se rota la platina externa del microscopio 45° en sentido antihorario, llevando el grano a su posición de máxima iluminación. A continuación, se bascula según el eje E-O entre 45° y 50° en cada sentido. Si el eje de la indicatriz es Y, el grano pasará a través de una posición de extinción ya que uno de los ejes ópticos se encontrará paralelo al eje vertical del microscopio (no olvidar que el plano que contiene a los ejes de isotropía, o ejes ópticos, es normal al eje Y de la indicatriz). Si el eje de la indicatriz es X ó Z no se llega a la extinción durante el basculamiento; en su lugar, utilizando la lámina compensadora de 1λ se producirá adición si se trata del eje Z y sustracción si se trata del eje X. Todo este proceso se repite para encontrar el segundo eje de ese mismo individuo y, de igual manera, se hace para medir los ejes del segundo individuo maclado del grano en cuestión. Esta técnica de medida se basa en la establecida por Turner & Weiss (1963)

3.3.2. Método de medida

La relación entre los ejes de la indicatriz óptica y la orientación cristalográfica depende del contenido en anortita de las plagioclasas. Esta relación ha sido representada por Burri *et al.* (1967) en dos diagramas (fig.3.8). Con la ayuda de ellos, primero se determina el contenido en anortita para cada grano y después la orientación de los diferentes planos cristalográficos (el método se explicará con mayor detalle en el apartado 3.4). Según algunos autores como Kruhl (1987a), existen algunas dificultades relacionadas con la medición de los elementos con la platina universal, como por ejemplo:

- Dependiendo de la orientación preferente de los planos de macla, el número de granos de plagioclasa susceptibles de ser medidos puede ser diferente según la orientación de las secciones delgadas.
- Dependiendo de sus orientaciones, en alguna de las secciones delgadas puede ocurrir que la proporción de granos de plagioclasa que se pueden medir sea muy baja, debido a que sus

planos de macla forman un bajo ángulo respecto a la sección. Por lo tanto, los granos con los planos de macla a alto ángulo del plano de la sección delgada se ven favorecidos.

- Según el contenido de anortita, no todos los planos cristalográficos pueden ser determinados de forma inequívoca. Por ejemplo, si se miden dos ejes de la indicatriz y el plano (010), entonces el plano (001) no podría calcularse y, consecuentemente, tampoco el resto de planos, para composiciones entre An_{15} y An_{25} . Esto ocurre porque para este tipo de plagioclasas, oligoclasa y andesina, los ejes Y y Z de la indicatriz óptica y los polos del plano (010) son coplanares. De esta manera, dos o más de las cuatro posibles posiciones de ajuste pueden llevar el polo del plano (010) medido en la muestra a coincidir con la curva correspondiente de Burri *et al.* (1967), con la consiguiente indeterminación en la posición de los elementos cristalográficos de la plagioclasea medida (fig.3.7). Un problema adicional de estos métodos es que asumen que el plano medido es el (010), bien porque corresponda con el plano de exfoliación o bien porque se mida una macla de Albita. Con el método explicado en este trabajo, dicha presunción no es necesaria. Entre otras cosas, es importante destacar que este problema sólo se presenta para los métodos seguidos por ciertos autores, como por ejemplo Kruhl (1987a), porque aunque utilizan los estereogramas de Burri *et al.* (1967), acceden a ellos con la orientación de los ejes de la indicatriz óptica, una sola dirección cristalográfica y, habitualmente, el plano (010). Como se indicará más adelante, este problema es superado con la metodología adoptada en este trabajo.

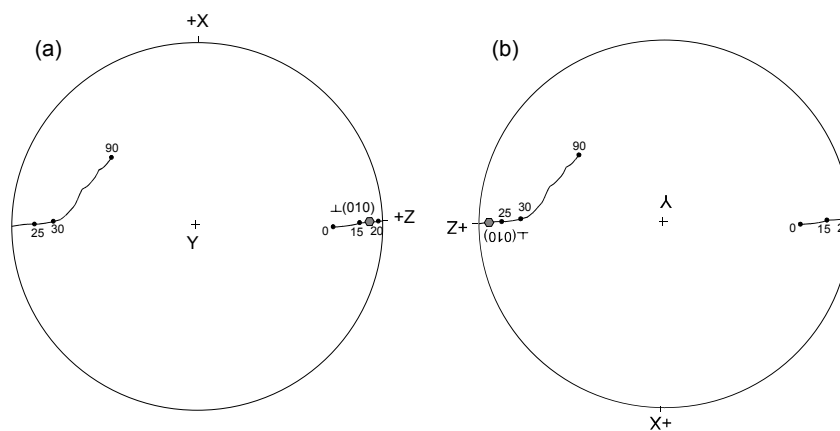
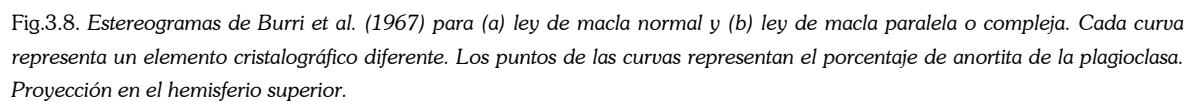


Fig.3.7. Estereograma de Burri *et al.* (1967) con la curva de migración composicional para los planos (010). Los números representan el porcentaje de anortita de la plagioclasea. Se ha representado la medición de los ejes de la indicatriz X, Y, Z y del plano (010) en un grano ideal de plagioclasea con un porcentaje de anortita entre el 15 y el 25%. Hay dos posibles ajustes (a y b) entre el grano medido y la curva de Burri *et al.* (1967), lo que implica una indeterminación en la orientación de los ejes cristalográficos de la plagioclasea medida.

Los dos primeros problemas son superados midiendo todos los granos posibles en las tres secciones perpendiculares de una misma muestra, aunque esto presenta algunos inconvenientes como comentaremos más adelante. La tercera dificultad queda superada con el programa informático *PLAG-9*, que determina el contenido en anortita y la orientación de los planos cristalográficos que no pueden medirse con la platina universal (véase apartado 3.4). Además, rota y acumula todas las medidas de cada una de las tres secciones perpendiculares.



Kruhl (1987a) propuso sumar todas las medidas a partir de las tres secciones perpendiculares. Este método también fue aplicado al estudio de la OCP de la plagioclasa por otros autores como Benn & Allard (1989), Siegesmund & Kruhl (1991), Barruol (1993) y Seron *et al.* (1993). Sin embargo, Ji *et al.* (1994) apuntan que la fábrica resultante de la medida de las tres secciones ortogonales no es necesariamente representativa de la OCP de la roca. Como se muestra en la fig.3.9a-c, los dominios B, D y F representan aquellas áreas en las secciones XZ, XY e YZ, respectivamente, en donde no se pueden medir las orientaciones de los elementos planares debido a que la inclinación máxima posible con la platina universal es de 45° . En la fig.3.9d, se puede observar que los polos de los planos cristalográficos de los granos, los cuales se localizan en la región G, pueden ser medidos dos veces. Sin embargo, en el dominio H (12.1% del área total del hemisferio) los granos pueden llegar a ser medidos hasta tres veces. Esto significa que los granos del dominio H están sobreestimados mientras que los del dominio G se encuentran subestimados. No obstante, es fácil comprender que con sólo dos secciones las áreas con sobre o subestimación de granos medidos son mucho más extensas, y los resultados menos significativos estadísticamente.

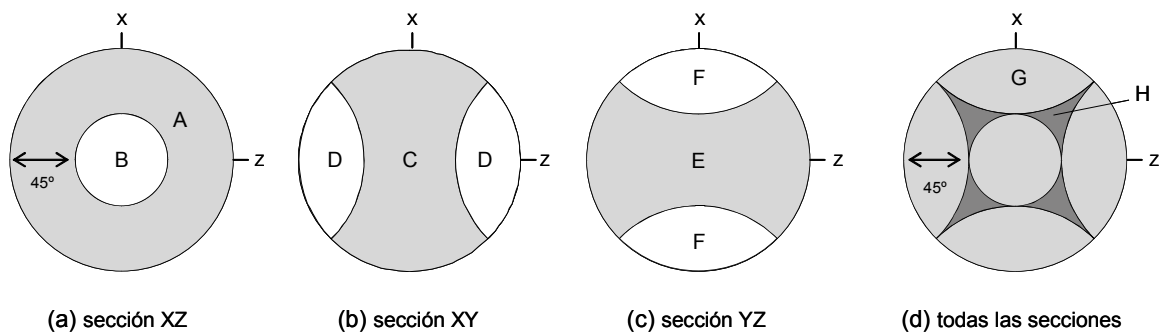


Fig.3.9. Las regiones en blanco (B, D y F) representan, respectivamente, los dominios en las secciones XZ (a), XY (b) e YZ (c) en los que no se pueden medir elementos planares debido a que la inclinación máxima de la platina universal es de 45° . Estos dominios suponen un 29.3% del total del área del hemisferio. El gráfico (d) representa el diagrama acumulado de las tres secciones (a), (b) y (c). La concentración de polos de planos en el dominio G es subestimado, mientras que en el dominio H es sobreestimado y representa aproximadamente un 12.1% del total del área del hemisferio. Modificado de Ji *et al.* (1994).

En lo referente a la medición en tres secciones perpendiculares por cada muestra, Kruhl (1987a) aconseja hacer una corrección estadística rebajando el “peso” de los polos que quedan dentro de algunas de las zonas de solapamiento (regiones H de la fig.3.9d), operación que no se ha hecho en este trabajo porque el solapamiento se produce en zonas que, para una de las láminas involucradas, supone ángulos de basculamiento muy altos, cercanos a los 45° . Dado que son escasos los granos con basculamientos tan elevados en el proceso de medición de sus ejes ópticos, el solapamiento resulta bastante improbable. Debido a esto, si “castigamos” a todos los polos del área de supuesto solapamiento rebajando su “peso”, podríamos estar reduciendo estadísticamente la importancia de un número significativo de polos medidos exclusivamente en

una de las secciones. Estaríamos falseando entonces aún más la distribución que en el caso de no hacer la corrección.

Algunos autores como Wenk & Wenk (1986), Ji & Mainprice (1998), Benn & Allard (1989) y Ague *et al.* (1990), utilizan únicamente dos planos de exfoliación [(010) y (001)] o dos planos de macla (Albita y Periclina) para las medidas de las orientaciones cristalográficas, de modo que la medida de la OCP mediante este método representa un subfábrica selectiva que no es, en absoluto, representativa de la fábrica total de la roca.

3.3.3. Otros métodos alternativos

Los intentos de utilizar técnicas de difracción de rayos-X han fallado debido a los complejos modelos de difracción de este mineral triclinico, en los que cuales se producen muchos solapamientos de picos y la mayoría de ellos a muy bajo ángulo de difracción. Para solventar estos problemas, algunos autores han recurrido a la difracción de neutrones, descrita por Wenk *et al.* (1986). Esta técnica tiene una gran ventaja sobre los rayos-X, y es que las figuras de polos pueden determinarse incluso en rocas de tamaño de grano grueso. El inconveniente resulta en que se trata de una técnica muy costosa e inaccesible para muchos. Las técnicas modernas de difracción no proporcionan información adecuada para describir las relaciones completas de orientación que son necesarias para describir el comportamiento plástico de los cristales. Irónicamente, la técnica más antigua, que es la platina universal, resulta ser la menos ambigua de todas, aunque eso sí, la más laboriosa. Wenk *et al.* (1986) intentaron demostrar esta idea aplicándola a un espécimen de anfibolita procedente de Ornö Huvud (Suecia), y calculando la OCP de los ejes de la indicatriz óptica y de los planos (001) y (010) mediante diferentes técnicas. La utilización de la platina universal demostraba ser la técnica más fiable de todas.

3.4. DETERMINACIÓN DE LA OCP COMPLETA DE PLAGIOCLASAS: PROGRAMA INFORMÁTICO PLAG-9

Los métodos actualmente disponibles para estimar la OCP de las plagioclasas se basan en la determinación de la orientación cristalográfica, cristal a cristal, de un número estadísticamente significativo de granos minerales en una lámina delgada. La disposición de los elementos cristalográficos de un cristal concreto respecto a las coordenadas de la lámina se pueden llegar a obtener mediante técnicas diversas como las comentadas en el apartado 3.3.3 (métodos alternativos). Aunque, finalmente, es la platina universal la técnica más fiable de todas y el aparato que reporta los mejores resultados a pesar de ser el más antiguo. El principal inconveniente que plantea es que se trata de la técnica de medida más laboriosa de todas debido, en gran parte, a la gran cantidad de tiempo que ha de invertirse en la medida de la orientación de cada grano mineral.

Otra limitación importante que tiene la platina universal es que en muchos casos no se puede determinar la orientación de la plagioclasa bajo ciertas composiciones, algo a lo que ya hicimos referencia en los apartados 2.5.2 y 3.3.2. Este inconveniente ha sido citado muy frecuentemente en todos los trabajos publicados que hemos consultado. Sin embargo, en este trabajo de investigación hemos desarrollado un método universal para la platina de 4 ejes que no depende de la composición de la plagioclasa, y es el programa informático *PLAG-9*, basado en las curvas de migración de Burri *et al.* (1967) para las leyes de macla normal y paralela o compleja. Esto supone, sin lugar a dudas, un enorme e importantísimo avance con respecto a los métodos preexistentes. Existen otros programas informáticos como *MIRACMS* (Kruhl, 1987a) y *UNIPLAJ* (Ben & Mainprice, 1989). Si bien el primero de ellos nos ha sido imposible consultarlo a pesar de habérselo pedido personalmente al autor, el segundo no nos sirve de elemento de comparación con el nuestro porque está diseñado para una platina universal de 5 ejes y no de 4.

Debido a que la plagioclasa es triclinica, los ejes de la indicatriz óptica no son paralelos a los ejes cristalográficos. Además, la relación entre la indicatriz y las direcciones cristalográficas varía con el contenido en anortita de la plagioclasa. Por lo tanto, la orientación cristalográfica no puede ser deducida directamente a partir de la medida de los ejes de la indicatriz óptica, sino que debe ser reconstruida utilizando la platina universal para la medida de los ejes ópticos y elementos estructurales planares tales como los planos composicionales de macla. Tal reconstrucción está basada en las relaciones angulares entre los ejes ópticos y las direcciones y planos cristalográficos, como una función del contenido de anortita, según las curvas de migración de Burri *et al.* (1967) para maclas de ley normal y de ley paralela o compleja (fig.3.7).

3.4.1. Método gráfico

Antes de pasar a explicar cómo se ha elaborado el programa informático *PLAG-9*, comentaremos en qué consiste gráficamente el método, es decir, cómo se debería hacer manualmente para encontrar la orientación cristalográfica completa de un cristal concreto.

En primer lugar, colocaríamos la lámina (con sus coordenadas de orientación impresas) sobre la platina universal y escogeríamos un cristal maclado en el que mediríamos el plano de macla (o plano de asociación) y dos de los tres ejes de la indicatriz óptica para cada uno de los individuos maclados. A continuación, determinaríamos el tercer eje óptico de cada individuo mediante proyección estereográfica, sabiendo que han de ser perpendiculares a cada par de ejes medidos con la platina. Antes de nada, tenemos que aclarar que las coordenadas de los ejes ópticos y del plano de asociación se calculan respecto a las coordenadas de la platina universal, la cual tiene el origen del ángulo de dirección en coincidencia con el S del microscopio lo que, en la proyección esférica, suele coincidir con la dirección 180° y va aumentando en sentido horario, de manera que todas las medidas deberán tener esto en cuenta.

Seguidamente, procederíamos de la siguiente manera: tomaríamos los ejes X de los individuos de la macla y los haríamos coincidir con un círculo mayor de la proyección estereográfica. Ambos formarán entre sí un ángulo agudo y otro obtuso, de manera que representaríamos la bisectriz de ambos ángulos y las marcaríamos con un punto. Este mismo proceso lo repetiríamos con los ejes Y y Z, de modo que obtendríamos un total de seis puntos sobre la falsilla. De todos ellos, se observaría que tres de ellos siempre quedan más agrupados y los otros tres más dispersos. Estos últimos los haríamos coincidir con un círculo mayor de la proyección, cuyo polo se situaría muy cercano a los tres puntos inicialmente más agrupados. Dicho polo corresponde al eje de macla o eje de hemitropía, de manera que: (a) si el eje de macla coincide con el polo del plano de asociación, nos encontraríamos en el caso de un tipo de macla de ley normal, y (b) si el eje de macla forma un ángulo cercano a los 90° con el plano de asociación, estaríamos en el caso de un tipo de macla de ley paralela o compleja.

Como los estereogramas de Burri *et al.* (1967) consideran que el eje Y está en posición vertical (en el centro de la proyección), el paso siguiente sería rotar el eje Y del individuo maclado mejor desarrollado al centro de la falsilla. Como es lógico, también rotarían los ejes X y Z el mismo número de grados, así como también el polo del plano de asociación y el eje de hemitropía. A continuación, habría que calcular, gráficamente, a qué tipo de macla ajusta el eje de hemitropía y la composición de la plagioclasea al que corresponde dicho ajuste. Como las medidas en la platina universal no indican si las direcciones de los ejes ópticos son positivas o negativas, hay cuatro posibles orientaciones en los diagramas de Burri *et al.* (1967) para el eje de hemitropía rotado. Estas cuatro posibles orientaciones se distribuyen simétricamente respecto a Y, pero sólo una de ellas, con un porcentaje de anortita dado, es la correcta. Y la posición correcta será aquella en la que dicho eje de macla forme el ángulo más pequeño respecto a uno de los puntos (con una composición de plagioclasea dada) de una de las curvas de migración de Burri *et al.* (1967). A diferencia de los métodos publicados hasta el momento, en este caso utilizamos el plano de macla y, sobre todo, el eje de hemitropía, para obtener el ajuste a las curvas de Burri *et al.* (1967). De esta manera, se evita la incertidumbre expresada en el apartado 3.3.2 y en la fig. 3.7.

Una vez obtenido el plano de mejor ajuste y la composición, se pasaría a calcular, para el mismo porcentaje de anortita, la orientación del resto de elementos cristalográficos considerados por Burri *et al.* (1967). Como la orientación calculada para el resto de planos y direcciones

cristalográficas han sido calculadas respecto al eje de hemitropía y a los ejes ópticos rotados, se deberá deshacer esa rotación para llevar todos y cada uno de los elementos a su posición original y, de este modo, conocer la orientación cristalográfica verdadera.

El proceso arriba explicado tendría que repetirse para cada grano de plagioclasa del que se quisiera obtener la orientación cristalográfica completa. Esto no es solo muy laborioso y consume muchísimo tiempo (como hemos podido ver), sino que, además, tiene el inconveniente de que podrían surgir indeterminaciones en el ajuste al plano de macla, algo que un programa informático sí podría resolver. Es por todo ello que se ha desarrollado el programa *PLAG-9* cuyo funcionamiento comentaremos más adelante.

3.4.2. Método analítico

Para dar operatividad al método indicado se ha elaborado un complejo programa informático (*PLAG-9*), que se basa en las curvas de migración de los estereogramas de Burri *et al.* (1967) para las leyes de macla normal y paralela o compleja. Este programa maneja más de 2000 variables diferentes, de ahí su enorme complejidad, y tiene como objetivo la determinación de la orientación cristalográfica preferente (OCP) de las plagioclasas, aplicado en nuestro caso a las plagioclasas de las metabasitas de Acebuches. El lenguaje de programación utilizado ha sido QuickBasic y el programa funciona bajo entorno MS-DOS, arrancándolo desde un acceso directo creado en el escritorio de Windows. Para ejecutarlo es necesario introducir una clave de seguridad (*clave de entrada*) para evitar manipulaciones erróneas que pudieran dañar la base de datos. El listado de programación y el funcionamiento de programa (una especie de guía gráfica) pueden verse en el apéndice A.

Sistemas de coordenadas

Existen formas muy diferentes de representar en 3D los datos de orientación vectorial (aquellos a los que se puede asignar una dirección y un sentido, como los vectores paleomagnéticos o de paleocorrientes), y los datos de tipo axial (aquellos a los que única y exclusivamente se les puede asignar una dirección). Esto no es solamente debido a los requerimientos propios de cada disciplina (astronomía, geodesia, geología, geofísica, matemáticas, etc.) sino también a las diferentes necesidades dentro de cada disciplina. En geología, por ejemplo, existen actualmente cinco o seis sistemas en uso.

Con la platina universal se miden ejes (los ejes de la indicatriz óptica) y se tratan, por lo tanto, como datos axiales tanto para su representación en proyección esférica como para su estudio estadístico. En esta tesis empleamos las coordenadas geográficas y geológicas, tanto para el muestreo en campo como para el tratamiento de los datos con el programa *PLAG-9* y el análisis estadístico de los datos resultantes obtenidos con dicho programa a partir de la medición con la platina universal.

- Coordenadas geográficas: El eje $+X$ se sitúa sobre el plano ecuatorial y su extremo coincide con la intersección entre un meridiano de referencia (habitualmente el de Greenwich) y el plano ecuatorial. El eje $+Y$, también situado sobre el plano ecuatorial, se dispone a 90° del eje $+X$, medido en sentido antihorario visto desde el Norte, es decir, hacia el Este. El eje $+Z$ se sitúa sobre el eje de rotación de la tierra y apunta hacia el Norte (fig.3.10). La variación angular de un vector o eje cualquiera respecto al plano ecuatorial (plano XY , que contiene a los ejes de referencia) es lo que se conoce como latitud (θ), con ángulos positivos en el hemisferio Norte y negativos en el Sur. La longitud (ϕ) se mide como el ángulo que forma el meridiano que contiene al vector o eje en cuestión, proyectado sobre el plano ecuatorial, y el eje X , siempre en sentido antihorario y visto desde el N y hacia el E.

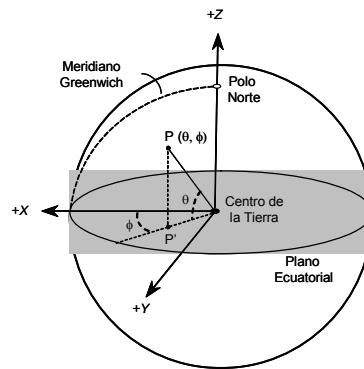


Fig.3.10. Coordenadas geográficas. El vector P tiene coordenadas (θ, ϕ) . Al ángulo θ que forma P y su proyección (P') sobre el plano ecuatorial (plano XY) se le llama latitud. La longitud (ϕ) de dicho vector es el ángulo que forma el meridiano que lo contiene, proyectado sobre el plano ecuatorial, y el eje X (medido en sentido antihorario, desde el N y hacia el E).

- Coordenadas geológicas: la orientación de una estructura planar, o de un elemento lineal, queda definida por su dirección de inmersión e inmersión. Tratándose de líneas la dirección queda definida por el rumbo o azimut (A) y se mide como el ángulo, respecto al N, de la proyección horizontal de línea en cuestión; y se mide habitualmente desde el N hacia el E (fig.3.11). El buzamiento (llamado inmersión (I) en este trabajo) es el ángulo de inclinación del elemento respecto al plano horizontal.

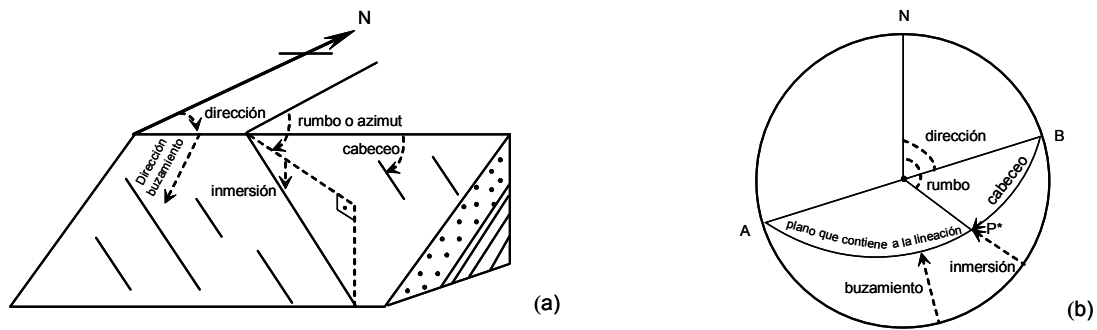


Fig.3.11. Coordenadas geológicas. (a) Diagrama esquemático que muestra las variables utilizadas (dirección, rumbo, dirección de buzamiento, inmersión y cabeceo) necesarias para describir la orientación de una estructura plano-lineal (por ejemplo, foliación y lineación mineral). (b) Representación estereográfica de una línea en un plano. La curva AP*B es la intersección del plano con el hemisferio inferior.

A partir de estas coordenadas angulares es posible obtener las correspondientes coordenadas cartesianas. Los cosenos directores de la línea o de la normal al plano, o polo del plano, se calcularían con las siguientes expresiones:

$$L = \cos I \sin A ; \quad M = \cos I \cos A ; \quad N = -\sin I \quad (3.1)$$

donde L , M y N representan, respectivamente, las coordenadas del elemento según los ejes de coordenadas $+X$ (Norte), $+Y$ (Este) y $+Z$ (hacia abajo). Por convenio, la coordenada vertical (N) es positiva cuando se encuentra situada en el hemisferio inferior.

Fundamento y operaciones realizadas por el Programa **PLAG-9**

Se ha utilizado una platina universal marca Leitz de 4 ejes montada sobre un microscopio petrográfico. De cada plagioclasa maclada sólo se pueden obtener, con una platina de tales características, dos de los tres ejes de la indicatriz óptica para los dos individuos de cada grano de plagioclasa maclado. A partir de ellos, el programa sigue una serie de pasos, que se detallan a continuación, para determinar las principales direcciones cristalográficas.

Como se trata de un programa interactivo en el que se introducen los datos de las coordenadas de platina (dirección de inmersión e inmersión) de los ejes ópticos conforme se van midiendo, lo primero que nos interesa comprobar es que cada par de ejes medidos en cada individuo maclado sean ortogonales entre si. Se trata de una mera precaución para poder repetir las medidas en el caso de que la relación angular fuera muy distinta a 90° (se ha considerado un margen de error arbitrario de $\pm 8^\circ$ ya que la experiencia ha mostrado que ese es aproximadamente el intervalo de error que se puede cometer en la determinación de la posición de los ejes ópticos de los cristales de plagioclasa en las muestras estudiadas y con el equipo utilizado). Aplicando el concepto de producto escalar entre vectores se obtiene el ángulo entre los

ejes ópticos, pero previamente es preciso transformar sus coordenadas de platina en coordenadas cartesianas mediante el cálculo de los cosenos directores (ec.3.1). Hay que tener en cuenta que con la platina universal se ha optado por indicar los datos en el hemisferio inferior, de modo que la coordenada vertical N será positiva en todos los casos.

A continuación, el programa calcula el tercer eje óptico de cada uno de los dos individuos medidos. El paso siguiente es transformar las coordenadas cartesianas de los seis ejes ópticos en coordenadas angulares (*azimut* y *buzamiento*). Una vez hecho esto, se introducen los datos del plano de asociación y el programa vuelve a repetir el proceso de transformar sus coordenadas de platina a cartesianas para obtener, finalmente, las coordenadas angulares y mostrarlas en pantalla.

Posteriormente, el programa obtiene la orientación del eje de hemitropía mediante unos cálculos complejos basados en las coordenadas cartesianas de los ejes ópticos de los dos individuos maclados. Gráficamente, el eje de hemitropía puede determinarse de la siguiente manera: se obtiene el plano que contiene a los ejes X de ambos individuos. Análogamente, se obtienen los planos que contienen a los ejes Y y Z . Estos tres planos deben cortarse según una única dirección que coincide con el eje de hemitropía de la macla. Sin embargo, debido a los pequeños e inevitables errores que se cometen durante la medición de los ejes de la indicatriz, es raro que los tres planos se lleguen a intersectar en un solo punto. Es por ello que la determinación del eje de hemitropía se realiza mediante un procedimiento alternativo en el que se obtienen: (1) las líneas perpendiculares a cada uno de los tres planos descritos, y (2) el plano de mejor ajuste matemático a esas tres líneas. De este modo, el polo del plano de mejor ajuste coincide con el eje de hemitropía. Para ello, utilizamos la aproximación del plano que mejor se adapta (círculo π) a una distribución de polos de planos (a los que llamaremos polos s , y que corresponden a los polos de los planos que contienen a los ejes ópticos de los individuos) dispuestos cilíndricamente. El procedimiento estadístico para la determinación de este plano de mejor ajuste está basado en la técnica usual de hacer mínimos los cuadrados de las desviaciones de los polos s observados con respecto a esta superficie.

Supongamos que la normal al círculo π forma los ángulos α , β , y γ , respectivamente, con tres direcciones cualesquiera perpendiculares entre sí (x , y , z). Si los ángulos existentes entre un polo s y los ejes de coordenadas son a , b y c , respectivamente, entonces los polos s y la normal al círculo π serían perpendiculares. La condición necesaria para que esto ocurra es que el producto de sus cosenos sea igual a cero, esto es:

$$\cos a \cos \alpha + \cos b \cos \beta + \cos c \cos \gamma = \cos 90^\circ = 0 \quad (3.2)$$

sustituyendo $\cos a$ por l , $\cos b$ por m , $\cos c$ por n , $\cos \alpha / \cos \gamma$ por A , $\cos \beta / \cos \gamma$ por B , entonces la condición expresada en (3.2) se simplifica a:

$$A l + B m + n = 0 \quad (3.3)$$

Si aplicamos (3.3) a un caso real, el miembro derecho de la ecuación normalmente diferirá de cero en una pequeña cantidad (e). En dicho caso los valores l , m y n son conocidos, mientras que los de α , β , y γ (y por tanto, A y B) son las incógnitas, y representan las orientaciones del polo del plano de mejor ajuste que estamos buscando. El procedimiento estadístico estándar es encontrar los valores de A y B que mejor se ajustan a los valores observados, es decir, hacer mínimos los cuadrados de estas desviaciones, de manera que $\Sigma e^2 = \Sigma (Al + Bm + n)^2$ tenga un valor mínimo. El sumatorio de errores (Σe) se deriva del hecho de que es posible plantear una ecuación (3.5) distinta para cada una de los polos s , lo que arroja varios valores de e que difieren entre sí. La suma cuadrática de estos errores valdrá :

$$\Sigma e^2 = A^2 \Sigma l^2 + B^2 \Sigma m^2 + n^2 + 2AB \Sigma lm + 2A \Sigma ln + 2B \Sigma mn \quad (3.4)$$

Diferenciando (3.4) con respecto a A e igualando a cero, se tiene :

$$A \Sigma l^2 + B \Sigma lm + \Sigma ln = 0 \quad (3.5)$$

Diferenciando (3.4) con respecto a B e igualando a cero, se tiene :

$$A \Sigma lm + B \Sigma m^2 + \Sigma mn = 0 \quad (3.6)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (3.5) y (3.6) para A y B , obtenemos que :

$$A = [(\Sigma lm \Sigma mn) - (\Sigma ln \Sigma m^2)] / [\Sigma l^2 \Sigma m^2 - (\Sigma lm^2)] \quad (3.7)$$

$$B = [(\Sigma lm \Sigma ln) - (\Sigma mn \Sigma l^2)] / [\Sigma l^2 \Sigma m^2 - (\Sigma lm^2)] \quad (3.8)$$

Como $[\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma] = 1$, se tiene que $[A^2 \cos^2 \alpha + B^2 \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma] = 1$, o bien :

$$\cos \alpha = A (1 + A^2 + B^2)^{-1/2} \quad (3.9)$$

$$\cos \beta = B (1 + A^2 + B^2)^{-1/2} \quad (3.10)$$

$$\cos \gamma = (1 + A^2 + B^2)^{-1/2} \quad (3.11)$$

Las ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11) son, respectivamente, las coordenadas cartesianas del eje de hemitropía en la forma:

$$L (E.H) = \frac{A}{\sqrt{1 + A^2 + B^2}} \quad ; \quad M (E.H) = \frac{B}{\sqrt{1 + A^2 + B^2}} \quad ; \quad N (E.H) = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 + B^2}}$$

Una vez obtenidas sus coordenadas cartesianas, el programa las transforma en coordenadas angulares, de igual manera que hizo con el tercer eje óptico de cada individuo y con el plano de asociación. Como se puede ver, se trata de un proceso tremendamente repetitivo en cuanto al cambio continuo de sistemas de coordenadas. Estos cambios son necesarios para disponer de un control sistemático de los cálculos que realiza el programa.

El paso siguiente es calcular el ángulo entre el plano de asociación y el eje de hemitropía (*PA-EH*) mediante el producto escalar entre vectores (igual que se hizo para calcular la ortogonalidad entre los ejes ópticos medidos en cada individuo con la platina universal). Lógicamente, siempre se considerará el ángulo más pequeño entre los dos posibles, es decir, el ángulo agudo. El cálculo del ángulo *PA-EH* es imprescindible para establecer las comparaciones y ajustes angulares, más adelante, entre cada punto y las curvas de cada elemento cristalográfico en los estereogramas de Burri *et al.* (1967) y, de este modo, saber a qué tipo de ley de macla ajusta cada grano. Según el valor del ángulo *PA-EH*, se distinguen dos tipos de macla: maclas de ley normal (Albita, Manebach, Baveno izquierda y Baveno derecha) para ángulos cercanos a los 90°, y maclas de ley paralela o compleja (Carlsbad, Ala, Aclina, Periclina, Albita-Carlsbad y Albita-Ala) para ángulos cercanos a los 0°. El límite establecido para ambas leyes es arbitrario, ya que en teoría es de 0° para ley normal y de 90° para la ley paralela o compleja. En la práctica, sin embargo, debido a errores de medición con la platina universal, fluctúa entre 0-10° para la ley normal y 80-90° para la ley paralela o compleja.

Como en las proyecciones de Burri *et al.* (1967) el eje Y de la indicatriz óptica se encuentra en la vertical, es necesario rotar el eje Y de uno de los individuos medidos a esa posición para poder comparar los datos que se miden en la platina con uno u otro de los diagramas de Burri *et al.* (1967). Ya que las medidas en la platina universal no indican si las direcciones de los ejes ópticos son positivas o negativas, hay cuatro posibles orientaciones en los diagramas de Burri *et al.* (1967) para los elementos cristalográficos medidos. Estas cuatro posibles orientaciones (fig.3.12) se distribuyen simétricamente respecto a Y, pero sólo una de ellas, con un porcentaje de anortita dado, es la correcta.

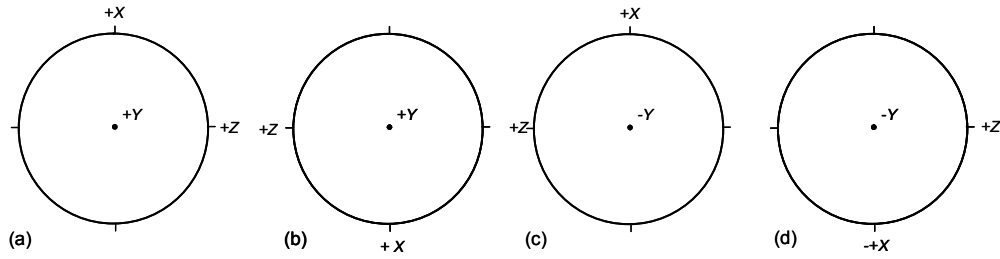


Fig.3.12. Como en las proyecciones de Burri *et al.* (1967) el eje Y de la indicatriz óptica se encuentra en la vertical (hemisferio superior) y las medidas en la platina universal no indican si las direcciones de los ejes ópticos son positivas o negativas, existen cuatro posibles orientaciones que se distribuyen simétricamente respecto al eje Y. (a) Eje Y vertical arriba (hemisferio superior), eje X al Norte y eje Z al Este. (b) Eje Y vertical arriba (hemisferio superior), eje X al Sur y eje Z al Oeste. (c) Eje Y vertical abajo (hemisferio inferior), eje X al Norte y eje Z al Oeste. (d) Eje Y vertical abajo (hemisferio inferior), eje X al Sur y eje Z al Este.

Por convenio se rotará siempre el primer individuo medido, que se ha optado por hacerlo corresponder con el elemento que se encuentra mejor desarrollado dentro del cristal maclado. Como es lógico, al rotar el eje Y también rotará el eje de hemitropía, teniendo en cuenta que para cada una de las cuatro posibles posiciones se aplica una matriz de rotación diferente. Las cuatro posibles posiciones son:

1. Eje Y vertical arriba (hemisferio superior), eje X al norte y eje Z al este de la proyección.
2. Eje Y vertical arriba (hemisferio superior), eje X al sur y eje Z al oeste de la proyección.
3. Eje Y vertical abajo (hemisferio inferior), eje X al norte y eje Z al oeste de la proyección.
4. Eje Y vertical abajo (hemisferio inferior), eje X al sur y eje Z al este de la proyección.

Estas 4 posibles posiciones se corresponden, respectivamente, con las siguientes matrices de rotación:

$$\begin{bmatrix} L_A & L_B & L_C \\ -N_A & -N_B & -N_C \\ M_A & M_B & M_C \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} -L_A & -L_B & -L_C \\ -N_A & -N_B & -N_C \\ -M_A & -M_B & -M_C \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} L_A & L_B & L_C \\ N_A & N_B & N_C \\ -M_A & -M_B & -M_C \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} -L_A & -L_B & -L_C \\ N_A & N_B & N_C \\ M_A & M_B & M_C \end{bmatrix}$$

siendo (L_A, M_A, N_A) , (L_B, M_B, N_B) y (L_C, M_C, N_C) los cosenos directores de los ejes X, Y, Z de la indicatriz óptica, respectivamente.

A continuación, y para evaluar la coincidencia entre el cristal estudiado y las curvas de Burri *et al.* (1967), el programa calcula, mediante el producto escalar entre vectores, los ángulos entre el eje de hemitropía rotado en sus cuatro posibles posiciones y los puntos de las curvas de Burri *et al.* (1967). Se han considerado un total de 20 puntos para cada curva, que abarcan un rango de composiciones entre An_0 y $An_{92.5}$. Es preciso tener en cuenta que, de acuerdo con el

ángulo *PA-EH* obtenido previamente, se comparará el eje de hemitropía rotado con el estereograma que corresponda, es decir, con el de ley de macla normal o con el de ley de macla paralela o compleja. Como los datos de las curvas de Burri *et al.* (1967) están en coordenadas angulares, se tienen que transformar a coordenadas cartesianas para realizar dichos ajustes. Dado que este método trabaja con la posición del eje de hemitropía, los problemas de ajuste de otros métodos son menos importantes. Realmente sólo se darían para las plagioclasas macladas según la ley de la Albita (fig.3.6) que, como se verá en el capítulo de resultados, representan un porcentaje pequeño (10%) del total de los granos medidos. Habida cuenta de que sólo un 10-15% de las plagioclasas medidas corresponden a oligoclasas, el porcentaje de error cometido en este método por incertidumbres en el ajuste a las curvas de Burri *et al.* (1967) es menor del 1%.

Una vez que el programa ha calculado los ángulos de ajuste, elige el menor de ellos. El ángulo de mejor ajuste es 0° , en cuyo caso el eje de hemitropía coincidiría exactamente con uno de los puntos de las curvas, caso no muy frecuente pero posible. Una vez calculado, también proporciona la posición del eje de hemitropía que mejor ha ajustado, el plano de macla al que ha ajustado y el porcentaje de anortita que le corresponde. Acto seguido, pasa a calcular, para el mismo porcentaje de anortita del plano de macla de ajuste, las coordenadas cartesianas de los otros 12 elementos cristalográficos considerados por Burri *et al.* (1967). En total es posible determinar, en función de la posición del eje de hemitropía que mejor ha ajustado, la localización (para cada grano) de los siguientes ejes: $[100]$, $[010]$, $[001]$, $\perp[100]/(010)$, y $\perp[001]/(100)$, y de los siguientes planos cristalográficos: (010) , (001) , (021) , $(0\bar{2}1)$, (100) , (110) , $(1\bar{1}0)$ y $(\bar{2}01)$.

Dependiendo de la posición concreta del eje de hemitropía que mejor ha ajustado, a la hora de deshacer la rotación aplicada y llevar todos los ejes y polos de planos cristalográficos a la posición inicial del eje de hemitropía para calcular las coordenadas de todos estos elementos, se aplica la matriz rotacional correspondiente a la posición del eje de hemitropía en la que se haya verificado el mejor ajuste. Realizada la rotación y calculadas las coordenadas cartesianas de los distintos elementos cristalográficos, se transforman a coordenadas angulares (*azimut* y *buzamiento*). De este modo, se podrán representar los datos en proyección estereográfica. Para ello se ha utilizado el programa *Stereonet* de la *Suite RockWorks 99*.

Entre las técnicas equivalentes a la aquí utilizada, para la determinación de la orientación cristalográfica preferente de la plagioclasa mediante el uso de la platina universal, destacamos la empleada por Ji *et al.* (1984). Según estos autores, si más de una posición de los polos de planos de exfoliación o planos de macla coincidiese con la curva de migración para el plano correspondiente, dentro de un margen de error de medida de $\pm 5^\circ$, el resto de las direcciones cristalográficas no podrían ser determinadas con total seguridad. De igual modo, por ejemplo, si una cualquiera de las cuatro orientaciones para (010) fuese indistinguible de cualquiera otra para (001) dentro del margen de error mencionado, la identificación de estos planos cristalográficos y la determinación de la orientación cristalográfica completa de la plagioclasa no se podría realizar de forma inequívoca. Como ya se ha indicado, esto que es una limitación o inconveniente de dichos métodos, queda superado en gran parte con el programa informático *PLG-9*, ya que no se basa en el ajuste de un plano de orientación conocida, sino en el del eje de hemitropía. En este caso es

muy difícil encontrar dos ajustes indistinguibles para distintas posiciones de la indicatriz óptica medida con respecto a las curvas de Burri *et al.* (1967).

Convenio de signos según los hemisferios de proyección

Por convenio, y por costumbre en la medición de los datos de índole estructural, se ha considerado que los datos obtenidos con la platina universal (ejes ópticos y plano de asociación) se sitúan en el hemisferio inferior (coordenada vertical N positiva), ya que, además, éste es el mismo hemisferio de proyección que se ha utilizado en el programa *Stereonet*. De hecho, cuando el programa *PLAG-9* calcula el tercer eje óptico de cada individuo, se le condiciona para que lo sitúe en el hemisferio inferior. Es decir, si en los cálculos de las coordenadas cartesianas N sale negativa, automáticamente el programa le cambia el signo y, como es lógico, no sólo le cambia el signo a la coordenada vertical, sino también a L y M .

Sin embargo, como los datos de las curvas de los estereogramas de Burri *et al.* (1967) están proyectados en el hemisferio superior (coordenada N negativa), hay que tener muy presente el hemisferio en el que se está trabajando en cada momento, para no caer en el error de comparar datos que se encuentren situados en hemisferios distintos. Si bien con coordenadas angulares sería difícil saber en cuál de ellos se sitúa un punto, con las coordenadas cartesianas esto no ocurre ya que el signo de N nos da la pauta. Por lo tanto, y a efectos de cálculo, el programa trabaja siempre en el hemisferio inferior, excepto cuando se compara el eje de hemitropía con los puntos de las curvas de Burri *et al.* (1967). En este caso, se ha preferido transformar las coordenadas al hemisferio superior y, una vez hecha la comparación y obtenido el plano de mejor ajuste, transformarlo al hemisferio inferior para calcular el resto de orientaciones cristalográficas y poder proyectarlas posteriormente con el programa *Stereonet*. De este modo se construyen los diagramas de densidad de polos y se obtienen los autovalores y autovectores de la estadística de Bingham (ver apartado 3.6.1).

Programación: comentarios y problemas

El programa *PLAG-9* ha sido concebido para trabajar con muestras procedentes de hasta tres cortes geológicos distintos, con un máximo de 24 muestras por corte y tres láminas por cada muestra. En este caso únicamente se han analizado dos cortes, el de Almonaster la Real y el de Veredas.

A continuación, veremos el funcionamiento del programa (ver también la explicación del funcionamiento informático dada en el apéndice A) y los problemas que éste ha planteado, una vez ya hemos explicado la motivación y los detalles técnicos que nos han llevado a su creación. Como ya hemos comentado, *PLAG-9* es un programa que tiene como objetivo la determinación de la orientación cristalográfica preferente (OCP) de las plagioclasas y que se basa en las curvas de los estereogramas de Burri *et al.* (1967) para las leyes de macla normal y paralela o compleja.

El programa se concibió ante la enorme dificultad de aportar conclusiones prácticas e importantes al estudio sistemático de la OCP de las plagioclasas en las metabasitas de Acebuches, ya que el tratamiento de este tipo de datos requiere de una gran cantidad de cálculos matemáticos y comprobaciones que son imposibles de realizar manualmente. Con la elaboración de *PLAG-9* se superan dichas limitaciones. Un estudio tan detallado sobre OCP de plagioclasas como el llevado a cabo en este trabajo requería de un programa muy complejo que hiciese los cálculos y fuese archivando los resultados para poder representarlos, posteriormente, con un programa de proyección estereográfica como el programa *Stereonet* de la *Suite Rock Works* (que ha sido el que hemos empleado en este trabajo), y así poder obtener conclusiones prácticas acerca de los patrones de fábrica y de deformación a partir de los diagramas de densidad de polos.

La elaboración del programa planteó numerosos problemas, no sólo por la complejidad de la programación sino también por las limitaciones del propio lenguaje utilizado, especialmente en cuanto a su sistema de archivos y a la insuficiente memoria que es capaz de gestionar. Dado que en un principio no sabíamos con certeza la envergadura que adquiriría el programa, ignorábamos que se plantearían bastantes problemas en su ejecución y en la finalización del mismo. Y es que fue en una etapa muy avanzada de la programación cuando descubrimos que QuickBasic es un tipo de lenguaje de programación que se queda muy corto para un programa de tanta dimensión y complejidad en sus cálculos. Además, como los problemas empezaron a manifestarse en una etapa muy avanzada, se prefirió no cambiar a otro lenguaje de programación diferente, que aunque hubiera podido parecer más efectivo, habría supuesto sin embargo la necesidad de cambiar toda la programación realizada hasta el momento, con todas las pegas e inconvenientes que ello hubiera supuesto.

La redacción del programa ha necesitado de un calibrado continuo debido al gran volumen de datos que maneja en sus cálculos, así como por la gran cantidad de variables que utiliza: de entrada (*input*), de cálculo, de operaciones intermedias, de resultados y variables de archivado, presentación, impresión y borrado. Superan, como ya se ha comentado, las 2000 en total. Este número tan alto se debe a que mientras se está procesando un grano, los datos introducidos por teclado y todos los utilizados en los cálculos intermedios y, finalmente, los resultados obtenidos, deben denominarse independientemente para evitar errores y definiciones duplicadas según sea un resultado, por ejemplo, para escribirlo en el archivo o sacarlo de él, para imprimirlo o presentarlo en pantalla, etc. Esa es la razón del gran número de variables que se mantienen en la memoria del programa mientras dura el proceso de los cálculos que éste realiza, aunque al introducir un nuevo grano el programa parte de cero, sustituyendo los valores de las variables del grano inmediatamente anterior por los suyos propios. Los nombres de las variables son cortos y mnemotécnicos en la medida de lo posible. Se han evitado los nombres largos que, aunque pudieran resultar más intuitivos, habrían hecho mucho más larga la redacción del programa lo que, por consiguiente, hubiera ido en perjuicio de la memoria disponible. Se ha seguido, además, el sistema de presentar en pantalla los resultados de cálculos intermedios que llevan a la consecución del resultado final, para así poder comprobar posibles errores de programación que, de otra manera, hubieran pasado inadvertidos. De este modo, se fue cotejando cada paso del proceso con los mismos cálculos realizados a mano. Estas presentaciones

en pantalla, totalmente necesarias para el calibrado del programa y que ya no lo serían en el momento en que éste estuviese terminado, también contribuyeron a colapsar la memoria del QuickBasic. Por otro lado, se dotó al programa de una presentación en color para que resultara más claro y ameno en su manejo, aunque todo ello requirió, como es lógico, de una gran cantidad de instrucciones adicionales que contribuyeron también a los problemas de memoria.

También se presentaron dificultades en lo referente al sistema de archivos, ya que QuickBasic no ofrece muchas facilidades en este sentido. Se comenzó con el empleo de archivos *aleatorios*, los cuales permiten un acceso fácil y seguro ante cualquier necesidad de archivado o lectura de datos. Dada la gran cantidad de datos archivados y la complejidad de los mismos, este tipo de archivos plantearon continuos problemas de lectura con las consiguientes interrupciones del programa. Finalmente, se optó por cambiar a archivos de tipo *secuencial* en aquellos procesos en el que los datos se archivaban todos juntos, en bloque, y siempre de la misma manera. La mayor ventaja de los archivos *secuenciales* es el aprovechamiento máximo del espacio de almacenamiento, de modo que los registros quedan dispuestos en orden, unos a continuación de otros en el mismo orden en el que fueron introducidos. Los archivos de acceso *aleatorio* difieren de los *secuenciales* en que el tamaño o longitud de los registros no varía en función del tamaño de los campos que lo componen. Uno de los inconvenientes de utilizar archivos *aleatorios* es que al utilizar registros de longitud fija se malgasta espacio al colocar información de menor longitud de la establecida para cada registro. Sin embargo, una ventaja considerable es su rapidez de acceso; por ejemplo, si se desea leer el registro 221 se va directamente a este número de registro sin necesidad de leer los 220 primeros. Esta fue la razón por la que en algunos momentos se emplearon los archivos *aleatorios*, como por ejemplo en la *estadística* de los tipos de planos de ajuste y el tipo de plagioclasas. En ciertos casos como en éste, la lectura de los registros contenidos en un archivo *secuencial* resultó complicada y el programa se interrumpía al exceder en su lectura el final del archivo, produciendo el mensaje de error *Input past end* (“lectura pasado el final”) que se presenta cuando se intentan leer más registros de los que realmente existen en el archivo. Estos problemas se presentaban incluso con la utilización de la instrucción EOF, que permite conocer si el archivo tiene más registros de los que se pretenden leer.

Otro punto a tener en cuenta que dio extensión al programa fue la realización de continuas comprobaciones en cuanto a la entrada de datos por teclado. Esto fue necesario para verificar que los datos medidos con la platina universal no se desviaban de los valores esperados. Hablamos del llamado *control de errores* que consiste en que, por ejemplo, no aceptara como nombre de eje óptico ninguna letra que no fuera X, Y ó Z, y siempre en letras mayúsculas. En estos casos, el programa advierte con un aviso sonoro para evitar que, con la rutina de introducir los datos de un modo tan reiterativo, se produzcan errores que tendrían consecuencias irreversibles en la grabación de los datos en los archivos. Esto proporciona mayor seguridad en los datos que introducimos y mayor libertad de trabajo. Además, en el caso de que el programa advierta un error, el cursor retrocede y queda a la espera de que introduzcamos nuevamente el dato correcto. Este *control de errores*, totalmente imprescindible, también contribuyó a aumentar la memoria de gestión del programa.

Como se puede comprobar, el QuickBasic presentó bastantes limitaciones que ocasionaron continuos cambios en la programación. Al final, el programa tuvo que ser dividido inevitablemente en dos partes, como se verá más adelante.

Tipos de Archivos

Por cada muestra se generan 16 archivos diferentes, uno por cada elemento cristalográfico, con las coordenadas angulares (*azimut* y buzamiento) de todos los granos medidos en las tres láminas de la muestra. En un principio se pensó en la eventualidad de analizar hasta tres cortes distintos en las anfibolitas de Acebuches (aunque finalmente sólo fueron dos, Almonaster la Real y Veredas). Por lo tanto, el programa se dimensionó para generar como máximo 1175 ficheros que se organizan de la siguiente manera: 2 ficheros de arranque del programa (PLAGIOCL y LAM) + 384 ficheros por cada uno de los tres cortes (16 archivos por cada una de las 24 muestras de cada corte) + 7 ficheros adicionales por corte. A continuación se puede ver en la Tabla III.4 el listado de archivos a los que se hace referencia.

Los elementos cristalográficos se enumeran del 1 al 16. Se corresponden, respectivamente, con: [001], [010], [100], $\perp[100]/(010)$, $\perp[001]/(010)$, (010), (001), (021), $(0\bar{2}1)$, (100), (110), $(1\bar{1}0)$, $(\bar{2}01)$, ejes X, ejes Y y ejes Z. Los archivos DATOS-L1, L2 y L3 son aquellos en los que se almacenan los datos de *azimut* y buzamiento de cada lámina (L1: paralela al plano de foliación, L2: paralela a la lineación o dirección de buzamiento y perpendicular al plano de foliación, L3: perpendicular a la lineación o según la dirección de la foliación). Los archivos LAMINA-1, -2 y -3 corresponden a los datos (*azimut* y buzamiento) del conjunto de láminas 1, 2 y 3, independientemente de la muestra a la que corresponden. Los archivos ESTADI son aquellos en los que se guardan los datos de la estadística sobre la frecuencia de ajuste a cada tipo de macla y la uniformidad de Ajne.

TABLA III.4. Relación de archivos que crea el programa PLAG-9 para cada uno de los cortes geológicos (Corte 1: Almonaster la Real, Corte 2: Veredas, Corte 3: Aracena). En los archivos del tipo, por ejemplo, A-01-01, las letras A, B ó C hacen referencia a los cortes 1, 2 o 3, respectivamente. Los siguientes dos dígitos hacen referencia al número de la muestra de ese corte, y los dos últimos dígitos designan el elemento cristalográfico. Ver texto para más detalle.

Corte 1 Almonaster la R.	Corte 2 Veredas	Corte 3 Aracena
DATOS-L1.C1	DATOS-L1.C2	DATOS-L1.C3
DATOS-L2.C1	DATOS-L2.C2	DATOS-L2.C3
DATOS-L3.C1	DATOS-L3.C2	DATOS-L3.C3
LAMINA-1.C1	LAMINA-1.C2	LAMINA-1.C3
LAMINA-2.C1	LAMINA-2.C2	LAMINA-2.C3
LAMINA-3.C1	LAMINA-3.C2	LAMINA-3.C3
ESTADI-1	ESTADI-2	ESTADI-3
A-01-01	B-01-01	C-01-01
.	.	.
.A-01-16	.B-01-16	C-01-16
.	.	.
A-02-01	B-02-01	.C-02-01
.	.	.
A-02-16	B-02-16	C-02-16
.	.	.
A-24-01	B-24-01	C-24-01
.	.	.
A-24-16	B-24-16	C-24-16
PLAGIOCL LAM		

En un principio, se pensó en crear un solo archivo con los datos de todas las muestras y un *programa puente* que fuese leyendo el archivo generado por el programa para transformar los datos de las muestras generados en archivos legibles para el programa de proyección estereográfica *Stereonet* de la *Suite Rock Works 9*. De este modo, se podrían leer selectivamente los datos necesarios del archivo global e ir tomando sólo y exclusivamente los que se desearan representar. Esto resultó problemático, especialmente por los inconvenientes de lectura de los archivos *secuenciales*, y no se encontró seguridad en los resultados. Finalmente, y después de conseguir reducir la extensión de la primera parte del programa, se cambió la filosofía en la forma de archivar los datos (un archivo por elemento cristalográfico y muestra) y se incluyeron en la primera parte del programa. De esta manera, conseguimos que el programa generase directamente los archivos para *Stereonet*, lo cual resultó más cómodo y seguro, además de ahorrar tiempo. El programa *Stereonet* no abre los archivos directamente sino que es necesario importar los datos con la opción *Import ASCII Space-delimited File* y luego, si se quiere,

guardarlos con el formato propio del programa (.atd). Además, los archivos también pueden abrirse, sin problemas, con otros programas como Word, Excel, etc.

Partes del programa

Como se ha comentado anteriormente, el programa tuvo que ser dividido en dos partes independientes (*PLAG-9-1* y *PLAG-9-2*) pero interrelacionadas. A pesar de esta división, que se verá a continuación, durante la ejecución de la primera parte el QuickBasic llegó en bastantes ocasiones a quedarse sin memoria y fue necesario reestructurarla repetidas veces. La división no se aprecia en el funcionamiento del programa, se pasa de una parte a otra sin que el usuario se dé cuenta. Ambas están compiladas por seguridad en el manejo, de modo que sólo la primera parte (*PLAG-9-1*) es autoejecutable y desde ella se accede a *PLAG-9-2*. Para que el programa empiece a funcionar tiene que introducirse una clave de seguridad de seis dígitos. Con ello se evitan actuaciones indebidas que pudieran dañar accidentalmente el programa o la base de datos. Para más detalle sobre el funcionamiento del programa, ver el apéndice A (explicación gráfica del funcionamiento del programa).

Primera parte (*PLAG-9-1*)

Se optó por dejar en la primera parte del programa (*PLAG-9-1*) la entrada de datos de granos, con los cálculos necesarios para la obtención de los resultados finales y su archivado.

- En esta parte se introducen los datos de platina (dirección de inmersión e inmersión) de cada grano, es decir, los datos de los ejes ópticos de cada individuo del cristal maclado (recordemos que la platina universal es de 4 ejes y sólo se pueden medir dos de los tres ejes ópticos en cada uno de los individuos).
- A continuación se introducen los datos del plano de macla o de asociación.
- Seguidamente, el programa transforma, mediante los cosenos directores (ec.3.1), las coordenadas de platina en coordenadas cartesianas, y a partir de ellas calcula el *azimut* para el plano de asociación y para los cuatro ejes medidos en cada grano maclado.
- Mediante el producto escalar, calcula los ángulos entre los ejes de cada individuo (para comprobar si son ortogonales) y obtiene los terceros ejes, el eje de hemitropía y el ángulo que éste forma con el plano de asociación (*PA-EH*).
- A continuación, rota el eje de hemitropía a las cuatro posibles posiciones y calcula los ángulos entre éstas y los puntos de las curvas de Burri *et al.* (1967), teniendo en cuenta que según sea el ángulo *PA-EH* el programa comparará el eje de hemitropía rotado con las curvas de ley de macla normal ($PA-EH \approx 90^\circ$) o de ley de macla paralela o compleja ($PA-EH \approx 0^\circ$). Como los datos de las curvas de Burri *et al.* (1967) están en coordenadas angulares (*azimut* y *buzamiento*), las transforma a coordenadas cartesianas para que, mediante el producto escalar entre vectores, calcule dichos ángulos. Una vez que el programa hace todos los posibles ajustes

a cada punto (son un total de 20 puntos cada curva, que abarcan todas las composiciones entre An_0 y $An_{92.5}$), elige el menor de ellos y proporciona el plano y el nombre de la macla de ajuste, el porcentaje de anortita que le corresponde y cuál ha sido, de las cuatro posiciones del eje de hemitropía, la que ha ajustado mejor. El ángulo ideal de mejor ajuste será 0° , en cuyo caso indicaría que el eje de hemitropía coincide exactamente con uno de los puntos de las curvas, caso no muy frecuente pero posible; de hecho, se ha observado que sucedía en algún caso. La experiencia ha demostrado que de las cuatro posiciones del eje de hemitropía, la de mejor ajuste ha proporcionado ángulos significativamente menores que las otras tres.

- Una vez hecho esto, el programa deshace la rotación del eje de hemitropía hasta llevarlo a su posición inicial, junto con el resto de elementos cristalográficos determinados, y pasa a calcular las coordenadas cartesianas del plano de macla de ajuste, del resto de direcciones y planos cristalográficos que figuran en los estereogramas de Burri *et al.* (1967) y de la indicatriz óptica (ejes X, Y y Z) para el mismo porcentaje de anortita que el obtenido para el plano de ajuste.
- Finalmente, se archivan los datos obtenidos (ver Tabla III.4 para el sistema de archivado).

Segunda parte (PLAG-9-2)

En la segunda parte del programa se han incluido el resto de las opciones, que son:

- *Mostrar los datos de granos en pantalla.* Se puede elegir el corte, número de muestra, lámina y grano a partir del cual se desea visualizar la base de datos, es decir, las coordenadas de platina, angulares y cartesianas de los ejes ópticos de cada individuo, del plano de asociación, del eje de hemitropía y el ángulo PA-EH.
- *Impresión de datos de granos.* Se imprimen los datos anteriores para cada grano, tres por página, con la fecha de impresión y la paginación correspondiente.
- *Borrado de archivos.* Aunque el borrado se puede realizar desde el *Explorador* de Windows, es aconsejable utilizar la opción del programa para evitar la manipulación manual de los archivos y el consiguiente riesgo que ello conlleva. Esta opción es la única que, por seguridad, exige una clave de acceso propia.
- *Estadística.* Eligiendo el corte y número de muestra se puede ver el porcentaje de planos de macla de mejor ajuste y el contenido en anortita de las plagioclasas.
- *Test de uniformidad de Ajne.* También da la opción de elegir el corte y la muestra, así como si se desea calcular el estadístico de un elemento cristalográfico concreto o el de todos los de la muestra. En este último caso, el proceso puede tardar varios minutos debido al gran volumen de datos que maneja en los cálculos, indicándose el progreso del mismo en una *barra de estado*.
- *Menú principal.* Se pasa a la primera parte del programa para continuar con la entrada manual de datos. En esta ocasión, cada vez que se pasa de *PLAG-9-2* a *PLAG-9-1*, no se solicita la clave de acceso al programa para mayor comodidad, evitando así interrupciones innecesarias.

3.5. PROYECCIÓN ESFÉRICA DE LOS DATOS DE OCP DE PLAGIOCLASAS: USO DEL PROGRAMA “STEREONET”

Para la proyección estereográfica de polos y la elaboración de diagramas de densidad de contornos hemos empleado el programa informático *Stereonet*, de la *Suite RockWorks 99*, como ya se ha comentado en apartados anteriores. En el caso de la realización de los diagramas de densidad, hemos elegido como sistema de representación para todas las muestras (excepto para la muestra 4 de Veredas) la función esférica *gaussiana* (*continuous-weighting function*) junto con el método porcentual (Robin & Jowett, 1986). Se han elegido estas opciones y no, por ejemplo, la función *Step* o el método de desviación estándar de Kamb (1959) por las siguientes razones:

(1) La función *Step* es la función convencional de conteo, y se diferencia de la esférica *gaussiana* en que el valor que se le da a cada nodo o estación de conteo² es el mismo, independientemente de la distancia angular entre cada punto y el nodo de la malla. Por lo tanto, los valores posibles son 0 ó 1, dependiendo de si el punto en cuestión queda dentro o no del área de conteo. Esta función es conveniente, y más sencilla de utilizar, cuando el proceso de conteo se hace a mano, mientras que si se hace informáticamente es preferible utilizar otro tipo de función como la *gaussiana*, la cual no le concede a todos los puntos el mismo “peso” o importancia, sino que lo hace en función de la distancia angular entre cada punto y el nodo de la malla de conteo. Por otro lado, la función de *Gauss* representa las líneas de igual densidad de contornos de una manera más suavizada y regularmente espaciada que cualquiera de las posibles opciones utilizando el círculo de conteo.

(2) El método de Kamb (1959) no ha sido empleado porque durante un estudio preliminar de la proyección esférica de los datos, se observó que el uso de los contornos basados en el número de desviaciones estándar a partir de E (valor esperado para una población con distribución uniforme) no proporcionaban tanta información como aquellos basados en el número o porcentaje de la población (método porcentual). Sólo en la muestra 4 del corte de Veredas se ha utilizado el método de Kamb debido al reducido número de granos (81) medidos con la platina universal.

La función esférica *gaussiana* es la misma función que la propuesta por Fisher (1953) como modelo para la dispersión de datos en una esfera y alrededor de un máximo preexistente. Es recomendada por Robin & Jowett (1985) como función más idónea para el tratamiento de datos estructurales, mejor incluso que el método del círculo de conteo estándar (función *Step*). Con la función esférica *gaussiana* se calcula el valor de las densidades de polos en los nodos de una malla de conteo utilizando la función de peso de Gauss. Al igual que en el caso de la función *Step*, el programa *Stereonet*, usado para determinar los valores de las densidades, utiliza una malla de 67 x 67 nodos. El “peso” de cada nodo o estación de conteo se ve incrementado en una cantidad proporcional a la distancia angular entre cada punto de la muestra representada y el nodo de la malla. Cada localización del nodo o estación de conteo es recalculada para encontrar sus

² Se trata de una dirección fija que sirve como eje para el “cono de conteo”, es decir, es un punto fijo en la esfera que sirve como centro para el círculo de conteo o su equivalente gaussiano. Aunque las estaciones de conteo no necesitan ser equidistantes unas de otras, es preferible que se encuentren a distancias aproximadamente iguales.

coordenadas espaciales (3D) en la esfera. El valor asignado a un nodo dado por cada polo de la muestra viene dado por la siguiente ecuación:

$$w = \exp [k (\cos q - 1)] \quad (3.12)$$

donde q es el ángulo entre el dato en cuestión y la estación de contaje. Cuanto más cercano se encuentre un punto a la estación de contaje (q más pequeño), mayor es el valor de w . Si el ángulo es de 0° , entonces w es igual a 1. Los ángulos mayores resultan en menores valores de w , hasta que, finalmente, habrá polos que no influirán en la estación de contaje. Comparando esto con la función *Step*, donde los únicos resultados posibles son 1 ó 0 en función de que el polo quede dentro o fuera, respectivamente, de un cono de contaje con centro en el nodo, queda claro que en la función esférica *gaussiana* el “peso” o importancia de cada polo varía en función de su distancia al nodo de medida en cuestión y no de su presencia dentro de un área de influencia. Todo esto resulta en valores de densidad mucho más suavizados que en el caso de la función *Step*.

Una vez hemos elegido la función esférica *gaussiana* como método de representación, tenemos que atender a otros dos aspectos: el factor de peso (*weighting factor*) y el valor mínimo de Gauss. El factor de peso es la variable k de la ecuación (3.12). Se puede decir que k es, de alguna manera, equivalente al área de búsqueda del método de la función *Step*, aunque los números en sí mismos son bastante diferentes. El valor equivalente de k para un área de búsqueda de 0.01 (1% del área total de la proyección) es de 100. El hecho de que k disminuya tiene el mismo resultado que un incremento en el área proporcional de búsqueda. Cuanto mayor sea k , menor será el área en cuestión. En otras palabras, cuanto menor sea k , mayor será el tiempo de ejecución de los cálculos llevados a cabo por el programa. Como ya se ha indicado, variar el valor de k en la ecuación (3.12) es equivalente a la variación de α (apertura del área del cono de contaje).

Para una muestra de n datos tomados de una población con distribución uniforme sobre la esfera, el valor esperado (obtenido de la integración de la ecuación 3.12) según sea el área de contaje, será:

$$E = n [1 - \exp (-2k)] / 2k \quad (3.13)$$

para valores de k de 3 ó 4, $\exp (-2k)$ llega a ser despreciable comparándolo con la unidad. Es por ello que, para una mejor aproximación, el valor esperado utilizando la función de Gauss es el mismo que si utilizáramos un círculo de contaje de área A_e , dado por la ecuación:

$$A_e = 1 / 2k \quad (3.14)$$

Así, por ejemplo, cuando tomamos $k = 100$, esto es equivalente a utilizar un círculo de conteo convencional con un radio de 8.11° ($\cos \alpha = 0.99$), lo cual corresponde a un área A_e de 0.005.

En cuanto al valor mínimo *gaussiano*, éste es el valor de w más pequeño aceptable de ser usado cuando se evalúa el efecto de un polo concreto sobre cada estación de conteo. Como ya se dijo más arriba, cuanto mayor sea el ángulo entre la estación de conteo y un punto, menor será el valor de w . El valor mínimo *gaussiano* aconsejado por el programa *Stereonet* es de 0.05. Cuanto menor sea éste, más tiempo tarda el programa en procesar los datos ya que debe chequear más polos. Dependiendo del número de datos, un valor mínimo de 0.1 podría ser aceptable. Por ejemplo, si el valor mínimo *gaussiano* fuera ajustado a 0.1 para una estación de conteo en particular, podrían omitirse 10 polos de una distribución ideal uniforme debido a que se encontrarían demasiado lejos del nodo, de modo que la estación de conteo perdería un valor total de 1 punto (0.1×10), que es más de lo que podría haber perdido con un valor mínimo *gaussiano* más pequeño. En nuestro caso, hemos elegido usar como valor mínimo el aconsejado por el programa, 0.05. Dependiendo del valor mínimo elegido, el programa determinará cuál será el cono de búsqueda para un valor particular de k .

3.6. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE OCP DE PLAGIOCLASAS EMPLEADAS EN ESTE TRABAJO

Para el tratamiento de los datos esféricos se han empleado diferentes técnicas de análisis estadístico. Consisten en el test de bondad de ajuste a la distribución de Watson, el test de uniformidad de Bingham (test paramétrico) y el test de uniformidad de Ajne (no paramétrico). Se han aplicado cada uno de ellos a todas las muestras de los cortes de Almonaster la Real y Veredas en las que se ha estudiado con la platina universal la orientación cristalográfica preferente (OCP) de las plagioclasas. Los datos se han tratado como datos axiales y no como vectoriales. En tal caso, se pueden esperar dos tipos diferentes de distribuciones sencillas: en máximos (*bipolar distribution*) y en corona³ (*girdle distribution*). Entre ambos casos extremos existen otros tipos intermedios como las distribuciones según coronas incompletas y, ocasionalmente, las distribuciones isótropas o uniformes (siempre hablando desde un punto de vista estadístico). Además, en el caso de las OCP reales, habría que considerar otros tipos de distribuciones, como las multimodales o las de ajuste a círculos menores, para las que no existen pruebas estadísticas rigurosamente desarrolladas.

Una vez se ha identificado el tipo de distribución al que se ajusta cada muestra, según una serie de procedimientos que se detallarán más adelante, se pueden evaluar ciertas hipótesis concernientes a las poblaciones estudiadas como, por ejemplo, si la población es isótropa, es decir, si presenta uniformidad o si por el contrario existe algún eje preferente de orientación estadística de los elementos de la población, en cuyo caso será interesante conocer cuál es el eje polar (caso de distribución en corona) o eje principal (caso de distribución bipolar). Se puede comprobar también si existe simetría rotacional alrededor de tales ejes y cuál es el parámetro de concentración (K) de la distribución, y si es posible determinar el grado de simetría entre la distribución estudiada y los ejes de deformación finita, etc.

En principio, podemos partir de una serie de suposiciones previas sobre la naturaleza de la distribución (por ejemplo, distribución bipolar pero no necesariamente con simetría rotacional), en cuyo caso sólo dispondremos de métodos sencillos (uso el término “sencillo” para referirme a métodos basados en unas suposiciones de partida y que, por tanto, son de amplia aplicabilidad). Por otro lado, podemos sentirnos justificados en utilizar modelos paramétricos como el de Watson para distribuciones polares, permitiéndonos utilizar, en estos casos, métodos y técnicas más potentes y especializadas.

En un principio, se puede proceder de dos maneras distintas para abordar el problema del tratamiento estadístico de los datos. Por un lado, podríamos no partir de suposiciones previas sobre la naturaleza de la distribución, en cuyo caso podríamos utilizar algunos métodos o procedimientos sencillos denominados no paramétricos. Por otro lado, podríamos evaluar la suposición de que nuestra muestra se ajustase a algún tipo de distribución conocida y aplicar un modelo paramétrico, como la distribución de Watson para datos bipolares y en corona.

³ En algunas publicaciones en castellano, se prefiere utilizar el término guirnalda. Pensamos que ambos vocablos son apropiados, aunque preferimos el uso de la palabra corona.

El tensor de orientación

Existen algunas cuestiones importantes en la etapa de análisis de datos: (1) si la distribución es uniforme, en corona o en máximos, (2) si existe isotropía alrededor del eje principal (caso de los máximos) o alrededor del eje polar (caso de las coronas), (3) si la distribución, en el caso de ser en corona, es según un círculo mayor o menor de la proyección, (4) si existe simetría respecto al eje polar y/o principal de la distribución, etc. Estas cuestiones pueden ser a menudo resueltas mediante la descripción cualitativa de los diagramas de densidad de contornos. Sin embargo, desde el punto de vista estadístico es posible dar una respuesta semicuantitativa a dichas cuestiones mediante el cálculo del tensor de orientación de la muestra. Dicho tensor viene dado matemáticamente mediante la siguiente matriz (Scheidegger, 1956):

$$T = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix}$$

siendo $(x_i, y_i, z_i), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ las coordenadas cartesianas del conjunto de vectores unidad o ejes.

Los autovalores de esta matriz pueden ser utilizados para verificar el ajuste de nuestras muestras a la distribución de Bingham o, simplemente, para proyectarlas en un diagrama de Woodcock (se verá en el apartado 3.6.4), donde se muestran los distintos tipos de distribuciones (incluyendo la de Watson) que son contempladas por la distribución de Bingham.

Cálculo de los autovalores de una matriz aplicado al caso de la matriz T

En álgebra, el producto $\mathbf{AX}$ (donde $\mathbf{A}$ es una matriz cuadrada a la que hemos llamado tensor orientación $\mathbf{T}$ en el apartado anterior y $\mathbf{X}$ es un vector columna), puede ser escrito como $\lambda \mathbf{X}$, donde λ es un escalar (es decir, el autovalor o valor característico). Así, se cumple la condición siguiente:

$$[\mathbf{A}] [\mathbf{X}] = \lambda [\mathbf{X}] \quad (3.15)$$

en la que el vector $\mathbf{X}$ es transformado por la matriz $\mathbf{A}$, de modo que el vector resultante es paralelo al vector original (soluciones triviales). En ese caso, la ecuación (3.15) puede escribirse como:

$$([\mathbf{A}] - \lambda \mathbf{I}) [\mathbf{X}] = 0 \quad (3.16)$$

La ecuación (3.16) es equivalente a un conjunto de ecuaciones homogéneas y valores diferentes a cero para el vector $\mathbf{X}$, lo cual corresponde a soluciones distintas a cero para el conjunto de ecuaciones. Esto puede existir sólo si se cumple la condición:

$$|\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}| = 0 \quad (3.17)$$

Si se resuelve la ecuación (3.17) se obtiene:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (3.18)$$

Si se hace este determinante igual a cero, se podrá calcular el valor de λ . En ese caso, se obtendrá un polinomio de grado n . A dicho polinomio se le llama ecuación característica de la matriz y sus n raíces son los llamados autovalores. La ecuación característica tendrá la forma siguiente:

$$\lambda^n - (a_{11} + a_{12} \dots + a_{nn}) \lambda^{n-1} \dots + (-1)^n |\mathbf{A}| = 0 \quad (3.19)$$

En nuestro caso, como el tensor orientación $\mathbf{A}$ ó $\mathbf{T}$ (es lo mismo) es una matriz de orden tres, el polinomio de la ecuación (3.19) será de orden $n=3$ y obtendremos, por lo tanto, tres autovalores (λ_1 , λ_2 y λ_3) a los que llamaremos en próximos apartados: τ_1 , τ_2 y τ_3 , siendo τ_1 el autovalor mayor y τ_3 el menor. Si se divide cada uno de los valores entre el número de datos de la muestra, obtendremos los autovalores normalizados: $\bar{\tau}_1 = \tau_1 / n$, $\bar{\tau}_2 = \tau_2 / n$ y $\bar{\tau}_3 = \tau_3 / n$.

Cálculo de los autovectores de una matriz aplicado al caso de la matriz $\mathbf{T}$

El teorema de la existencia de soluciones diferentes a cero para un sistema de ecuaciones homogéneas, muestra que para cada valor de λ encontrado existirá un vector columna $\mathbf{X}$ diferente a cero, tal que:

$$([\mathbf{A}] - \lambda \mathbf{I}) [\mathbf{X}] = 0, \text{ ó lo que es lo mismo: } [\mathbf{A}] [\mathbf{X}] = \lambda [\mathbf{X}] \quad (3.20)$$

El vector columna **X** es también llamado autovector columna correspondiente al autovalor λ dado. Serán tres autovectores los que se obtengan, y a los que llamaremos t_1 , t_2 y t_3 en próximos capítulos (t_1 será el autovector asociado al autovalor mayor τ_1 , y así respectivamente).

El cálculo de los autovalores y autovectores de las muestras no se realiza manualmente sino que se obtiene directamente con el programa *Stereonet* para Macintosh. En general, la determinación numérica de los autovalores y autovectores se obtendrá, en el caso que nos ocupa, para polinomios de grado igual o inferior a tres.

3.6.1. Tipos de distribuciones ideales de datos axiales esféricos. Test de uniformidad de Bingham

El principal y, hasta el momento, único tipo o modelo de distribución de datos esféricos axiales es la distribución de Bingham. El test de uniformidad de Bingham (1964) es de tipo paramétrico ya que se basa en el uso de la distribución de Bingham, y el estadístico del test viene dado por la siguiente ecuación (Mardia, 1972):

$$Su = \left(\frac{15n}{2} \right) \sum_{i=1}^3 \left(\bar{\tau}_i - \frac{1}{3} \right)^2 \quad (3.21)$$

donde n es el número de datos de la muestra y $\bar{\tau}_i$ son los autovalores normalizados del tensor orientación **T**, y que en este trabajo se han obtenido a través del uso del programa informático *Stereonet* para Macintosh. El valor crítico del test viene dado por el valor de la distribución χ^2_5 para un nivel de significación del 5% ($\alpha=0.05$), y es de 11.07. Para valores del estadístico $Su \leq 11.07$ se acepta la uniformidad. En caso contrario se rechaza, lo que significa, desde un punto de vista estadístico, que existe una dirección media preferente. En el apartado 3.6.2 se hablará con más detalle de la distribución χ^2 . Una característica significativa del estadístico Su es que su valor es indicativo del grado de agrupación (*clustering*) de los polos alrededor de los autovectores. Por tanto, valores altos de Su implican una alta intensidad en la fábrica, ya que éstas se alejan más de la uniformidad, lo que significa que hay más posibilidades de que exista una dirección preferente en el patrón de los diagrama de densidad de polos de las muestras.

A diferencia del test de uniformidad de Ajne, cuyos cálculos se programaron e incluyeron en el programa *PLAG-9* debido a su gran complejidad, en el caso del cálculo de la uniformidad de Bingham no fue necesario y se realizó con el programa Excel.

La distribución de Watson (ver apartado 3.6.2), caso especial de la distribución de Bingham, ha sido atribuida en algunas ocasiones a Dimroth (1962) o a Scheidegger (1965). Se trata del modelo básico para datos no vectoriales, es decir, para distribuciones de datos axiales

con simetría rotacional tanto en el caso de distribución bipolar como en el de corona. La forma general de la distribución (p.d.f)⁴ es (Fisher *et al.*, 1987):

$$h(\theta, \Phi) dS = Cw \exp [K (\sin \theta \sin \alpha \cos (\phi - \beta) + \cos \theta \cos \alpha)^2] dS \quad (3.22)$$

donde

$$Cw = 1 / [4 \pi \int_0^1 \exp (-K \mu^2) d\mu] \quad (3.23)$$

Por lo tanto, la p.d.f. es:

$$f(\theta, \phi) = Cw \exp [K (\sin \theta \sin \alpha \cos (\phi - \beta) + \cos \theta \cos \alpha)^2] \sin \theta \quad (3.24)$$

$$(0 \leq \theta \leq \pi; 0 \leq \phi \leq 2\pi)$$

Hay tres parámetros: K , α y β (al igual que en la distribución de Fisher). α y β (o los cosenos directores equivalentes $[\lambda, \mu, \nu]$) son los ángulos que corresponden a la orientación del eje medio. Son los parámetros de localización, teniendo la distribución simetría rotacional alrededor del eje $\pm (\lambda, \mu, \nu)$. A este eje se le llama eje principal en el caso de la distribución bipolar, y eje polar para el caso de distribución en corona. K es el parámetro de forma (*shape*) tal y como lo entendemos en los gráficos de Woodcok, y puede tener un valor positivo o negativo. Para valores positivos de K la distribución es bipolar y para valores negativos es en corona. Para el mayor valor de $|K|$, el máximo de la distribución se concentra en el caso bipolar ($K > 0$), alrededor de los polos α, β y $(\pi - \alpha, \beta \pm \pi)$; mientras que el máximo en las coronas ($K < 0$) se concentra alrededor de un círculo mayor normal a (α, β) . De este modo, a K se le llama también parámetro de concentración. De acuerdo con la notación seguida en este trabajo, θ y ϕ corresponden a las coordenadas angulares (*azimut* y *buzamiento*) de cada elemento de la población. La notación de la distribución de Watson es:

$$W \{(\alpha, \beta), K\} \text{ ó } W \{(\lambda, \mu, \nu), K\} \quad (3.25)$$

⁴ (p.d.f) *probability density function* (función de densidad de probabilidad).

Las formas límites de la distribución son:

- Cuando $K = 0$; $W\{(\alpha, \beta), K\}$ llega a ser la distribución uniforme esférica. En dicha distribución todas las direcciones (θ, ϕ) son igualmente probables, de modo que la distribución está repartida uniformemente sobre la superficie de la esfera.
- Cuando $K \rightarrow \infty$; se trata de la distribución bipolar de Watson, donde $W\{(\alpha, \beta), K\}$ tiende a una total concentración alrededor de los extremos del eje principal: α, β y $(\pi - \alpha, \beta \pm \pi)$.
- Cuando $K \rightarrow -\infty$; se trata de la distribución en corona, donde $W\{(\alpha, \beta), K\}$ tiende a una distribución totalmente concentrada según un círculo mayor en el plano normal al eje polar.

Otro ejemplo del uso de los modelos paramétricos es el conjunto de test basados en la distribución de Bingham en su forma general (siendo el caso bipolar y corona de Watson formas especiales de ésta). Hay dos razones que dificultan el uso de esta distribución general: (1) la dificultad de chequear la bondad de ajuste a la distribución de Bingham para una serie de datos, y (2) muchos de los casos para los que se puede utilizar la distribución de Bingham pueden ser tratados adecuadamente utilizando otros métodos más sencillos descritos en este capítulo. Especialmente, en relación con este último punto, los tres ejes característicos de la distribución de Bingham son justamente los autovectores de la matriz orientación ya explicada en el apartado 3.6. Por otro lado, las regiones de confianza que Fisher *et al.* (1987) recomiendan calcular para los ejes individuales mediante técnicas sencillas son, en muchos casos prácticos, esencialmente las mismas que aquellas basadas en la teoría de Bingham. Pero no sólo se han observado dificultades a la hora de chequear la bondad de ajuste a la distribución de Bingham, sino también para el caso del test de uniformidad de Ajne, que es de tipo no paramétrico y que comentaremos más adelante. Ninguno de ellos ha resultado ser del todo representativo y fiable para distinguir el tipo de distribución de las muestras, las cuales han resultado ser demasiado complejas, en la mayoría de los casos, para el estado actual del tratamiento estadístico de datos esféricos. En este sentido, se han observado con frecuencia contradicciones importantes entre los valores de los estadísticos de ambos test, es decir, en lo referente a la aceptación y/o rechazo de la uniformidad y a los patrones de distribución observados en los diagramas de densidad. Esta es la razón por la que los datos que se obtienen de la estadística hay que tomarlos con precaución.

3.6.2. Bondad de ajuste a la distribución de Watson

Como se ha indicado, existen dos tipos de distribuciones de Watson: en máximos (distribución bipolar) y según círculos mayores (distribución en corona). Tanto en un caso como en otro, para aceptar el ajuste a la distribución de Watson, hace falta llevar a cabo dos tipos de test. Son los llamados test de colatitud y de longitud. Para ambos se ha desarrollado el procedimiento de cálculo numérico, y sólo para el caso del test de colatitud se ha llevado a cabo el procedimiento gráfico de determinación de la uniformidad. La razón de haberlo hecho solamente para el caso de colatitud ha sido porque el procedimiento matemático presentó numerosos problemas debido a

las erratas en las ecuaciones del único texto del que hoy se dispone para el tratamiento riguroso de estos test, que es la monografía de Fisher *et al.* (1987) '*Statistical Analysis of Spherical Data*'. Dado que se observaron numerosos errores de imprenta en todas las ediciones disponibles del mencionado libro, los resultados, por lo tanto, no podían considerarse del todo fiables. El autor principal del libro (Nick Fisher) nos proporcionó una lista de erratas. A pesar de ello, seguían consignándose errores internos. El principal problema era que los test numéricos rechazaban sistemáticamente la bondad de ajuste a la distribución de Watson para las medidas de la colatitud de todos los elementos cristalográficos de todas las muestras. Además, la enorme similitud de los valores de los estadísticos para elementos cristalográficos de una misma muestra, cuyos diagramas de densidad diferían mucho entre sí, hizo sospechar que las ecuaciones, a pesar de las correcciones enviadas por Fisher, podían seguir conteniendo erratas que hubieran pasado desapercibidas por el autor. Fisher (*comunicación personal*) nos aconsejó llevar a cabo el procedimiento gráfico del test de colatitud, y así comprobar si efectivamente el procedimiento numérico funcionaba correctamente. En lo que sigue, se expondrán las ecuaciones expresadas en Fisher *et al.* (1987), modificadas por la lista de erratas de Nick Fisher. En algún caso, ha sido preciso utilizar y desarrollar ecuaciones procedentes de otros textos y que se indicarán oportunamente.

Distribución Bipolar

Tanto el método gráfico como el matemático sirven para valorar el ajuste de este modelo al conjunto de datos de cada muestra. El primero de ellos permite una valoración general de dicho ajuste, así como identificar puntos aislados que representen una interrupción en el ajuste. El procedimiento matemático permite, además, hacer afirmaciones sobre la calidad del ajuste. Ambos métodos no son fiables cuando $K > 5$. Para verificar que nuestra muestra se ajusta a la distribución bipolar de Watson, es preciso comprobar que (a) los polos de las muestras se ordenan de la manera requerida en función de la distancia angular al eje polar (test de colatitud), y que (b) los polos de la muestra se distribuyen alrededor de dicho eje tal y como predice el modelo (test de longitud).

(1) Procedimiento gráfico: consiste en calcular el eje principal de la muestra $\bar{t}_1 = (\bar{\lambda}_1, \bar{\mu}_1, \bar{\nu}_1)$, es decir, el autovector asociado al autovalor mayor de la muestra y que se ha obtenido con el programa *Stereonet* de Macintosh. Dicho autovector es el eje de la distribución bipolar

(a) Gráfico de colatitud⁵: calculamos $X'_{(i)} = (1 - \cos^2 \theta_i)$, $i = 1, \dots, n$ (siendo $\cos \theta_i$ el producto escalar de las coordenadas cartesianas del dato de la muestra y del autovector asociado al mayor autovalor del tensor de orientación de la muestra), y reordenamos los datos en orden creciente (X'_i): $X'_{(1)} \leq \dots \leq X'_{(n)}$. Definimos la cantidad $a_i = F^{-1} [(i - 1/2)/n]$, donde F es la

⁵ No se hará referencia al procedimiento gráfico del test de longitud por no haberse utilizado, sólo al procedimiento gráfico de colatitud que fue el que se desarrolló por consejo de Nick Fisher (*comunicación personal*).

distribución exponencial $F(X'_i)^{-1} = -\ln(1 - X)$ y $X = (i - 1/2)/n$. En esta última ecuación n es el número de datos de la muestra e i es el número de orden que le corresponde al valor reordenado X'_i . De todo ello se obtiene:

$$a_i = -\ln(1 - (i - 1/2)/n) \quad (3.26)$$

Haciendo un gráfico Q-Q para el modelo exponencial, es decir, un gráfico de cuantiles X'_i frente a a_i , los datos deberían presentar, en el caso de un buen ajuste, una tendencia a una línea recta, pasando a través del origen. La pendiente de la recta daría una estimación de $1/K$.

(2) Procedimiento matemático

(a) Test de colatitud: se basa en el cálculo del estadístico D_n de Kolmogorov-Smirnov

$$D_n = \max(D_n^+, D_n^-) \quad (3.27)$$

donde

$$D_n^+ = \max[1/n - F(X'_i)], i = 1, \dots, n$$

$$D_n^- = \max[F(X'_i) - (i - 1)/n], i = 1, \dots, n$$

$F(X'_i)$ es la función exponencial $[1 - \exp(-K X'_i)]$ ó distribución teórica acumulativa

En la función exponencial interviene el parámetro de concentración *kappa* (K). Teniendo en cuenta que la estimación normal (el máximo probable) del eje principal de la distribución bipolar de Watson es el eje $\bar{t}_1$ de la matriz del tensor orientación $\mathbf{T}$, la estimación más probable de K es la solución de la ecuación:

$$D(-\bar{K}) = \bar{\tau}_1 \quad (3.28)$$

donde

$$D(z) = \int_0^1 x^2 \exp(zx^2) dx / \int_0^1 \exp(zx^2) dx \quad (3.29)$$

Una aproximación razonable a la solución de la ecuación (3.28) es $\bar{K}$ igual a:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 3.75 (3\bar{\tau}_1 - 1) & 1/3 \leq \bar{\tau}_1 \leq 0.34 \\ -5.95 + 14.9\bar{\tau}_1 + 1.48(1 - \bar{\tau}_1)^{-1} - 11.05\bar{\tau}_1^{-2} & 0.34 < \bar{\tau}_1 \leq 0.64 \\ -7.96 + 21.5\bar{\tau}_1 + (1 - \bar{\tau}_1)^{-1} - 13.25\bar{\tau}_1^{-2} & \bar{\tau}_1 \geq 0.64 \end{array} \right. \quad (3.30)$$

El test de Kolmogorov-Smirnov se utiliza para decidir si una muestra procede de una población con una distribución específica. Una característica de este test es que la distribución del estadístico D_n no depende de la función de distribución acumulativa. Una vez calculado D_n , se procede a calcular directamente el estadístico del test de colatitud (M_B):

$$M_B(D_n) = D_n (\sqrt{n} + 0.26 + 0.5/\sqrt{n}) \quad (3.31)$$

La hipótesis de que la distribución bipolar de Watson sea un modelo conveniente es rechazada si $M_B(D_n)$ es demasiado grande. El valor crítico para un valor α de significación del 5% es de 1.094. Si M_B supera dicho valor, se rechaza el test. En caso contrario se acepta.

(b) Test de longitud: consiste en la estimación del eje principal de la distribución y en el test de simetría rotacional alrededor de dicho eje.

La estimación del eje principal de la distribución bipolar corresponde al mayor de los autovalores ($\bar{\tau}_1$) de la matriz de orientación $\mathbf{T}$, el cual, como ya se ha dicho, se ha obtenido con el programa informático *Stereonet*. La suposición de simetría rotacional permite calcular un cono de confianza circular $100(1-\alpha)$ % alrededor de $\bar{\tau}_1$, siendo α el nivel de significación del test:

$$\Gamma = (1/n) \sum_{i=1}^n (L T_{i(x)} + M T_{i(y)} + N T_{i(z)}) \quad (3.32)$$

donde L, M, N son las coordenadas cartesianas del autovector asociado al autovalor mayor del tensor orientación de la muestra (calculadas mediante los cosenos directores), y $T_{i(x)}$, $T_{i(y)}$, $T_{i(z)}$ las coordenadas cartesianas de cada uno de los puntos de la serie de datos. En función de Γ y de los autovalores normalizados del tensor orientación de la muestra, se calcula el estadístico P_n del test de simetría rotacional:

$$P_n = 2n (\bar{\tau}_2 - \bar{\tau}_3)^2 / (1 - 2\bar{\tau}_1 + \Gamma) \quad (3.33)$$

La hipótesis de simetría es rechazada si P_n es demasiado grande. Para un nivel de significación α (%), la hipótesis es rechazada si $P_n > 2 \ln \alpha$. En nuestro caso, para $\alpha = 5\%$, el valor crítico se sitúa en 5.99. Si $P_n > 5.99$, se rechaza el test.

Distribución en Corona

Al igual que para el caso de la distribución bipolar, se realiza el procedimiento gráfico y numérico del test de colatitud, mientras que para el test de longitud sólo se lleva a cabo el numérico, prescindiendo del método gráfico. Para verificar que nuestra muestra se ajusta a la distribución en corona de Watson, es preciso comprobar que (a) los polos de las muestras se ordenan de la manera requerido en función de la distancia al polo del círculo mayor de la distribución (test de colatitud), y que (b) los polos de la muestra se ordenan a lo largo de dicho círculo tal y como predice el modelo (test de longitud).

(1) Procedimiento gráfico: consiste en calcular el autovector correspondiente al autovalor menor de la muestra, $\bar{t}_3 = (\bar{\lambda}_3, \bar{\mu}_3, \bar{\nu}_3)$, que se ha obtenido con el programa *Stereonet* de Macintosh. Dicho autovector es el polo del círculo mayor de la distribución, es decir, de la corona.

(a) Gráfico de colatitud⁶: se calcula $X'_{(i)} = \cos^2 \theta_i$, $i = 1, \dots, n$, siendo $\cos \theta_i$ el producto escalar de las coordenadas cartesianas de cada uno de los datos de la muestra y el autovector $\bar{t}_3$. A continuación, reordenamos los datos en orden creciente (X'_i), obteniendo $X'_{(1)} \leq \dots \leq X'_{(n)}$. Definimos la cantidad $a_i = F^{-1}[(i - 1/2)/n]$ propuesta por Fisher *et al.* (1987), donde F es la distribución χ^2_1 (*chi-squared distribution*)⁷. Para el cálculo de F^{-1} recurrimos a unas aproximaciones utilizadas por Johnson, Kutz & Balakrishnan (1994) en su monografía '*Continuous Univariate Distributions (vol.1, second edition)*'.

En concreto, se ha utilizado la aproximación de Wilson-Hilferty (1931):

$$F(X'_i) \approx \Phi \left(\sqrt{\frac{9v}{2}} \left\{ \left(\frac{x}{v} \right)^{1/3} - 1 + \frac{2}{9v} \right\} \right) \quad (3.34)$$

donde Φ equivale a la función de distribución (F) propuesta por Fisher *et al.* (1988), es decir, la función de distribución acumulativa de una variable dada, v es el número de grados de libertad de la función χ^2_v (en nuestro caso es 1), y x es el valor reordenado de la muestra en orden creciente, es decir, lo que hemos venido llamando $(i - 1/2)/n$.

⁶ No se hará referencia al procedimiento gráfico del test de longitud por no haberse utilizado

⁷ La distribución χ^2 (ji-cuadrado) es, junto con la distribución normal, la distribución de muestreo estadístico más importante, y una herramienta esencial en el análisis estadístico de datos. Básicamente, si $X_1, X_2, \dots, X_v$ son v variables aleatorias independientes distribuidas cada una de ellas $N(0, \sigma^2)$, entonces: $(X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_v^2) / \sigma^2$ es una variable aleatoria cuya distribución, que no depende de σ^2 , se llamada $\chi^2 v$, siendo v los grados de libertad.

A partir de la aproximación anterior, se puede obtener una aproximación al punto porcentual $\chi^2_{v, \varepsilon}$, que sería el equivalente a $F^{-1}[(i - 1/2)/n]$

$$\chi^2_{v, \varepsilon} \approx v \left(\sqrt{\frac{2}{9v}} U_{\varepsilon} + 1 - \frac{2}{9v} \right)^3 \quad (3.35)$$

donde U_{ε} es $\Phi^{-1}(\varepsilon)$, siendo ε el punto porcentual más pequeño de la distribución normal estándar.

Shore (1982) derivó la siguiente aproximación para el punto porcentual X_p (el equivalente a la distribución normal U_{ε}):

$$U_{\varepsilon} \approx X_p = -5.5310 \left\{ \left(\frac{1-p}{p} \right)^{0.1193} - 1 \right\} \quad p > 0.5 \quad (3.36)$$

donde p es la probabilidad y equivale a la cantidad $a_i = (i - 1/2)/n$. La ecuación (3.36) es la mejor de las aproximaciones propuestas por Shore (1982), con una diferencia máxima absoluta de 0.0073 (0.5%) para $0 \leq x \leq 2.3$. Cuando la probabilidad cumple $p \leq 0.5$, no se satisfacen las condiciones de la ecuación (3.36). En estos casos, se introduce una corrección haciendo el valor de la probabilidad igual a $p-1$, y aplicamos entonces la ecuación (3.36) cambiándole el signo para aquellos casos en los que inicialmente p era igual o inferior a 0.5.

A continuación, se construye un gráfico cuantil Q-Q con X'_i frente a a_i . El gráfico debería representar una línea aproximadamente recta, pasando a través del origen y la pendiente de la recta daría una estimación de $|1/(2K)|$: $K < 0$.

(2) Procedimiento matemático

(a) Test de colatitud: se basa en el cálculo del estadístico D_n de Kolmogorov-Smirnov, al igual que se hizo para el test de colatitud de la distribución bipolar, solo que en este caso $F(X'_i)$ es la distribución χ^2_1 :

$$F(X'_i) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^x y^{-1/2} \exp(-1/2 y) dy \quad (3.37)$$

siendo X'_i los valores reordenados en orden creciente de $X'_{(i)} = \bar{K} \cos^2 \theta'_{(i)}$, y $\bar{K}$ el parámetro de concentración cuyo valor se estima, según el autovalor más pequeño, de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{ll} (2\bar{\tau}_3)^{-1} & 0 \leq \bar{\tau}_3 \leq 0.06 \\ 0.961 - 7.08\bar{\tau}_3 + (0.466/\bar{\tau}_3) & 0.06 < \bar{\tau}_3 \leq 0.32 \\ 3.75 (-3\bar{\tau}_3) & 0.32 < \bar{\tau}_3 \leq 1/3 \end{array} \right. \quad (3.38)$$

Como la ecuación (3.37) no se puede programar en una hoja de cálculo, recurrimos a una aproximación dada por Zelen y Severo (1964) basada en fórmulas de Hastings (1955):

$$F(X'_i) \approx \Phi(X'_i) = 1 - \frac{1}{2} (1 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4)^{-4} \quad (3.39)$$

donde $a_1 = 0.196854$, $a_2 = 0.115194$, $a_3 = 0.000344$, $a_4 = 0.019527$; siendo el error en $\Phi(X'_i)$ para $X \geq 0$ inferior a 2.5×10^{-4} .

Una vez obtenido $\Phi(X'_i)$ o lo que es lo mismo, $F(X'_i)$, procedemos a calcular el estadístico D_n de Kolmogorov-Smirnov, al igual que en el caso bipolar y, finalmente, el estadístico $M_G(D_n)$ del test de colatitud:

$$M_G(D_n) = D_n (\sqrt{n} - 0.04 + 0.7/\sqrt{n}) \quad (3.40)$$

El valor crítico para una nivel de significación (α) del 5% es igual a 1.15. Si M_G supera dicho valor, se rechaza el test, en caso contrario se aceptaría.

(2) Test de longitud: el cálculo del estadístico P_n^* se basa en el test de simetría rotacional sobre el eje polar, y viene dado por:

$$P_n^* = 2n (\bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_2)^2 / (1 - 2\bar{\tau}_3 + \Gamma) \quad (3.41)$$

donde $\bar{\tau}_1$, $\bar{\tau}_2$ y $\bar{\tau}_3$ son los autovalores normalizados de la muestra y Γ se calcula de igual manera que para el caso de distribución polar, solo que en este caso intervienen los cosenos directores del autovector asociado al autovalor menor o eje polar :

$$\Gamma = (1/n) \sum_{i=1}^n (L T_{3(x)} + M T_{3(y)} + N T_{3(z)}) \quad (3.42)$$

El valor crítico de P_n^* para $\alpha = 5\%$ es 5.99 (el mismo valor crítico que para el test de longitud de la distribución polar). En el caso de que $P_n^* > 5.99$, se rechaza el ajuste al test.

Con el procedimiento gráfico del test de colatitud para ambos tipos de distribuciones se pudo comprobar que el procedimiento matemático funcionaba correctamente y que todos los elementos cristalográficos de cada muestra, de los cortes geológicos, presentaban siempre una tendencia muy similar. La línea obtenida pasa por el origen de coordenadas pero no es una recta, de manera que a partir de un valor dado (no siempre el mismo) la trayectoria de los datos se hace asintótica con el eje horizontal hacia la parte superior (ver ejemplo de la fig.3.13). Esto corroboró, una vez más, el porqué los estadísticos siempre tenían valores tan parecidos entre sí, sin apenas variaciones significativas (inferiores a la unidad). Todo esto lo veremos con más detalle en el apartado 4.2.3.

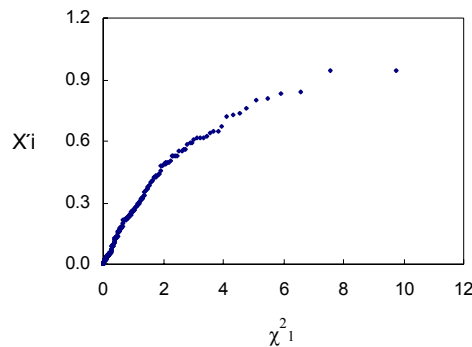


Fig.3.13. Gráfico Q-Q para el modelo exponencial, es decir, un gráfico de cuantiles X'_i frente a χ^2_1 . Los datos deberían presentar, en el caso de un buen ajuste, una tendencia lineal, pasando a través del origen de ordenadas. La pendiente de la recta daría una estimación de $1/K$ en el caso de distribución bipolar, y de $|1/(2K)|$: $K < 0$ para el caso de distribución en corona.

El método gráfico no sólo ha permitido una valoración cualitativa en cuanto a la fiabilidad del ajuste, sino que también se han podido identificar los puntos a partir de los cuales se produce una interrupción en el ajuste a una recta de la muestra (recordemos que el ajuste ideal es aquél en el que los puntos se disponen alineados según una línea recta que pasa por el origen de coordenadas. La pendiente de dicha recta supone una estimación de $1/K$ para la distribución bipolar, y de $|1/(2K)|$: $K < 0$ para la distribución en corona. El hecho de que una muestra no presente ajuste a la distribución de Watson no significa que no sea fiable el resultado del estadístico de uniformidad de Bingham. Esto es debido a que la distribución de Watson es un caso especial de la distribución de Bingham como ya hemos comentado, de modo que una muestra puede no ajustarse a la distribución de Watson y sí, sin embargo, a la de Bingham, en cuyo caso su estadístico S_u sería perfectamente fiable.

3.6.3. Test de uniformidad de Ajne

Para evaluar la uniformidad se las muestras de ha utilizado también el test de Ajne, como ejemplo de prueba no paramétrica. La generalización esférica del estadístico de Ajne (An) es definida por Beran (1968) como:

$$An = \frac{1}{4}n - (n\pi)^{-1} \sum_{i < j} \Psi_{ij} \quad (3.43)$$

donde n es el número de datos y Ψ_{ij} es el más pequeño de los dos ángulos entre las direcciones representadas por (θ_i, ϕ_i) y (θ_j, ϕ_j) , es decir, el ángulo más pequeño de todos los posibles calculados entre cada uno de los datos de una serie y los demás. Beran (1968) demostró que para un valor x lo suficientemente grande y $n > 20$:

$$\Pr(16 An > x) = 1.65 \Pr(\chi_3^2 > x) \quad (3.44)$$

proporcionaba una buena aproximación.

Los cálculos del test de uniformidad de Ajne han sido realizados con el programa informático *PLAG-9*. El valor crítico se ha estimado a partir del valor de x que, para χ_3^2 , hace que: $1.65 \Pr(\chi_3^2 > x) = 0.05$. Dicho valor corresponde a 8.9, tal y como se aprecia en la extrapolación de la fig.3.14.

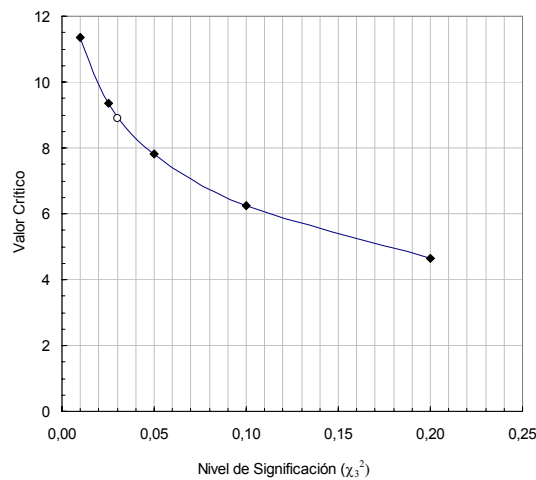


Fig.3.14. Procedimiento gráfico para calcular el valor de x correspondiente a un valor de significación de 0.05 del test de Ajne, que equivale a un nivel de significación de 0.0303 de χ_3^2 . La aproximación gráfica da un resultado de 8.9 (círculo hueco). Los rombos rellenos representan los valores críticos conocidos de χ_3^2 para niveles de significación de 0.20, 0.10, 0.05, 0.025 y 0.01, respectivamente.

Cuando se proyectaron los resultados de An en los gráficos BDA (Bingham-Distancia-Ajne, apartado 3.6.4), se pudo observar que los datos obtenidos por el programa *PLAG-9* no eran fiables, no porque éste fallara en sus cálculos, sino porque el valor del estadístico variaba en función del número de granos (n) medidos en cada muestra (ver apéndices B3 y C3 para Almonaster la Real y Veredas, respectivamente), algo inesperado a pesar de que se suponía que en los cálculos de la ecuación (3.43) An ya estaba normalizado. De este modo, se pudo comprobar que no era así y que a menor n , menor era también el resultado del estadístico. Para llegar a esta conclusión sirven de ejemplo los resultados de An obtenidos para las muestras 11, 14 y 16 de Almonaster la Real, y los de las muestras 4 y 5 de Veredas (ver el capítulo de resultados). Todas ellas eran, precisamente, aquellas en las que se habían medido un menor número de granos y en las que descendía el valor del estadístico de Ajne como consecuencia de ello. Se procedió, por lo tanto, a normalizar los datos de los estadísticos calculados por el programa informático para así contrarrestar el efecto del número de granos en cada caso, de ahí que hablemos a partir de ahora de An/n y no de An . Como es lógico esperar, ni el valor crítico ni tampoco el nivel de significación pueden ser fácilmente estimados para los nuevos valores de An/n . Además, no es tan importante probar la uniformidad de cada muestra, como establecer las variaciones de este estadístico a lo largo de cada corte. De todas maneras, es posible sugerir una posible manera de calcular el nuevo nivel de significación. Éste sería igual a: $1 - f(y)$, siendo $f(y)$ la función de densidad de probabilidad para una variable aleatoria tipo gamma⁸:

$$f(y) = \frac{y^{\alpha-1} e^{-y/\beta}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad \text{para: } \alpha, \beta > 0; \quad 0 \leq y \leq \infty \quad (3.45)$$

$$f(y) = 0 \quad \text{en cualquier otro punto}$$

en donde:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (3.46)$$

La cantidad $\Gamma(\alpha)$ es lo que se conoce como función *gamma*. La integración directa nos da que $\Gamma(1) = 1$. La integración por partes nos da que $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1) \Gamma(\alpha - 1)$ para cualquier $\alpha \geq 1$, mientras que $\Gamma(n) = (n - 1)!$ para un número entero de n .

⁸ Una variable aleatoria tipo gamma, que tiene una función de densidad con parámetros $\alpha = \nu/2$ y $\beta = 2$, se denomina variable aleatoria ji-cuadrada (χ^2).

En el caso especial de que α sea un número entero, la función de distribución tipo *gamma* se puede expresar como una suma de ciertas variables *poisson*. Si α no es un número entero, como es nuestro caso, es imposible encontrar la antiderivada del integrando de la expresión:

$$\int_c^d \frac{y^{\alpha-1} e^{-y/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} dy \quad \text{en donde } 0 < c < d < \infty \quad (3.47)$$

y, por lo tanto, sería imposible obtener mediante integración directa las áreas bajo la función de densidad tipo *gamma*. No obstante, es posible intentar encontrar una solución numérica, aunque esto ha quedado fuera de los objetivos de este trabajo.

3.6.4. Gráficos BDA (Bingham – Distancia - Ajne)

Se ha procedido a realizar un gráfico de tres ejes para cada uno de los elementos cristalográficos de cada muestra. En la horizontal se ha representado la distancia o posición de cada muestra respecto al techo en la serie de las metabasitas, en el eje vertical izquierdo se ha representado el valor del estadístico del test de uniformidad de Bingham (S_u), y en el eje vertical derecho el valor del estadístico del test de uniformidad de Ajne normalizado (An/n). Con esto pretendemos comparar los resultados de ambos test y comprobar qué efecto tiene el hecho de haber utilizado un test de tipo paramétrico (Bingham) frente a otro que no lo es (Ajne), es decir, si los resultados de uniformidad y las trayectorias que se observan son congruentes en ambos casos.

No es prioritario que tengamos en cuenta cuál es el valor crítico que hemos considerado en cada uno de los test porque lo que interesa no es tanto el valor crítico en sí, es decir, si la distribución se ajusta o no a la uniformidad, sino la evolución que siguen ambas trayectorias, si éstas se parecen o, por el contrario, difieren más de lo que cabría esperar.

3.6.5. Gráficos de Woodcock

Woodcock (1977) discutió en detalle varios métodos gráficos para representar los autovalores del tensor orientación de una muestra de datos axiales y, de este modo, identificar la naturaleza del agrupamiento (*clustering*) de los datos. Debido a que $\bar{\tau}_1 + \bar{\tau}_2 + \bar{\tau}_3 = 1$, hay sólo dos autovalores que varían independientemente, así que es por ello que trabajemos con dos relaciones: $\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3$ y $\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2$ (siendo $\bar{\tau}_1$ el autovalor mayor y $\bar{\tau}_3$ el más pequeño). Como para algunas distribuciones estas relaciones podrían ser igual o superior a 1000, se utiliza $\ln(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$ y $\ln(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$. Con estas variables como ejes, se pueden representar diferentes tipos de distribuciones (Woodcock, 1977). Ver tabla III.5.

TABLA III.5. Tipos de distribuciones en función de la magnitud relativa de los autovalores normalizados del tensor de orientación $\mathbf{T}$ (Woodcock, 1977).

Magnitud de los autovalores	Tipo de distribución	Otras características
$\bar{\tau}_1 = \bar{\tau}_2 = \bar{\tau}_3 = 1/3$	Uniforme	
$\bar{\tau}_1$ grande; $\bar{\tau}_2, \bar{\tau}_3$ pequeños		
(i) $\bar{\tau}_2 \neq \bar{\tau}_3$	Unimodal si R^9 cercano a 1	Concentración en un extremo de $\bar{t}_1^{10}$
	Bimodal en resto de casos	Concentración en ambos extremos de $\bar{t}_1$
(ii) $\bar{\tau}_2 \approx \bar{\tau}_3$	Unimodal si R cercano a 1	Simetría rotacional alrededor de $\bar{t}_1$
	Bipolar en resto de casos	
$\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2$ grandes; $\bar{\tau}_3$ pequeño		
(i) $\bar{\tau}_1 \neq \bar{\tau}_2$	Corona	Corona incompleta que contiene a $\bar{t}_2$ y $\bar{t}_1$
(ii) $\bar{\tau}_1 \approx \bar{\tau}_2$	Corona simétrica	Simetría rotacional alrededor de $\bar{t}_3$

En un diagrama de Woodcock (fig.3.15) se representan los distintos tipos ideales de distribuciones contempladas por la distribución de Bingham, de manera que las distribuciones en coronas y máximos perfectos (las que caen sobre los ejes de abscisas y ordenadas, respectivamente) han sido especialmente estudiadas y han dado lugar a un tipo especial de distribución, la de Watson. En el diagrama de Woodcock, conforme las muestras representadas se alejan del origen de coordenadas también se van alejando de la uniformidad, lo que significa que en estos casos existirá una dirección de orientación preferente más marcada en la fábrica de la muestra.

⁹ R es la longitud del vector resultante o vector suma de los vectores de la muestra.

¹⁰ $\bar{t}_1$ y $\bar{t}_2$ son los autovectores asociados a los autovalores $\bar{\tau}_1$ y $\bar{\tau}_2$, respectivamente, del tensor de orientación.

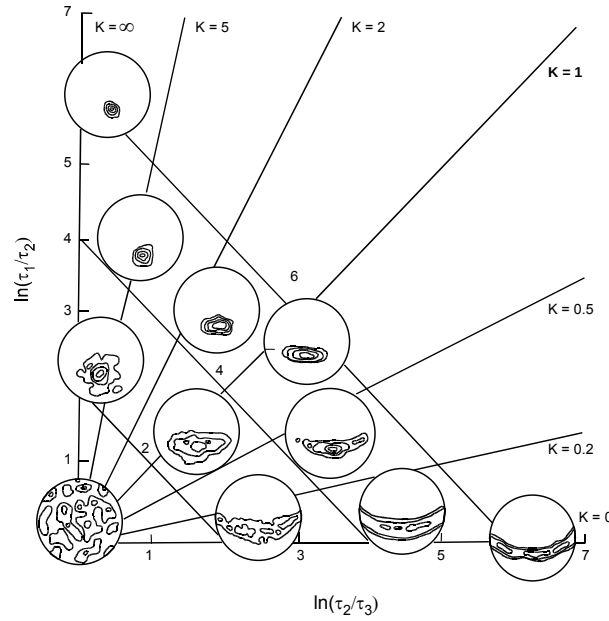


Fig.3.15. Diagrama de Woodcock (1977). Clasificación de distintos patrones de distribución de polos en la esfera unidad, de acuerdo con los logaritmos de las relaciones de sus autovalores. Se representan los diagramas de densidad típicos para diferentes tasas logarítmicas. K es la relación $\ln(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)/\ln(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$. Para $K < 1$, la distribución es en corona y para $K > 1$ la distribución es en máximos o bipolar. Ver Tabla III.5 para más detalle.

La distancia al origen (*Strength*) es una medida de la intensidad de la fábrica o, lo que es lo mismo, tratándose de fábricas cristalográficas, del grado de orientación cristalográfica preferente de la muestra. Este estadístico de concentración se calcula en función de los autovalores normalizados y aplicando el teorema de Pitágoras, de modo que:

$$\begin{aligned}
 S^2 &= [\ln(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)]^2 / [\ln(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)]^2 \\
 S^2 &= (\ln \bar{\tau}_1 - \ln \bar{\tau}_2)^2 + (\ln \bar{\tau}_2 - \ln \bar{\tau}_3)^2 \\
 S^2 &= (\ln \bar{\tau}_1 - \ln \bar{\tau}_3)^2 \\
 S &= \ln(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_3)
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Existe otro índice a tener en cuenta en el gráfico de Woodcock, se trata del parámetro de forma K (*Shape*), que indica en qué lugar del diagrama se sitúa una muestra respecto a los ejes X e Y . Este parámetro K resulta útil para discriminar un tipo de distribución de otra, y se define como:

$$K = \ln(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2) / \ln(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3) \tag{3.49}$$

para $K \leq 1$ la distribución es en corona, en caso contrario es en máximos (distribución bipolar).

3.6.6. Gráficos S (*Strength*) frente a distancia

Se ha utilizado también un diagrama en el que se representa el parámetro S (*Strength*), o grado de orientación cristalográfica preferente de la muestra, frente a la distancia, es decir, frente a la posición que ocupa cada muestra dentro de la pila anfibolítica. Como se ha explicado en el anterior apartado, el valor de S indica la intensidad de la fábrica o, lo que es lo mismo, la distancia al origen en los diagramas de Woodcock.

3.6.7. Gráficos Su, An/n y S (valores medios y desviación estándar) frente a distancia

Además de los diagramas explicados con anterioridad, se han realizado, tanto para Almonaster la Real como para Veredas, tres gráficos. Estos son, respectivamente: el estadístico de uniformidad de Bingham (*Su*), el de Ajne (*An/n*) y el parámetro de intensidad de fábrica S (*Strength*) de todas las muestras frente a la distancia, es decir, frente a la posición que ocupan dentro de la lámina de las metabasitas respecto al techo de la serie. En estos gráficos se representa también la media aritmética y la desviación estándar para cada muestra. En los tres casos los gráficos se han realizado con la hoja de cálculo Excel, y son del tipo de dispersión de puntos conectados por líneas, representando en el eje horizontal la distancia y en el eje vertical cada uno de los parámetros a analizar (*Su*, *An/n* y *S*). Una vez hecho esto, se calculó para cada muestra la media aritmética y la desviación estándar (representada en forma de barras de error vertical) de las variables mencionadas para la totalidad de los 16 elementos cristalográficos de cada una de las muestras.

La desviación estándar es la medida de la dispersión de los valores respecto a la media o valor promedio en cada una de las muestras de la curva. La desviación estándar queda definida de la siguiente manera:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}} \quad (3.50)$$

donde 'x' es el valor de cada dato y 'n' es el número total de los datos de la muestra.

A continuación, se procedió a dibujar un área sombreada en cada gráfico, la cual representa la variación de las tres variables consideradas respecto a la distancia, de modo que dentro del área sombreada quedan incluidas todas las curvas que unen los mismos elementos cristalográficos en cada muestra del corte en cuestión, es decir, un total de 16 curvas, tantas como elementos cristalográficos considerados.

Capítulo 4

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS LÁMINAS

En este apartado prestaremos especial atención a las principales microestructuras que podemos observar en las muestras de las metabasitas de Acebuches estudiadas en los cortes de Almonaster la Real y Veredas. La descripción la llevaremos a cabo con la ayuda de una serie de fotografías que nos servirán para destacar los aspectos más relevantes. Empezaremos por una descripción de la evolución del tamaño de grano, de techo a muro estructural de la serie, de las anfibolitas de Acebuches en ambos cortes y sus principales texturas, y seguiremos por una descripción pormenorizada de algunos de los porfiroclastos de plagioclasas más representativos y las microestructuras más relevantes que se observan en ellos.

Antes de empezar, hay que tener en cuenta que las rocas de la parte baja de la serie de las metabasitas de Acebuches, afectadas por la zona de cizalla Suribérica, pueden considerarse como milonitas, es decir, rocas foliadas típicas de zonas de cizalla. Se trataría de las anfibolitas cizalladas y de los esquistos máficos, rocas cohesivas, intensamente foliadas y que presentan una lineación mineral de estiramiento claramente visible, todo ello producto de la reducción del tamaño de grano debido a la actuación de procesos cristaloplásticos en zonas de intensa deformación. En todo el perfil de la serie de Acebuches, en los cuatro litotipos que fueron definidos en el apartado 1.7.1, es muy común observar grandes cristales relictos en una matriz de tamaño de grano más fino. A estos cristales relictos se les conoce como porfiroclastos y al tipo de microestructura se la conoce como porfiroclástica. Para una definición más rigurosa de estos términos véase, por ejemplo, Passchier & Trouw (1996).

En líneas generales, la foliación definida en la matriz rodea y abraza a los porfiroclastos, lo cual es un indicio claro de que se trata de cristales pre o sintectónicos que se desarrollaron debido a diferencias de reología o de orientación cristalográfica. Nosotros centraremos nuestro interés en los porfiroclastos de plagioclasa ya que este mineral es el objeto de estudio de este trabajo. No obstante, los porfiroclastos de anfíbol, que no muestran señales de deformación plástica intracristalina, muestran también una clara reducción en su tamaño medio de techo a muro (Díaz Azpiroz & Fernández, 2003).

Tanto en el corte de Almonaster la Real como en el de Veredas, los porfiroclastos de plagioclasa contienen numerosas maclas mecánicas o de deformación, las cuales se distinguen de las maclas de crecimiento por su forma. Mientras las maclas de deformación presentan comúnmente terminaciones en bordes afilados y se encuentran, además, frecuentemente combadas, las de crecimiento son, sin embargo, rectas y escalonadas. Aparte de las maclas, también son abundantes los granos que presentan extinción ondulante, bandas de deformación, *microkinks*, estructuras núcleo-manto (las cuales describiremos a continuación), subgranos, estructuras S-C, etc. Los *microkinks* aparecen como pequeñas estructuras aisladas y están

probablemente asociados con fracturas cataclásticas en lugares de dislocaciones enredadas. Son, por tanto, indicativos de deslizamiento de dislocaciones y evidencias de deformación plástica intracristalina.

Los porfiroclastos se encuentran a menudo flanqueados por agregados de granos minerales que forman una unidad estructural junto con el porfiroclasto en cuestión. Si tales agregados tienen la misma composición mineral que el porfiroclasto se les llama mantos, y a la estructura en su conjunto se la conoce como *núcleo-manto* o *porfiroclasto manteado* (Passchier & Trouw, 1996). En el caso de que los agregados fueran de otro mineral diferente al porfiroclasto, a la estructura se la conocería como *sombra de presión*, aunque este no es el caso en las metabasitas de Acebuches. Los porfiroclastos manteados se interpretan como una consecuencia de la deformación cristalo-plástica y de la acumulación de dislocaciones en los bordes del cristal como respuesta al flujo de la matriz. Los bordes de los porfiroclastos recrystalizan entonces dinámicamente como estructuras núcleo-manto. Los mantos de tamaño de grano fino pueden deformarse formando colas (*wings* o *tails*) a ambos lados del porfiroclasto y estiradas paralelamente a la fábrica planar de la roca. Estas colas suelen estrecharse en sus extremos y cambiar de forma mientras el núcleo del porfiroclasto permanece rígido y/o continúa la recrystalización en su borde. Las colas que vamos a encontrar en las muestras de Almonaster la Real y Veredas son del tipo σ . Los porfiroclastos de tipo σ tienen amplios mantos cercanos al porfiroclasto y las colas permanecen a diferente nivel a ambos lados (*stair-stepping*), definiendo una asimetría y constituyendo, por tanto, un criterio o indicador del sentido de cizalla.

Los porfiroclastos de plagioclasa presentan, como ya veremos, muy diferentes tamaños de grano. En rocas metamórficas, las subdivisiones entre tamaños de grano fino, medio y grueso varían ligeramente de unos autores a otros. La clasificación que nosotros hemos adoptado es la de Barker (1990), que considera: tamaño de grano fino ($< 0.1\text{mm}$), tamaño de grano medio ($0.1\text{-}1.0\text{ mm}$) y tamaño de grano grueso ($>1\text{ mm}$). Para ver la evolución del tamaño de grano hemos escogido las láminas B de cada muestra, es decir, las secciones delgadas cuya orientación coincide con la dirección de la lineación (plano XZ) o, en el caso de no observarse, con la dirección de buzamiento de la foliación. En los cortes de Almonaster la Real (fotografías 4.1 a 4.10) y Veredas (fotografías 4.31 a 4.38) observamos una reducción del tamaño de grano de techo a muro estructural de la serie, desde las anfíbolitas bandeadas de tamaño de grano grueso con clinopiroxeno hasta los esquistos máficos, pasando por las anfíbolitas bandeadas sin clinopiroxeno, las anfíbolitas bandeadas y las anfíbolitas cizalladas. Esta disminución en el tamaño de grano es consecuencia de dos factores. Por un lado, la temperatura asociada al metamorfismo disminuye de techo (anfíbolitas bandeadas con clinopiroxeno, fotografías 4.1, 4.2, 4.3, 4.31 y 4.32) a muro (anfíbolitas bandeadas, fotografías 4.4, 4.33, 4.34 y 4.36). Por otro lado, la intensidad de la deformación debida a la ZCS (D_2) aumenta hacia muro (desde la fotografía 4.5 a la 4.10 y desde la 4.35 hasta la 4.38).

Además de las muestras medidas con la platina universal, hemos fotografiado también la muestra 17 de Almonaster la Real (B.0601-17) y la muestra 6 de Veredas (B.0602-6) (fotografías 4.10 y 4.38, respectivamente) para mostrar, *de visu*, las razones por las cuales éstas no pudieron

ser medidas: debido al tamaño de grano excesivamente pequeño y a una intensa alteración que hizo irreconocibles los granos maclados de plagioclasas.

Como ya hicimos en el apartado 1.7 (capítulo de introducción) una amplia descripción de las distintas litologías y estructuras asociadas a las metabasitas de Acebuches, así como de los eventos deformacionales y tectono-metamórficos que tuvieron lugar en el dominio oceánico, pasaremos directamente a describir las principales microestructuras. En todas las fotografías se ha indicado la escala y el objetivo utilizado, el corte geológico y el número de la muestra, así como la lámina (A, B o C) donde se han tomado las fotografías. Para el estudio de la evolución del tamaño de grano, de techo a muro estructural de la serie, siempre hemos empleado el objetivo 4x. Sin embargo, para fotografiar los porfiroclastos a veces hemos utilizado el objetivo 10x, lo que ha quedado debidamente especificado.

4.1.1. Variaciones en el tamaño de grano

En el caso de las anfibolitas bandeadas se tomará como referencia descriptiva el tamaño de grano en las bandas de grano grueso. Las anfibolitas bandeadas de grano grueso con clinopiroxeno muestran una textura granoblástica o granonematoblástica (fotografías 4.1, 4.2, 4.3, 4.31 y 4.32). Los cristales de plagioclasa son xenomorfos y de dimensiones milimétricas. Suelen presentar maclas de crecimiento y de deformación (fotografía 4.2, por ejemplo). Los cristales de anfíbol se orientan con sus ejes largos (ejes [001]) definiendo la lineación L_1 (fotografía 4.1). No se observan microestructuras indicativas de plasticidad intracristalina en el anfíbol.

En las anfibolitas bandeadas sin clinopiroxeno (fotografías 4.4, 4.43, 4.44 y 4.36), el tamaño de grano medio es menor que en las anteriores. En el caso de la fotografía 4.31 es preciso tener en cuenta que se muestra la imagen de una banda de grano fino de las anfibolitas con clinopiroxeno, por lo que la comparación con las fotografías 4.33 y 4.34 no es posible. Desde el punto de vista microestructural, las plagioclasas presentan maclas mecánicas más abundantes (fotografía 4.4). Además, muestran extinción ondulante y bordes de subgrano (fotografía 4.33). Los bordes de grano son ondulados o irregulares, desarrollándose una estructura manteada incipiente (fotografía 4.33).

Las anfibolitas cizalladas (fotografías 4.5, 4.6, 4.7 y 4.35) son de tamaño de grano considerablemente menor que las bandeadas. Como ya se ha indicado, esto es debido en parte a la disminución del grado metamórfico de M_1 , y en parte al efecto de cizallamiento de fase D_2 . En consecuencia, se desarrolla una fábrica muy patente definida por la orientación de los ejes largos de los cristales de anfíbol y por la presencia de bandas alternantes de anfíbol y plagioclasas producidas por la deformación (fotografía 4.5). Las plagioclasas muestran microestructuras similares a las descritas en las anfibolitas bandeadas. El proceso de recrystalización dinámica es más intenso, llegando a identificarse porfiroclastos de plagioclasa y de anfíbol (fotografía 4.7). Es frecuente observar fábricas planares compuestas de tipo S-C y S-C' (fotografía 4.6) o crenulaciones de la foliación milonítica (fotografía 4.37).

Idénticas microestructuras pueden observarse en los esquistos máficos (fotografías 4.8, 4.9, 4.10 y 4.38), en donde la extrema reducción del tamaño de grano por milonitización hace imposible la medición de la OCP de las plagioclasas (fotografías 4.8, 4.9, 4.10 y 4.38). La aparición de cloritas proporciona a la roca una apariencia más planar, con el desarrollo de una textura lepidoblástica marcando la foliación S_2 (fotografía 4.38).

4.1.2. Microestructuras en cristales seleccionados de plagioclasa

En las anfibolitas bandeadas las principales microestructuras de deformación visibles son las maclas de deformación (fotografías 4.11, 4.12, 4.17, 4.18 y 4.39). En ocasiones, estas maclas crecen atravesando maclas de crecimiento previas (fotografía 4.13). En algunas muestras es posible observar hasta dos sistemas ortogonales de maclas mecánicas (fotografías 4.15, 4.42 y 4.43). A pesar de ello, ciertos cristales preservan microestructuras previas a la deformación, como una zonación normal (fotografías 4.14 y 4.18) y hábitos subidiomorfos (fotografía 4.45).

Aparte de las maclas, la deformación de la fase D_1 ha originado también extinción ondulante en la mayor parte de los granos (fotografías 4.14, 4.18, 4.21, 4.23, 4.42 y 4.44) y alabeamiento de maclas (fotografías 4.18, 4.42 y 4.44). Estas microestructuras son indicativas de la actividad de sistemas de deslizamiento. Las diferencias en la energía elástica deformativa acumulada en los distintos cristales han sido parcialmente resueltas mediante la actividad de procesos de recuperación y recrystalización. Prueba de la actividad de la recuperación la tenemos en el desarrollo de subgranos (fotografía 4.20), mientras que la recrystalización dio lugar a bordes de grano irregulares y pequeños granos nuevos (fotografía 4.33). Los bordes de subgrano aparecen, en ocasiones, como bandas estrechas en las que cambia apreciablemente la orientación de las maclas, semejando planos de *kink* (fotografías 4.12, 4.16, 4.22, 4.40 y 4.42). En algunas ocasiones, estos *kinks* pueden estar asociados a fracturas intracrystalinas (fotografías 4.22 y 4.39). A diferencia de las fracturas netas que aprovechan planos de exfoliación, estas fracturas parecen nucleares en *kinks* asociados a fuertes concentraciones o enmarañamiento de dislocaciones. Todas estas observaciones demuestran, en conjunto, la actividad durante la fase D_1 de los mecanismos de plasticidad intracrystalina en las anfibolitas bandeadas. Los mecanismos de maclado mecánico, movimiento de dislocaciones y recrystalización deben ser responsables, por tanto, del desarrollo de la microfábrica tectónica de estas rocas, incluyendo su OCP.

Por otro lado, en las anfibolitas y esquistos verdes afectados por la fase D_2 (ZCS), las microestructuras que muestran las plagioclasas son muy semejantes. Además de las maclas mecánicas (fotografías 4.30, 4.48 y 4.52) y de la extinción ondulante (fotografías 4.28, 4.29, 4.48, 4.49 y 4.51), el protagonismo fundamental lo adquiere el proceso de recrystalización dinámica. En este sentido, es posible observar toda una transición entre porfiroclastos con mantos poco desarrollados (fotografía 4.46), pasando por porfiroclastos tipo σ con una estructura manteada bien desarrollada (fotografías 4.27 a 4.29, 4.49 y 4.52) hasta cintas (*ribbons*) de agregados de plagioclase (fotografías 4.47 y 4.50). El resultado final es la milonitización de las rocas. No hay que olvidar que este proceso deformativo se produce simultáneamente con un retrometamorfismo que dio lugar a un cambio composicional en los nuevos granos recrystalizados, e incluso al

crecimiento de cristales tabulares de plagioclasa sódica en la matriz (fotografías 4.24 a 4.27). En definitiva, el deslizamiento de dislocaciones y la intensa recrystalización dinámica deben desempeñar un papel esencial en el desarrollo de la microfábrica de estas rocas cizalladas.

FOTOS 4.1 – 4.8 (objetivo 4x)
Muestras de Almonaster la Real

4.1. B.0601-2: anfibolita bandeada de grano grueso con clinopiroxeno. Textura granoblástica con bandas ligeramente más enriquecidas en plagioclasa y otras en anfíbol, que se disponen paralelamente a una foliación de origen metamórfico (S_1). Los cristales de plagioclasa presentan caras desigualmente desarrolladas, es decir, son xenomorfos.

4.2. B.0601-4: anfibolita bandeada con clinopiroxeno. Textura granonematoblástica. La roca se encuentra bandeada composicionalmente. Esta vista muestra una de esas bandas enriquecida en plagioclasas, macladas polisintéticamente según maclas de deformación y orientadas paralelamente a la foliación metamórfica (S_1). En la parte inferior derecha se observa un grano de plagioclasa de grandes dimensiones respecto al resto y con macla sencilla.

4.3. B.0601-4: misma muestra que la anterior. Se trata de una banda de tamaño de grano más fino enriquecida en anfíbol. Se observa una lineación mineral (L_1) definida, principalmente, por los prismas alargados de anfíbol.

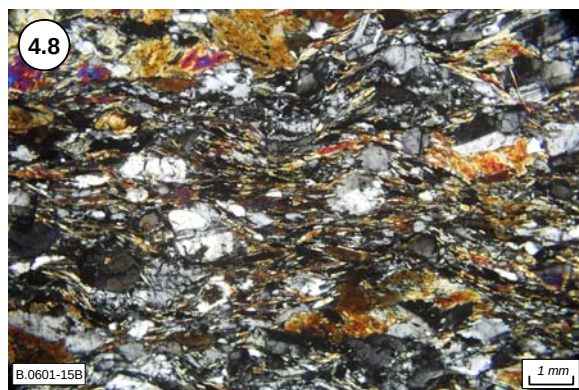
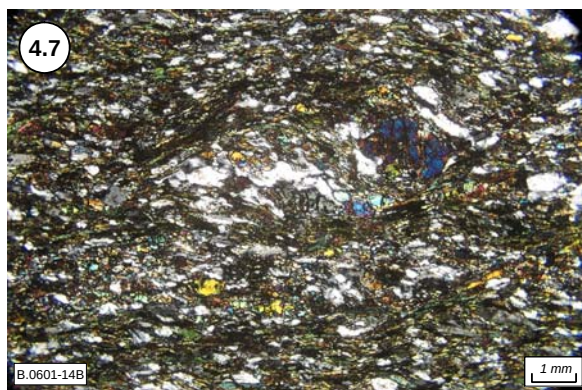
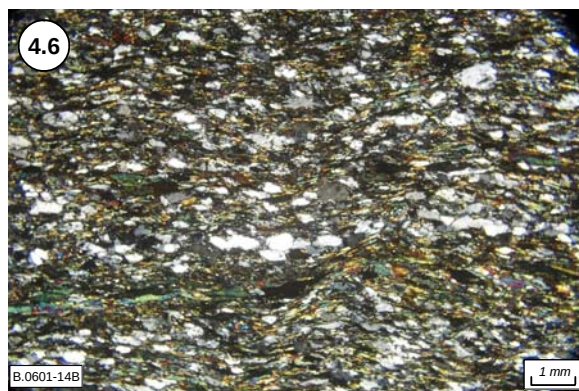
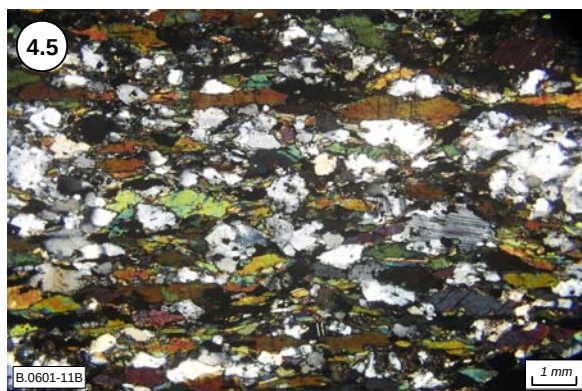
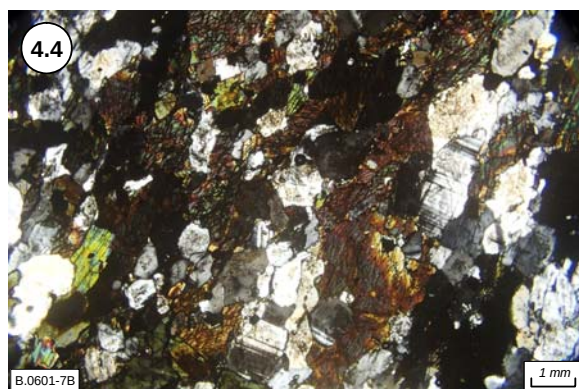
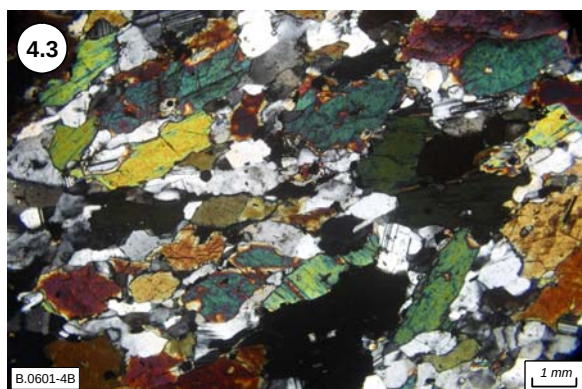
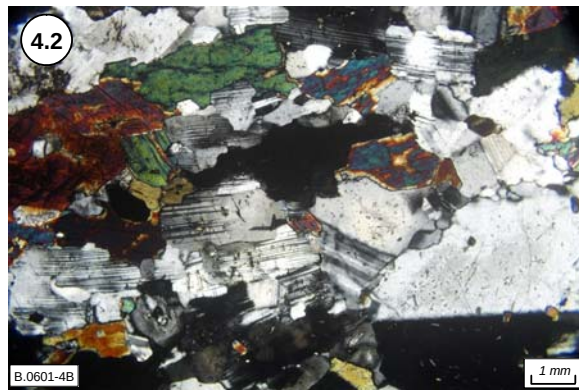
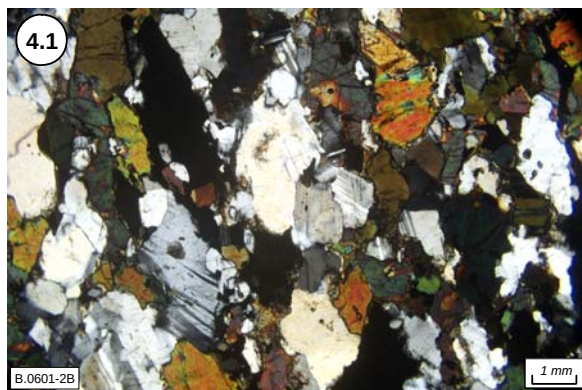
4.4. B.0601-7: anfibolita bandeada sin clinopiroxeno. Alternancia entre porfiroclastos de anfíbol y de plagioclasa, los primeros de mayor tamaño. Las plagioclasas presentan maclas de deformación polisintéticas cuyos planos se orientan perpendicularmente a la dirección de la lineación.

4.5. B.0601-11: anfibolita cizallada. Textura granonematoblástica definida por la alternancia de bandas de anfíbol y plagioclasa, de tamaño de grano menor que las muestras anteriores, y cuyos ejes largos se disponen paralelamente a la foliación milonítica S_2 (dirección E-O sobre el papel).

4.6. B.0601-14: anfibolita cizallada. Tamaño de grano fino. Presenta la misma mineralogía que las anfibolitas bandeadas sin clinopiroxeno pero, a diferencia de ellas, se encuentra afectada por la zona de cizalla Suribérica. Respecto a las muestras anteriores se observa una clarísima reducción en el tamaño de grano y aparecen, por primera vez, microestructuras del tipo S-C y *ribbons* de plagioclasas producto de la deformación asociada a la zona de cizalla Suribérica.

4.7. B.0601-14: anfibolita cizallada. Porfiroclastos de plagioclasa y actinolita rodeados por la foliación milonítica S_1 .

4.8. B.0601-15: esquisto máfico. Tamaño de grano fino. Textura porfiroclástica con grandes cristales de plagioclasa (la mayoría con maclas sencillas) preservados de la deformación y rodeados por la foliación milonítica definida por prismas alargados de anfíbol. Se observa el desarrollo de estructuras de tipo S-C.



FOTOS 4.9 – 4.16 (objetivo 4x, cuando es 10x se especifica)
Muestras de Almonaster la Real

4.9. B.0601-16: esquisto máfico. Se parece a la fotografía 4.8 pero de tamaño de grano más fino. La matriz preserva porfiroclastos de plagioclasa parcialmente seritizados y rodeados por la foliación milonítica. Al igual que en la muestra 15, se observan estructuras S-C.

4.10. B.0601-17: esquisto máfico. Foliación milonítica crenulada y tamaño de grano muy fino, lo que ha hecho imposible la medición de granos de plagioclasa con la platina universal.

4.11. Cristal subidiomorfo de plagioclasa (10x) tomado de la muestra 2, en el plano XY, paralelo a la foliación metamórfica S_1 . Macla polisintética de origen mecánico con individuos maclados que presentan terminaciones afiladas (*tapered*), típico de las maclas de deformación. Se observa una ligera extinción ondulante hacia la parte superior del cristal, allí donde las maclas se incurvan.

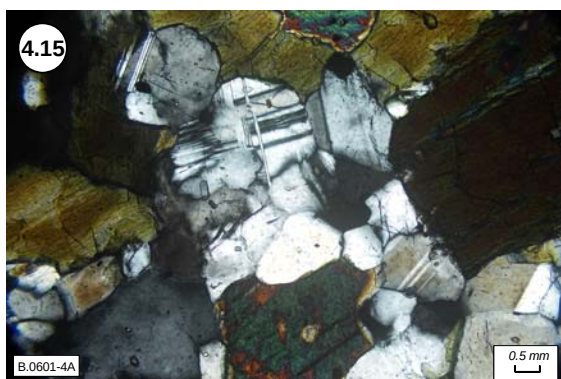
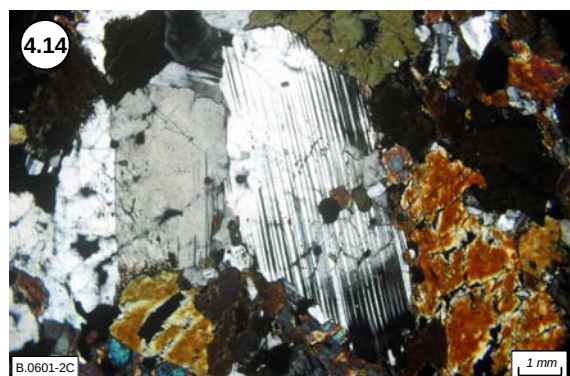
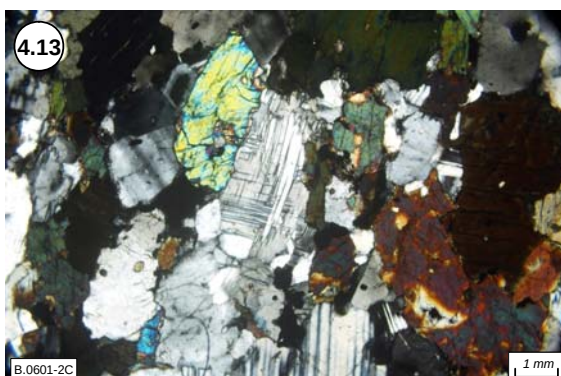
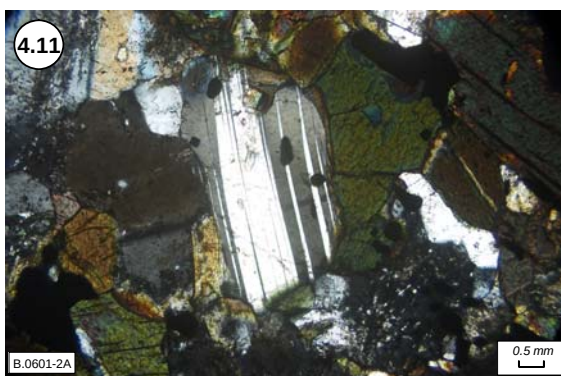
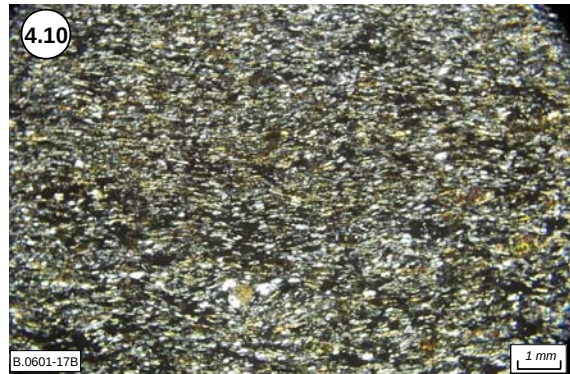
4.12. Grano subidiomorfo de plagioclasa maclado. Procede de la muestra 2, al igual que la fotografía 4.11, pero del plano paralelo a la dirección de la lineación. Se trata de una macla Albita-Carlsbad compuesta por dos individuos maclados polisintéticamente. La parte superior del cristal ha desarrollado una estructura en *microkink*. Se observa también extinción ondulante.

4.13. Cristales xenomorfos de plagioclasas con maclas polisintéticas de deformación. En la parte central se distingue un porfiroclasto con dos familias de maclas conjugadas. El *set* de maclas verticales (en posición de máxima iluminación) presenta terminaciones afiladas, típicas de las maclas de deformación, que se superponen al otro *set* de maclas normales a éstas.

4.14. Dos cristales de plagioclasa intercrecidos en la muestra 2. El de la izquierda presenta macla sencilla. El de la derecha consiste en maclas polisintéticas y presenta una extinción variable desde el núcleo hacia los bordes del grano. Esto es debido a que el grano está zonado. Sobreimpuesta a esta zonación se observa una extinción ondulante de origen mecánico.

4.15. Varios cristales de plagioclasa (10x) recrystalizados y con textura granoblástica. Presentan tanto maclas sencillas como polisintéticas. En el caso del grano de mayor tamaño de los situados en el centro de la imagen (a cuya derecha tiene en contacto un grano de plagioclasa con macla sencilla), se observan dos familias conjugadas de maclas de origen mecánico.

4.16. En la parte central se distingue un grano de plagioclasa maclado polisintéticamente según la ley Albita-Carlsbad. El individuo inferior, el que está en extinción, presenta una clara estructura en *microkink*.



FOTOS 4.17 – 4.24 (objetivo 4x, cuando es 10x se especifica)**Muestras de Almonaster la Real**

4.17. Agregado de granos recristalizados de plagioclasa con maclas sencillas y múltiples. En la parte superior de la fotografía, bajo un grano de macla sencilla, se observa uno con maclas polisintéticas en cuya parte derecha ha desarrollado un conjunto de malas perpendiculares a las principales.

4.18. Porfiroclasto subidiomorfo de plagioclasa maclado según la ley Albita-Carlsbad. El individuo derecho, en posición de extinción parcial, se encuentra mejor desarrollado y la diferencia en el grado de extinción se debe a la zonación que presenta.

4.19. Grano xenomorfo de plagioclasa con maclado polisintético y ligeramente alterado. Hacia la parte superior se observa cómo las maclas se arquean girando en sentido antihorario

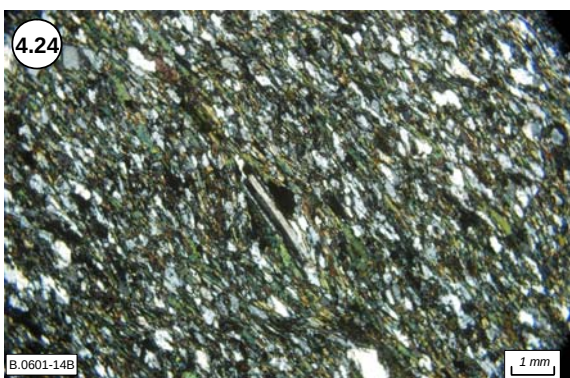
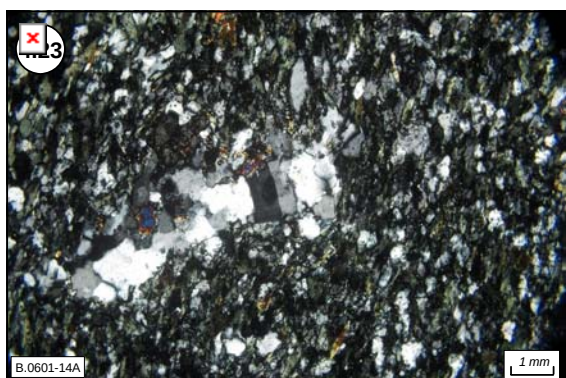
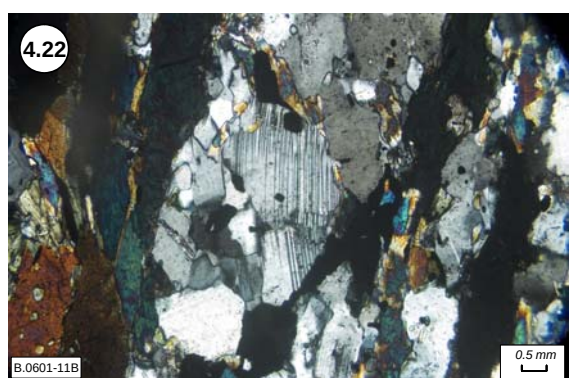
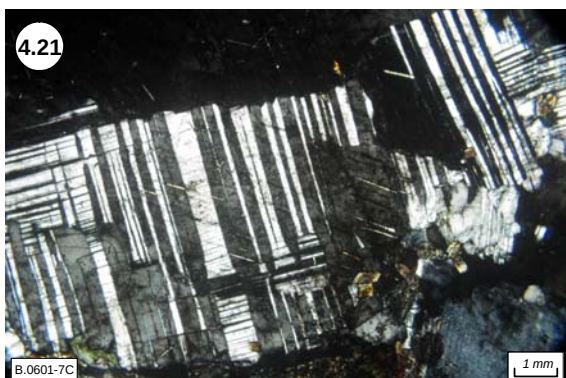
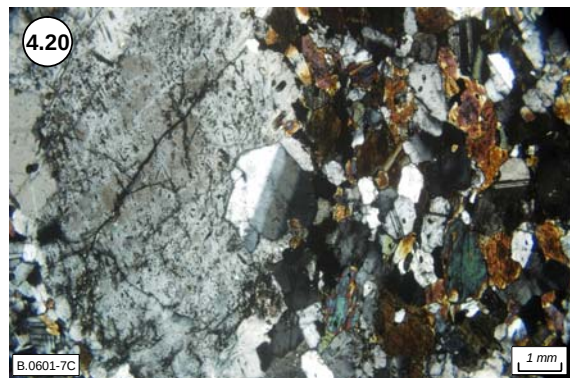
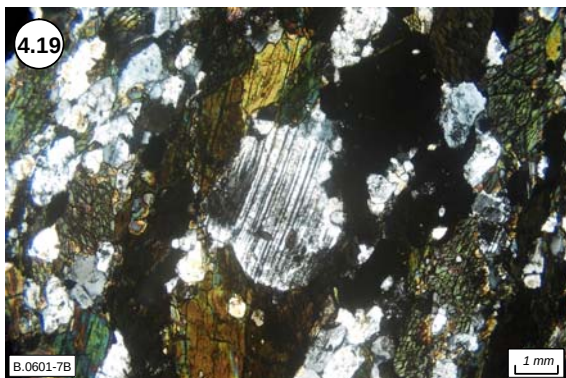
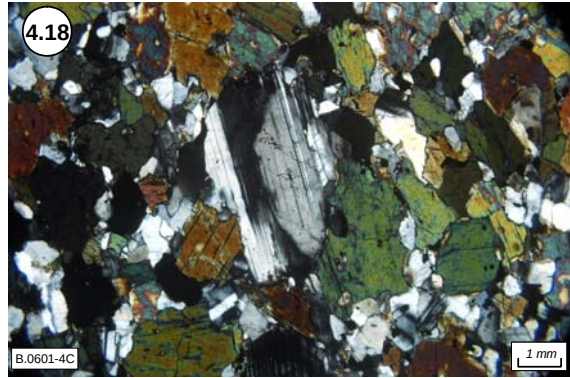
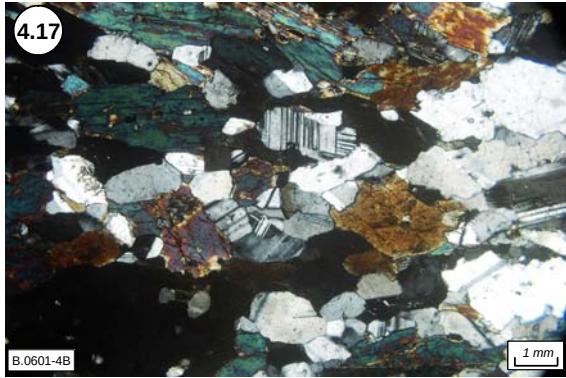
4.20. Grano de plagioclasa subidiomorfo incluido en un porfiroclastos de enormes dimensiones. El cristal muestra varios bordes de subgrano paralelos, lo cual se ve por el grado de extinción de cada uno de ellos. Estos pasan progresivamente desde la posición de máxima iluminación en el miembro izquierdo hasta la de máxima extinción en el derecho.

4.21. Intercrecimiento de cristales de plagioclasa con extinción ondulante. Presentan maclado polisintético de origen mecánico y de crecimiento. En algunas zonas se observa el desarrollo de una segunda familia de maclas conjugadas, bastante peor desarrolladas que el *set* principal (en posición casi N-S de la fotografía) y perpendiculares a éstas.

4.22. Grano de plagioclasa en la parte central de la imagen (10x). Maclado polisintético con terminación afilada de las maclas, típico de las maclas de deformación. El cristal se encuentra fracturado en su parte media, lo cual provoca que las maclas desvíen su orientación formando un *microkink*. En su parte izquierda, se encuentra rodeado por granos de feldespatos recristalizados.

4.23. Banda discontinua de agregados de plagioclasa de tamaño de grano mayor que la matriz. Hacia la parte derecha se observa un grano de plagioclasa con macla sencilla y zonado. Bordes de grano irregulares y extinción ondulante.

4.24. Cristal de plagioclasa muy alargado, de hábito acicular, inmerso en una matriz de tamaño de grano muy fino. El tipo de macla es sencilla, con el individuo izquierdo en posición de extinción.



FOTOS 4.25 – 4.30 (objetivo 4x, cuando es 10x se especifica)**Muestras de Almonaster la Real**

4.25. Granos de plagioclasa de hábito acicular y con maclas sencillas. Los ejes largos de los cristales definen la foliación milonítica S_2 . Se encuentran inmersos en una matriz un tanto caótica de cristales de plagioclasa y anfíbol con formas muy irregulares y caras muy mal desarrolladas.

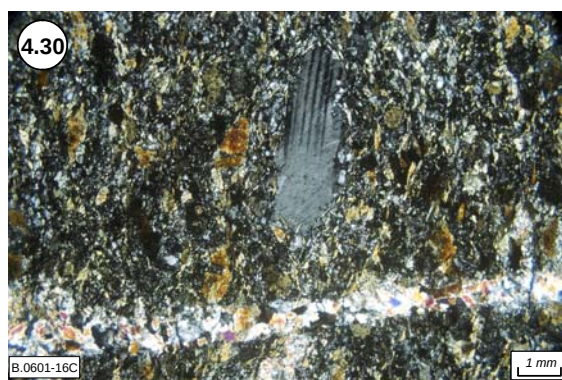
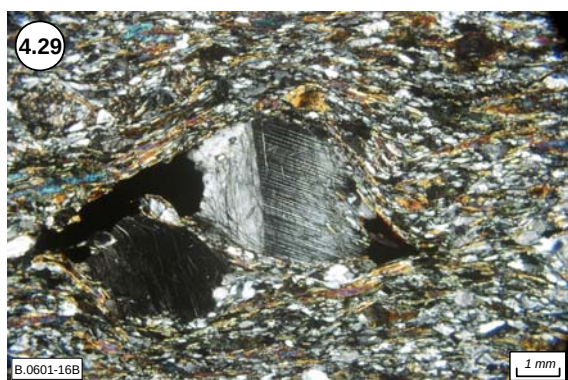
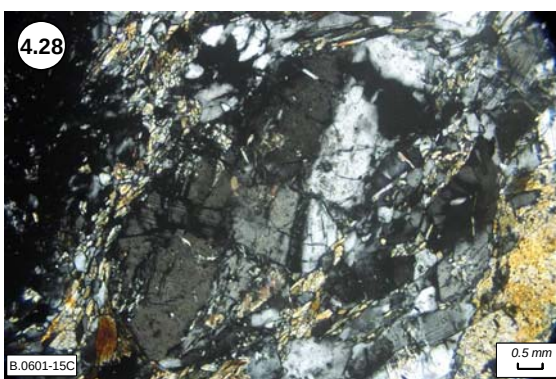
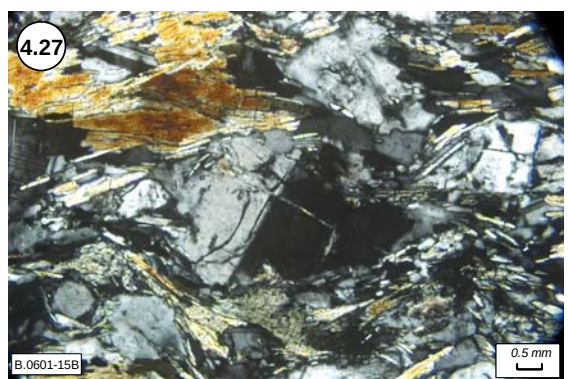
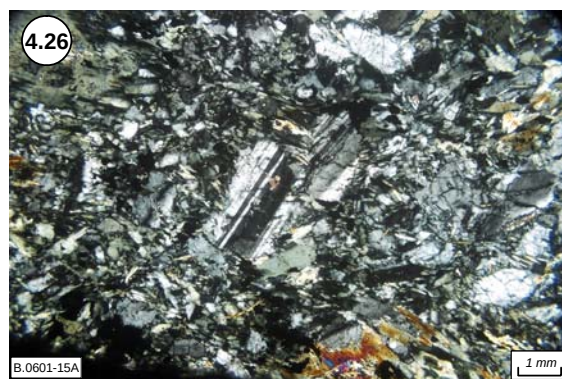
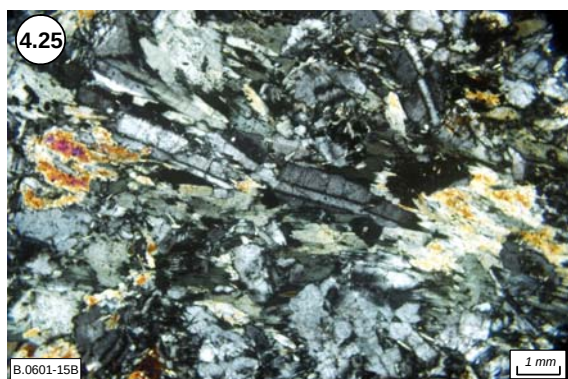
4.26. En el centro de la imagen, porfiroclasto de plagioclasa maclado según la ley Albita-Carlsbad, con el individuo derecho en posición de extinción. Se encuentra inmerso en una matriz de pequeños cristales de feldespatos y anfíboles de hábito xenomorfo, con formas muy irregulares.

4.27. Porfiroclasto de plagioclasa (10x) de tipo σ . Presenta una macla sencilla y forma una estructura núcleo-manto en donde la recrystalización es más evidente hacia las colas (*wings* o *tails*). Se observa una clara asimetría, la cual indica sentido de movimiento senestro (bloque de techo hacia el SO). Se encuentra rodeado por granos alargados de anfíbol que son los que marcan la foliación principal de la roca.

4.28. Varios granos de plagioclasa (10x) con maclas sencillas y extinción ondulante debida a la deformación. El cristal de la derecha se encuentra fracturado. En su conjunto, se encuentran rodeados por pequeños granos recrystalizados de plagioclasa que forman una estructura núcleo-manto (es decir, se trata de porfiroclastos manteados), aunque no tan clara como la de imagen 4.27.

4.29. Al igual que en la fotografía 4.27, se observa una estructura asimétrica núcleo-manto compuesta, principalmente, por dos cristales de plagioclasa en forma almendrada. El de arriba es una plagioclasa con maclas polisintéticas de deformación (bordes afilados). El de abajo es un feldespato sin maclar en posición de extinción. Alrededor de ambos, y también entre ellos, la recrystalización es intensa, formando en su conjunto un porfiroclasto manteado de tipo σ rodeado por la foliación milonítica (S_2) que se curva adaptándose a él.

4.30. Cristal de plagioclasa de tamaño de grano mucho mayor que la matriz que lo rodea. Presenta maclas polisintéticas, con uno de los dos individuos (el que se encuentra en posición de semi extinción) mucho más desarrollado que el otro. En la parte inferior de la imagen y cruzándola de derecha a izquierda, se observa una vena rellena de granos recrystalizados de plagioclasa, anfíbol y epidota.



FOTOS 4.31 – 4.38 (objetivo 4x)**Muestras de Veredas**

4.31. B.0602-1: anfibolita bandeada con clinopiroxeno. Textura granoblástica con abundancia composicional de anfíbol, piroxeno y algunos porfiroclastos mayores de plagioclase. La imagen es representativa de las bandas de menor tamaño de grano de las anfibolitas bandeadas.

4.32. B.0602-1: anfibolita bandeada con clinopiroxeno. Misma muestra que la imagen anterior (4.31), pero en este caso se representa una banda de mayor tamaño de grano y enriquecida en plagioclasas con maclas polisintéticas de origen mecánico.

4.33. B.0602-2: anfibolita bandeada con textura granoblástica y muy enriquecida en feldespatos. Evidentes signos de recrystalización y formación de subgranos. Esta imagen es representativa de las bandas de mayor tamaño de grano.

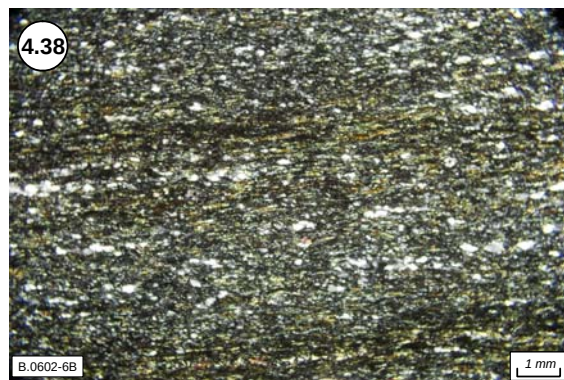
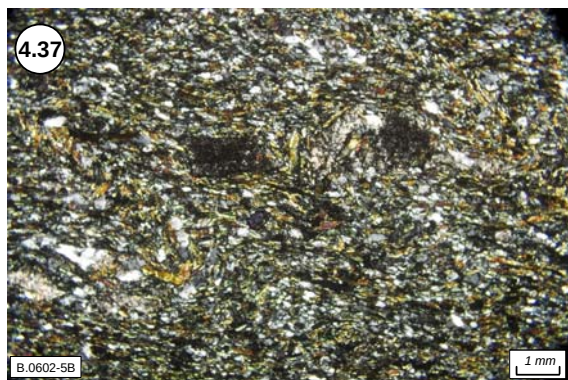
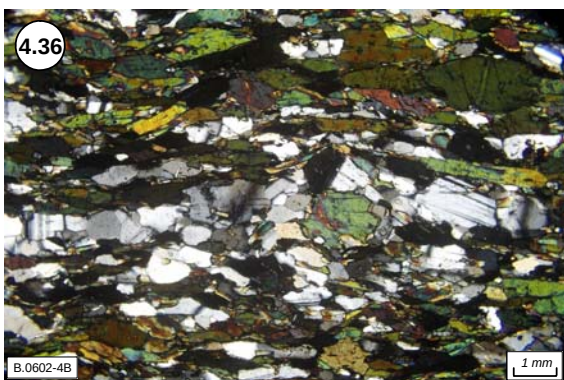
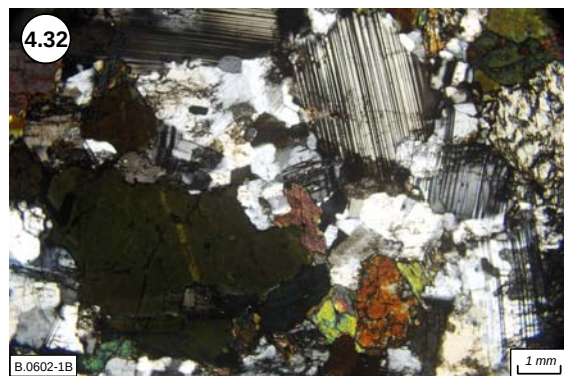
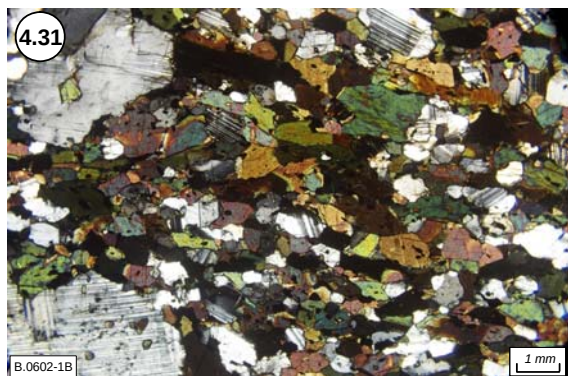
4.34. B.0602-2: misma muestra que la anterior, pero se trata de una banda de tamaño de grano más pequeño y con la misma textura granoblástica. Se observa también una intensa recrystalización y una abundancia modal de feldespatos muy superior al resto de fases minerales, como por ejemplo el anfíbol, que aparece como granos de tamaño de grano mucho más pequeño.

4.35. B.0602-3: anfibolita cizallada. Textura granoblástica y tamaño de grano medio, con cristales de bordes irregulares y caras mal formadas, de hábito xenomorfo. Los granos con los colores de interferencia más altos corresponden a hornblenda.

4.36. B.0602-4: anfibolita bandeada sin clinopiroxeno. Textura granonematoblástica en donde los minerales de anfíbol se disponen con sus ejes largos definiendo la foliación metamórfica (S_1). En la parte central de la imagen se observa una banda leucocrática de granos recrystalizados de plagioclase.

4.37. B.0602-5: anfibolita cizallada. Supone una importante reducción del tamaño de grano en comparación con las muestras anteriores, las cuales eran más parecidas entre sí. Se observa cómo la foliación milonítica (S_2) está crenulada, llegando a formar pliegues cuyos flancos y charnelas quedan definidos, principalmente, por prismas alargados de anfíbol.

4.38. B.0602-6: esquisto máfico. Muestra muy retromorfizada (cloritizada) y con un tamaño de grano tan fino que ha hecho imposible la medición de granos de plagioclase maclados con la platina universal. La foliación milonítica (S_2) se encuentra muy ligeramente crenulada.



FOTOS 4.39 – 4.46 (objetivo 4x, cuando es 10x se especifica)**Muestras de Veredas**

4.39. Dos cristales de plagioclasa intercrecidos. Ambos presentan maclas de deformación polisintéticas que terminan en bordes afilados, algo muy típico de las maclas mecánicas. El cristal de la derecha se encuentra fracturado y presenta zonación. Ambos muestran extinción ondulante.

4.40. Cristal de plagioclasa intercrecido con uno de clinopiroxeno (alto color de interferencia). El grano de plagioclasa muestra claras evidencias de deformación, lo cual se manifiesta por la curvatura de los planos de macla y la geometría ahusada de éstas.

4.41. Porfiroclasto de plagioclasa con sólo dos individuos maclados (macla sencilla) y sin deformar.

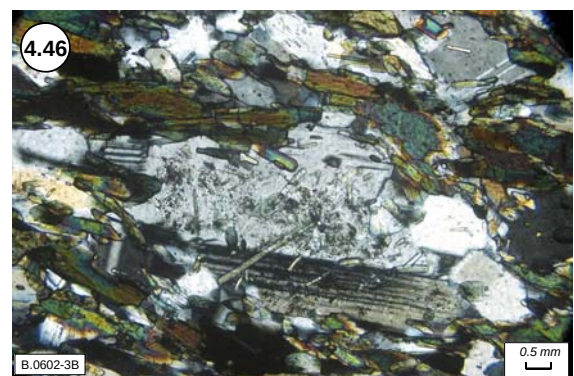
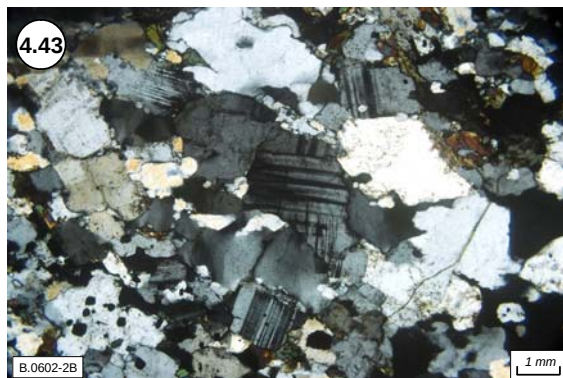
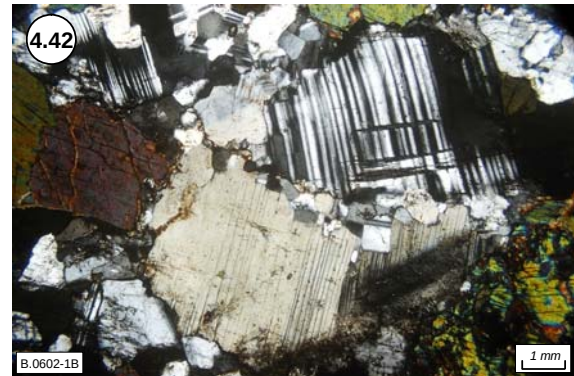
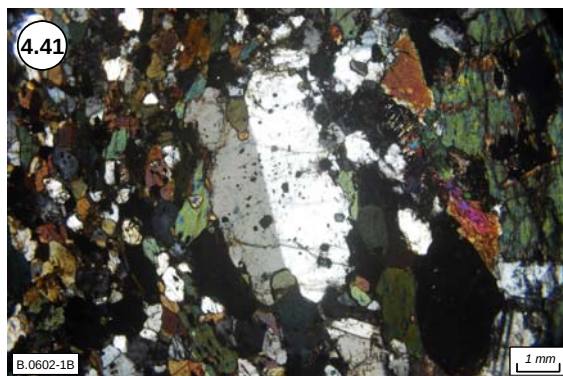
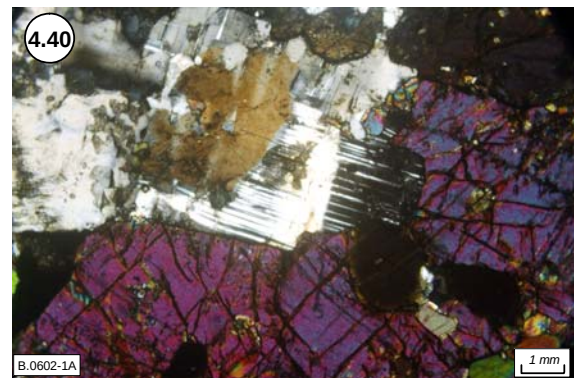
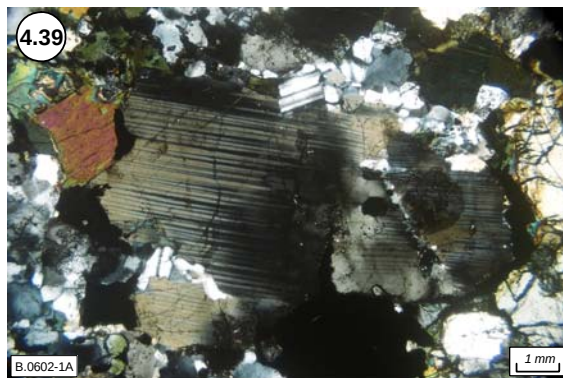
4.42. Agregado de cristales de plagioclasa de muy diferentes tamaños de grano y con maclas polisintéticas de origen mecánico y de crecimiento. Se ven dos granos de mayor tamaño, el inferior presenta *microkinking* y se observa claramente que uno de los individuos del *kink* (en posición de máxima iluminación) se encuentra mucho más desarrollado que el otro, el cual presenta extinción ondulante. El grano que se encuentra por encima de él presenta maclas de bordes afilados y ligeramente combadas, hacia su parte superior, debidas a la deformación. En este mismo cristal se aprecia el desarrollo incipiente de un segundo *set* de maclas conjugadas perpendiculares a las principales.

4.43. Agregado de granos de plagioclasa recrystalizados, algunas de las cuales presentan maclas polisintéticas. En la parte central de la imagen se observa un cristal con dos *sets* conjugados de maclas mecánicas, aunque el mejor desarrollado se sobreimpone al segundo (en dirección E-O de la imagen).

4.44. Granos recrystalizados de plagioclasa. En la parte central se ve un cristal con dos familias de maclas conjugadas, algo típico de las maclas de deformación. Una de ellas, la menos desarrollada, se sobreimpone a la otra, sobre todo hacia la parte derecha del cristal, donde parece mostrar geometrías en cuña típicas de las maclas mecánicas. El cristal presenta, además, extinción ondulante y las maclas están alabeadas.

4.45. Agregado de granos recrystalizados (10x) de hábito xenomorfo y subidiomorfos. En la parte izquierda aparece un cristal de plagioclasa con macla polisintética en el que uno de los individuos (el que se ve en extinción) se encuentra mucho más desarrollado que el otro. Además, presenta una ligera zonación y extinción ondulante. En la parte central se observa un grano maclado polisintéticamente, con dos familias de maclas conjugadas, una mucho mejor desarrollada que la otra. A la derecha, otro grano de plagioclasa con macla sencilla.

4.46. Porfiroclasto de plagioclasa (10x) de tipo σ y maclado según la ley Albita-Carlsbad. El grano se encuentra rodeado de prismas alargados de anfíbol que definen la foliación milonítica (S_2).



FOTOS 4.47 – 4.52 (objetivo 4x, cuando es 10x se especifica)**Muestras de Veredas**

4.47. Agregado de cristales de plagioclasa de hábito irregular y con maclas polisintéticas de deformación y de crecimiento.

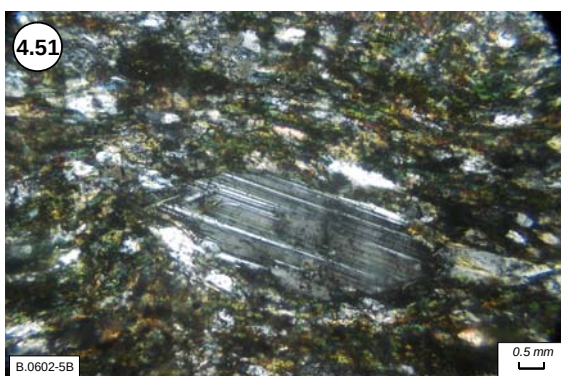
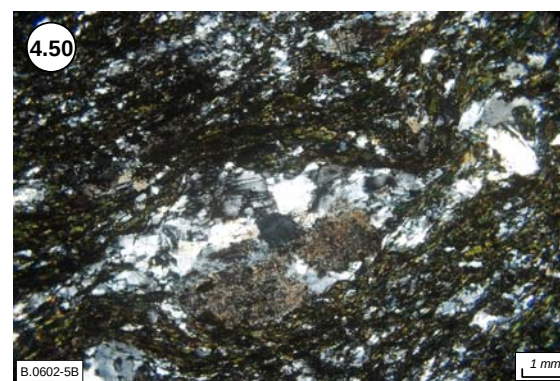
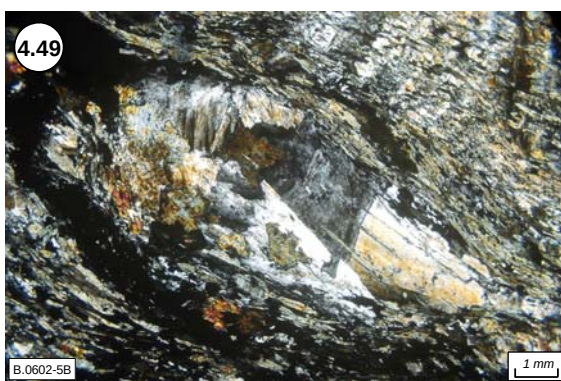
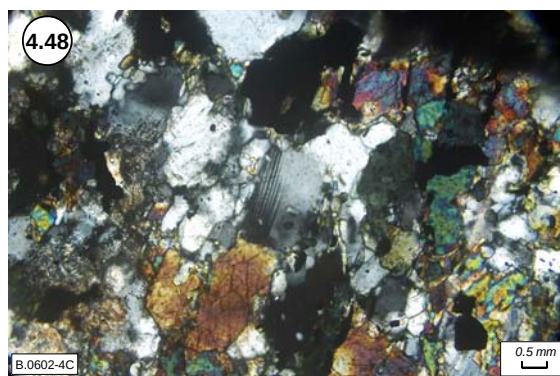
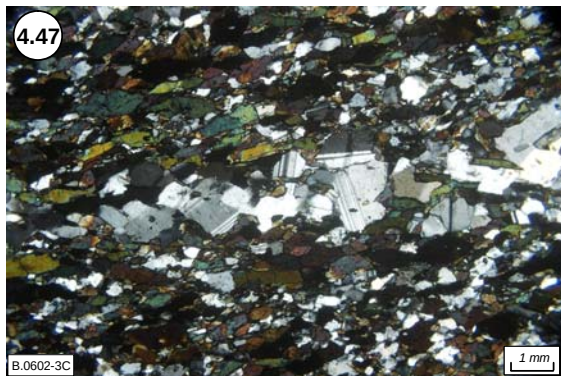
4.48. En la parte central se observa un grano de plagioclasa deformado (10x), con extinción ondulante y maclado polisintético. El individuo que se encuentra en extinción presenta maclas con terminaciones afiladas y ligeramente dobladas, muy común en maclas de deformación.

4.49. Porfiroclasto de plagioclasa de tipo σ . Presenta extinción ondulante y se encuentra intercrecido con cristales de anfíbol de hábito muy irregular. El cristal se encuentra rodeado por prismas alargados de anfíbol de tamaño de grano muy fino, que definen la foliación milonítica (S_2). La plagioclasa presenta una estructura núcleo-manto, es decir, se trata de un porfiroclasto manteado.

4.50. Porfiroclasto de plagioclasa recrystalizado y con la mitad inferior alterada, probablemente seritizada. El agregado en forma de sigmoidal se encuentra rodeado, igual que se ha visto en imágenes previas, por la foliación milonítica (S_2).

4.51. Porfiroclasto de plagioclasa (10x) con maclas múltiples de origen deformacional. Uno de los individuos, el que se encuentra en posición de extinción, presenta extinción ondulante y se encuentra mucho más desarrollado que el otro. La matriz es de tamaño de grano muy fino y muy enriquecida en anfíbol.

4.52. Porfiroclasto de plagioclasa tipo σ , con macla sencilla y rodeado por cristales de la misma composición producto de la recrystalización, lo que da lugar a una estructura núcleo-manto. Hacia los bordes de las colas la recrystalización es ligeramente más intensa, encontrándose cristales de menor tamaño.



4.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CORTE DE ALMONASTER LA REAL

4.2.1. Planos de ajuste y frecuencia de maclado

Siguiendo la terminología de Burri *et al.* (1967), las leyes de macla se clasifican en dos grupos: ley normal y ley paralela o compleja. Bajo el segundo grupo se engloban las maclas de tipo Carlsbad, Aclina-Periclina, Ala, Albita-Ala y Albita-Carlsbad. En el grupo de ley normal se incluyen las de Albita, Manebach, Baveno derecha y Baveno izquierda. Según esta clasificación, se observa un patrón en el que las plagioclasas de las muestras de Almonaster la Real se ajustan sistemáticamente a la ley de macla paralela o compleja más que a la ley normal, con la excepción de la muestra 4. Además, hacia el muro de las metabasitas va aumentando el porcentaje de plagioclasas que ajustan a ley paralela o compleja, con un ligero descenso para el caso de la muestra 15. Esto ocurre en todas las muestras del corte excepto en la 4 y 15, en las que se observa un ligero descenso de ese porcentaje (fig.4.1 y 4.3, Tabla IV.1).

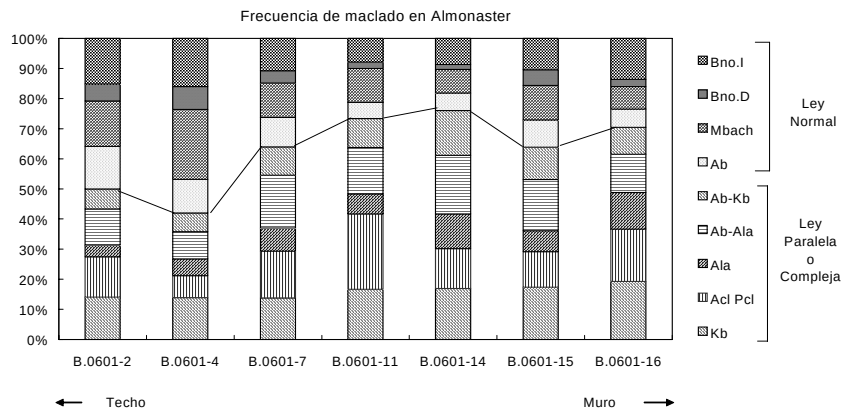


Fig.4.1. Frecuencia de maclado en un diagrama de barras acumuladas, con los porcentajes de cada tipo de macla. Se indica los dos tipos de leyes de maclas según la terminología de Burri *et al.* (1967). La línea continua que une las barras representa el límite entre la ley normal y la ley paralela o compleja. En el eje de abscisas se representan las siete muestras estudiadas y su posición hacia techo o muro. Bno. I: Baveno izquierda, Bno. D: Baveno derecha, Mbach: Manebach; Ab: Albita, Ab-Kb: Albita-Carlsbad, Ab-Ala: Albita-Ala, Ala: Ala, Acl Pcl: Aclina Periclina, Kb: Carlsbad.

Otra observación relevante es que el porcentaje de maclas de ley paralela o compleja es inversamente proporcional a la temperatura de deformación¹. La muestra 4, por ejemplo, implica una temperatura mayor que la 2 (826°C frente a 790°C). Si se proyecta el porcentaje de maclas de ley normal (o de ley paralela o compleja) frente a la temperatura para las muestras en las que se dispone de una estimación de la misma, se aprecia una correlación clara (fig.4.2).

¹ Temperaturas calculadas con el geotermómetro Hb-Pl (Holland & Blundy, 1994) por Díaz Azpiroz (tesis, 2001). Ver [tabla. III.1](#) (capítulo de metodología).

TABLA IV.1. Relación de muestras, números de granos medidos en cada una de ellas y los porcentajes de cada tipo de macla. Ver fig.4.1 para las abreviaturas empleadas para los diferentes tipos de las maclas. Al igual que en la fig.4.1 se observa, en líneas generales, un aumento progresivo del porcentaje de las leyes de maclas paralelas o complejas de techo a muro, con un ligero descenso para las muestras 4 y 15.

MUESTRAS Nº de granos	B.0601-2 286	B.0601-4 288	B.0601-7 297	B.0601-11 240	B.0601-14 242	B.0601-15 288	B.0601-16 213
MACLAS	%	%	%	%	%	%	%
Kb	14.08	13.89	13.80	16.67	16.94	17.36	19.25
AcI Pcl	13.38	7.29	15.49	25.00	13.22	11.81	17.37
Ala	3.87	5.56	7.74	6.67	11.57	6.94	12.21
Ab-Ala	11.97	9.03	17.51	15.42	19.42	17.01	12.68
Ab-Kb	6.69	6.25	9.43	9.58	14.88	10.76	8.92
L.PARALELA ó C.	50.00	42.02	63.97	73.34	76.03	63.89	70.43
Ab	14.08	11.11	9.76	5.42	5.79	9.03	6.10
Mbach	15.14	23.26	11.45	11.25	7.85	11.46	7.51
Bno.D	5.63	7.64	4.04	2.08	1.65	5.21	2.35
Bno.I	15.14	15.97	10.77	7.92	8.68	10.42	13.62
L.NORMAL	50.00	57.98	36.02	26.67	23.97	36.11	29.58

Esta correlación se observa incluso en el corte de Veredas como se verá más adelante, en la segunda parte de este capítulo 4. En cuanto a la muestra 15, es probable que corresponda a una banda en la que la deformación de baja temperatura en la zona de cizalla Suribérica (ZCS) no sea muy intensa y se preserven, por ello, los rasgos de la deformación anterior de mayor temperatura. Como nos disponemos de datos referentes a la temperatura de deformación para las muestras 14 y 16, no podemos decir mucho más. Como se ve en la fig.4.2, hay un patrón de variación del porcentaje de maclas con la temperatura, aunque algunos tipos de maclas se desvían del patrón más frecuente. La tendencia general en las maclas de ley normal es reducir su porcentaje con la disminución de la temperatura, y lo contrario sucede con las de ley paralela o compleja. Se observan, sin embargo, algunas excepciones, como la muestra 15 para la macla de Aclina Periclina y la muestra 4 para la macla de Albita. El resto de anomalías no son tan significativas como ésta.

Dentro del grupo de maclas de ley paralela o compleja, las maclas tipo Carlsbad, Aclina Periclina y Albita-Ala son las más comunes, mientras que Ala y Albita-Carlsbad son las menos frecuentes, representando entorno a un 10-20% del total de las medidas, y aumentando ligeramente su proporción hacia muro (fig 4.4).

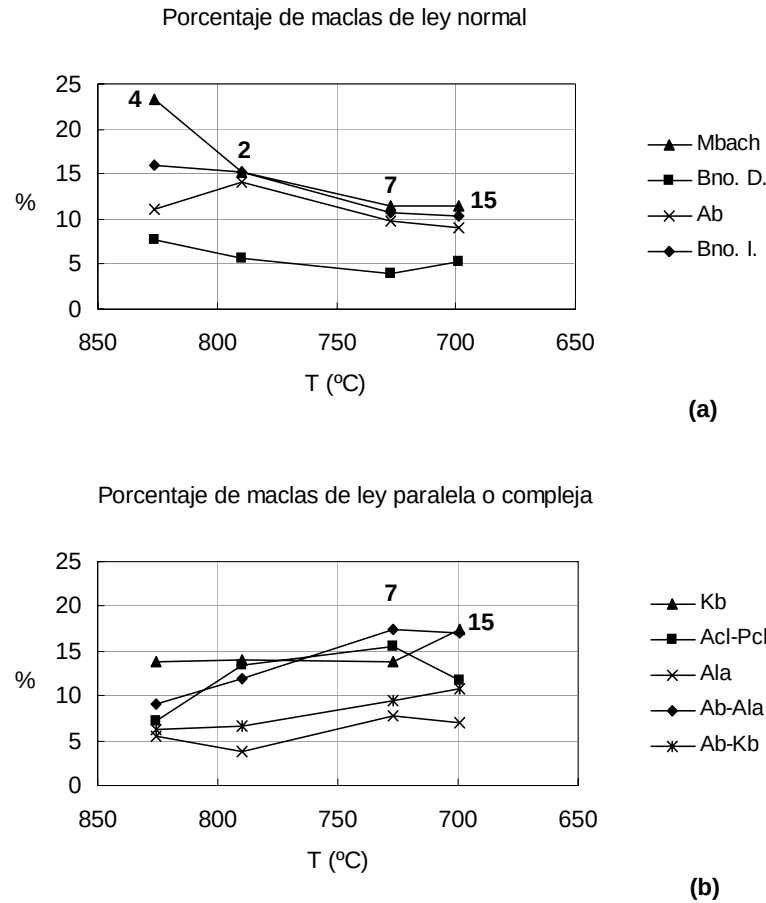


Fig.4.2. Porcentaje de tipos de maclas frente a la temperatura para las muestras 2, 4, 7 y 15. (a) En maclas de ley normal se observa una relación directamente proporcional a la temperatura, es decir, aumentan su porcentaje con el incremento de temperatura, sobre todo para el caso de Manebach de la muestra 4; no ocurre lo mismo, sin embargo, para la macla de Albita de la misma muestra. (b) En maclas de ley paralela o compleja ocurre lo contrario que en (a), los porcentajes de macla aumentan con el descenso de la temperatura excepto, sobre todo, para la macla de Aclina Periclina en la muestra 15, cuyo porcentaje desciende significativamente. Para la leyenda, ver fig.2.1.

En el caso de las maclas de ley normal, Baveno derecha es, con diferencia, la menos frecuente de la cuatro. También representa el menor porcentaje de ajuste entre todas las maclas posibles, excepto para las muestras 2 y 4 en las que Ala es la macla menos frecuente (fig.4.4). Considerando cada tipo de macla por separado, independientemente de que correspondan a una ley u otra, las más frecuentes son Carlsbad y Albita-Ala, y las menos, Ala, Albita y Baveno derecha. En las muestras en las que se han estimado las mayores temperaturas de deformación, Manebach excede a Carlsbad y a Albita-Ala como macla más frecuentes. Las muestras 11, 14 y 16, en las que no se pudo determinar la temperatura de deformación, se sitúan dentro de la zona de cizalla Suribérica (ZCS).

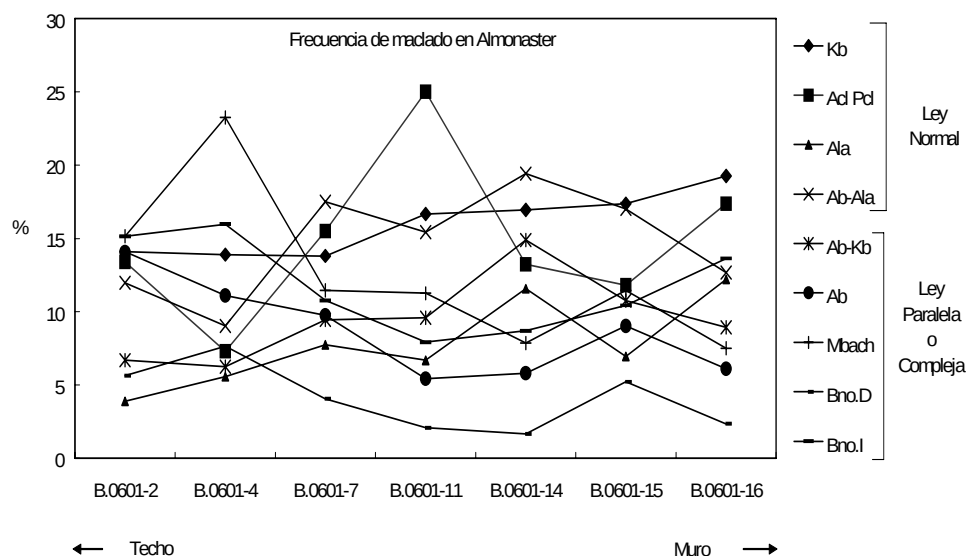


Fig. 4.3. El gráfico representa lo mismo que el de la fig.4.1, pero la frecuencia de maclado ha sido representada esta vez en un diagrama de dispersión unido por rectas. De este modo puede resultar más intuitivo que el diagrama de barras. Se observa, a grandes rasgos, que los patrones de evolución de las maclas son similares, con las diferencias más significativas en las muestras 2 y 16 que son las que presentan mayor intensidad en la deformación (precisamente hacia techo y muro de la serie de las metabasitas de Acebuches). Las variaciones más significativas se observan para las maclas de Manebach y Aclina Periclina para las muestras 4 y 11, respectivamente. Ver fig.4.1 para la leyenda. Ver texto para mayor explicación.

En líneas generales, el efecto que produce la ZCS es el aumento en la abundancia de las maclas de ley paralela o compleja, al contrario de lo que sucede para las maclas de ley normal. Este efecto es equivalente al producido por un descenso de la temperatura fuera de la ZCS. Como no se dispone de estimaciones termobarométricas dentro de la cizalla, no es posible saber si tal variación responde también a diferentes temperaturas de deformación, o es consecuencia, además, de los procesos de deformación ocurridos dentro de la ZCS. La variación del porcentaje de cada macla de unas muestras a otras puede verse en la fig.4.3. Los patrones de variación obtenidos son muy similares para las diferentes maclas, aunque con diferencias en la tendencia que presentan la primera y la última muestra (fig.4.3). Éstas son, precisamente, las que presentan mayor intensidad de deformación ya que se encuentran situadas hacia techo de la serie (muestra 2), en las cercanías del contacto con el Dominio Continental (DC), y hacia muro (muestra 16), correspondiente a la parte más intensamente deformada de la ZCS. Así, por ejemplo, las curvas de variación espacial de Albita y Baveno derecha son prácticamente iguales, con la única diferencia apreciable en la muestra 4 donde Albita disminuye y aumenta Baveno derecha. Existe una tercera curva, la de Baveno izquierda, que se parece también a la de Baveno derecha y que únicamente se distingue de ésta en la muestra 16. Mientras que para dicha muestra aumenta el porcentaje de Baveno izquierda, disminuye sin embargo el de Baveno derecha.

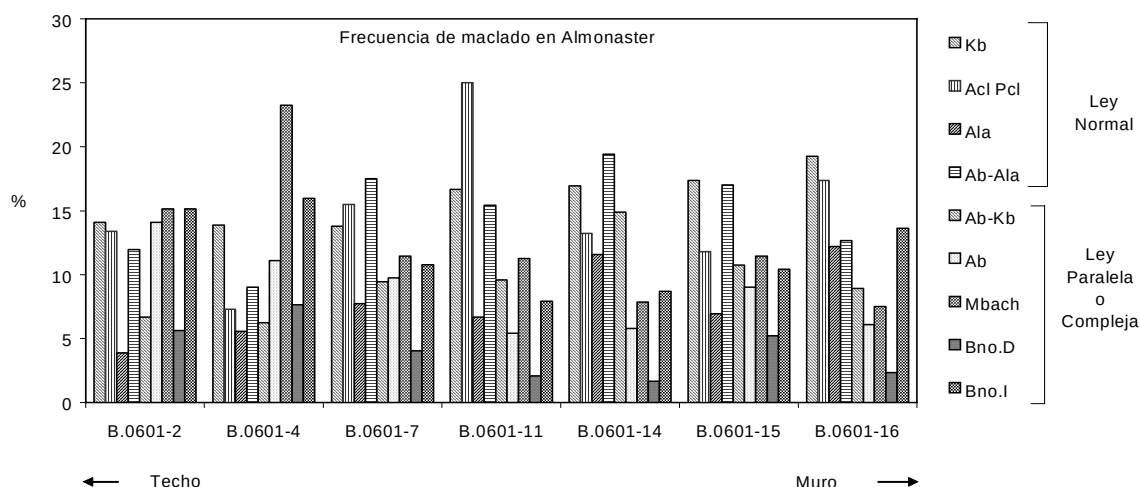
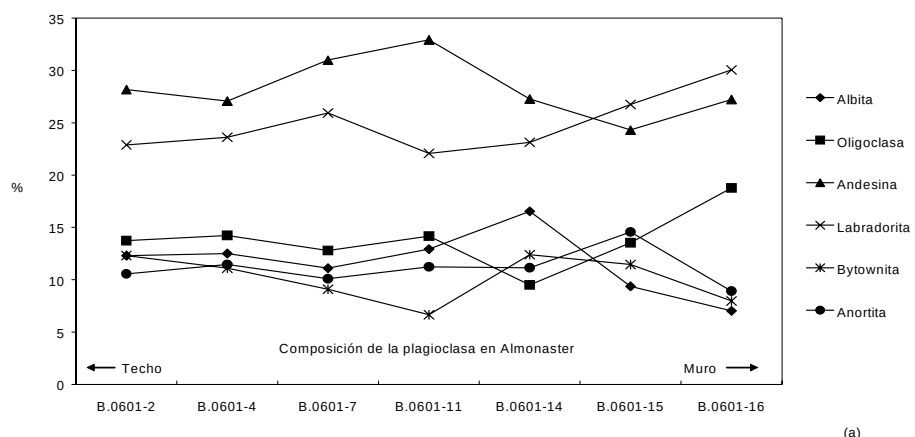


Fig. 4.4. Este diagrama es otra manera, al igual que las figs.4.1 y 4.3, de representar la frecuencia de maclado según un diagrama de barras sencillo. Para leyenda, ver fig.4.1. Se puede observar el notable incremento del porcentaje de las maclas de Manebach y Aclina Periclina para las muestras 4 y 11, respectivamente. El resto de porcentajes puede verse con ayuda de la Tabla IV.1, pero las maclas Ala, Albita-Carlsbad, Albita y Baveno derecha son las menos abundantes de todas.

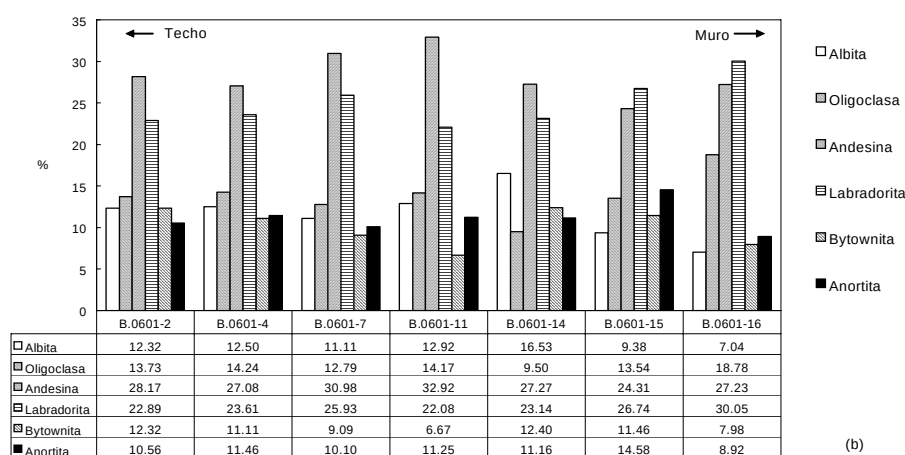
Otras curvas muy similares son las de Ala, Albita-Carlsbad y Albita-Ala, aunque nuevamente la diferencia entre ellas radica en la tendencia de la muestra 16. Mientras el número de maclas de Ala aumenta, los otros dos tipos disminuyen. El resto de curvas, es decir, Carlsbad, Aclina Periclina y Manebach, siguen tendencias de variación muy diferentes entre sí y también respecto al resto de maclas. Para la curva de Carlsbad la tendencia es bastante estable, con sólo pequeñas diferencias entre las tres primeras muestras (2, 4 y 7), cuyo porcentaje se mantiene prácticamente constante, y las cuatro últimas (11, 14, 15 y 16), en dónde dicho porcentaje aumenta. Las curvas de Aclina Periclina y Manebach son muy distintas, reflejando un patrón de evolución prácticamente opuesto. De hecho, mientras para las muestras 4, 14 y 15 la frecuencia de maclado de Aclina Periclina disminuye, la frecuencia de Manebach aumenta. No obstante, ocurre lo contrario para la muestra 16. Por lo tanto, y en líneas generales, en aquellas muestras en las que Aclina Periclina alcanza sus valores más altos, Manebach alcanza los mínimos y viceversa.

Composición de la plagioclasa

La composición de la plagioclasa se mantiene bastante constante a lo largo de todo el corte de Almonaster la Real y no presenta diferencias significativas de unas muestras a otras (fig.4.5).



(a)



(b)

Fig. 4.5. Gráficos de frecuencia o porcentaje de abundancia de cada tipo de plagioclasa en las muestras estudiadas. (a) Diagrama de dispersión de puntos. (b) Diagrama sencillo de barras con el porcentaje de cada composición. Los gráficos reflejan los mismos resultados, el hecho de poner ambos es porque pueda resultar más intuitivo uno u otro según las apreciaciones hechas en el texto. En (a) y (b) se observa que la andesina y labradorita son las composiciones más abundantes, y que el resto presentan una abundancia mucho menor, siendo la bytownita y anortita las composiciones menos frecuentes, sobre todo para las cuatro primeras muestras (2, 4, 7 y 11). La evolución de la frecuencia según las composiciones se mantiene similar a lo largo de todo el corte, excepto para las muestras 14, 15 y 16 en las que se pueden observar ligeros cambios: descinden la albita, la andesina y la bytownita y crecen las proporciones de oligoclasea y labradorita.

En líneas generales, se observa que aproximadamente la mitad de los granos de plagioclasas medidos presentan una composición que varía entre andesina y labradorita, tendiendo ligeramente hacia composiciones más andesínicas hacia techo y labradoríticas a muro (muestras 15 y 16). Las plagioclasas con An_{70-90} son muy escasas y no llegan nunca a alcanzar más de un 12% del volumen total. Se observan ligeros cambios en los porcentajes de anortita a partir de la muestra 14, es decir, hacia muro. En las cuatro primeras muestras (2 a 11) las composiciones An_{70-100} son las menos frecuentes. En la muestra 14 se produce un pequeño incremento de las plagioclasas de tipo albita y bytownita, y disminuyen los tipos oligoclasea y andesina. En la muestra 15 descinde la albita y

andesina y aumenta, sin embargo, la oligoclasa, labradorita y anortita. Y, finalmente, en la muestra 16 se produce un aumento generalizado en el rango An_{11-70} y las composiciones más extremas, An_{0-10} y An_{71-100} , son menos abundantes.

La plagioclasa es ligeramente más albítica que anortítica a lo largo de todo el corte, sobre todo hacia la parte media de la serie (muestra 11). En general, el porcentaje promedio de An está entre el 45% y el 50%. Si vemos la fig.4.6 (variación de la composición con la temperatura) se aprecia que, en efecto, la andesina y la labradorita son los tipos más comunes de plagioclasas y están bastante equilibradas entre sí (ver también a este respecto la fig.4.5a), y que con la disminución de la temperatura aumenta el porcentaje de ambos tipos de plagioclasas todavía más, excepto en la muestra 15, en donde desciende el porcentaje de andesina espectacularmente, a expensas, quizás, de la anortita y la bytownita.

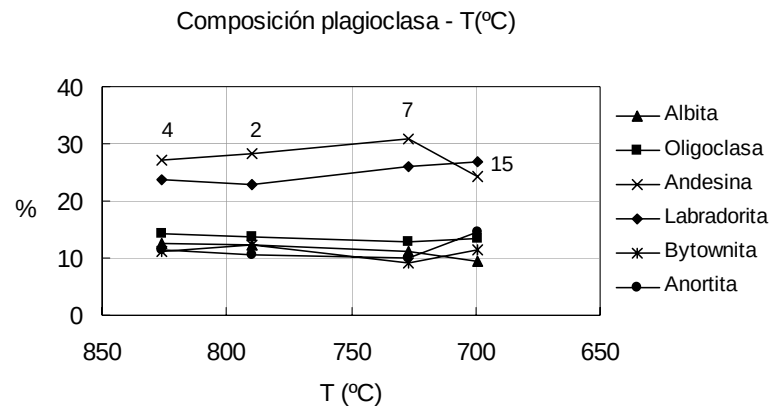


Fig.4.6. Abundancia de los distintos tipos de plagioclasa frente a la temperatura para las muestras 2, 4, 7, y 15. Para todas las composiciones los porcentajes se mantienen prácticamente constantes, sin grandes variaciones, a lo largo del perfil de temperatura. La andesina y la labradorita se destacan por encima del resto, siendo los tipos más comunes de plagioclasas. Conforme disminuye la temperatura desciende la andesina a expensas, quizás, del aumento de la labradorita y bytownita.

El incremento de anortita en la muestra 15 se debe probablemente a que existe, en esa muestra, un alto porcentaje de granos de plagioclasas relictos, pertenecientes al basalto o diabasa que es el protolito de las metabasitas. Dichas plagioclasas ígneas se ven claramente en algunos cortes, como en Aracena, pero no tan claramente en Almonaster la Real, donde sólo se pueden deducir a partir de un análisis tan detallado como éste. La muestra 15 no ha sufrido un metamorfismo tan importante como las muestras 2, 4 y 7, ni tampoco la deformación ni retrometamorfismo de la 14 o 16. Por ello, probablemente, conserva muchas anortitas ígneas relictas. En cuanto al aumento del porcentaje de las composiciones intermedias con la disminución de la temperatura, parece ligado al descenso en el contenido de Ca en la plagioclasa, lo que la hace menos anortítica. La muestra 14 es muy albítica como consecuencia del retrometamorfismo asociado a la zona de cizalla Suribérica (ZCS). ¿Pero por qué la 16 no lo es también? Quizás porque al ser de tamaño de grano muy fino, las

albitas neoformadas forman la mayor parte de los cristallitos de la matriz y no han sido granos medidos. Por el contrario, los fenocristales relictos de la roca ígnea original (anortitas) o del metamorfismo de alta temperatura (composiciones intermedias), son más fácilmente medibles y han resultado beneficiados en la estimación del porcentaje.

Porcentajes similares a los medidos en este trabajo han sido presentados previamente por Díaz Azpiroz (2001), aunque en este caso la determinación del porcentaje en anortita se ha realizado mediante el análisis químico con microscopio electrónico de los cristales de plagioclasa de las metabasitas. El parecido en los resultados obtenidos da una idea de la bondad del método de determinación del porcentaje de anortita con la platina universal. Por otro lado, hay que tener presentes las diferencias entre ambos métodos, que impiden una comparación detallada de los resultados. Entre otras razones, y como se acaba de explicar, los granos más pequeños no pueden ser medidos óptimamente, lo que redundará en una desviación de los valores medios hacia composiciones más anortíticas que las estimadas por Díaz Azpiroz (tesis, 2001) dentro de la ZCS.

4.2.2. Descripción de los diagramas de densidad de polos de los elementos cristalográficos de la plagioclasa

Todas las proyecciones esféricas de los elementos cristalográficos de los cristales de plagioclasa medidos se han realizado en el hemisferio inferior, con la foliación situada en posición ecuatorial, esto es, en dirección E-W y vertical (con la dirección geográfica correspondiente al NE situado a la derecha), la lineación mineral colocada en la intersección entre el primitivo de la proyección y el plano ecuatorial, y el techo situado en el norte de la proyección (fig.4.7b). Hemos considerado los tres ejes de referencia siguientes (fig.4.7a):

- Eje E_1 : eje (0° , 0°) situado en el norte de la proyección y perpendicular al plano de foliación.
- Eje E_2 : eje (0° , 90°) situado en el centro de la proyección, paralelo a la foliación y perpendicular a la lineación mineral
- Eje E_3 : eje (90° , 0°) situado paralelo a la lineación mineral, marcando la dirección geográfica NE.

Existen algunas cuestiones de interés en esta etapa de análisis de los datos, como por ejemplo: (1) si la distribución que se observa es uniforme, en máximos o en corona, (2) si se observa isotropía alrededor del eje principal cuando los datos presentan distribución polar o del eje polar cuando la distribución es en corona, (3) si cuando los datos se distribuyen en corona, la distribución es según un círculo mayor o menor, (4) si existe simetría respecto al eje polar y/o principal de la distribución.



Fig.4.7. Convenio que se ha seguido para la representación de las proyecciones esféricas. (a) Se consideran tres ejes para la descripción de los diagramas de densidad: E_1 (0° , 0°) situado en el norte de la proyección y perpendicularmente al plano de la foliación, E_2 (0° , 90°) en el centro de la proyección, contenido en el plano de foliación y a 90° de la lineación, y E_3 (90° , 0°) situado a la derecha de la proyección, paralelo a la lineación y marcando la referencia geográfica del NE. (b) En todas las proyecciones esféricas de ha considerado el NE geográfico a la derecha de la proyección, el techo en el norte de la misma, la foliación (S) en posición ecuatorial, coincidiendo con la dirección Este-Oeste y vertical, es decir, perpendicular al plano del papel, y la lineación mineral (L) no coincidente exactamente con la intersección del primitivo de la proyección y el plano ecuatorial, sino a un ángulo aproximado de 30° alrededor de éste. Este ángulo de incertidumbre se explica en la fig.3.8.

La descripción y la valoración cualitativa del tipo de distribución que se observa en los diagramas de densidad se ha simplificado estableciendo una clasificación personal que considera los cuatro tipos más frecuentes y representativos observados en cuanto a la forma de la distribución (fig.4.8), ayudándonos para la descripción de las distribuciones la posición de los autovectores de cada elemento cristalográfico (apéndice B4).

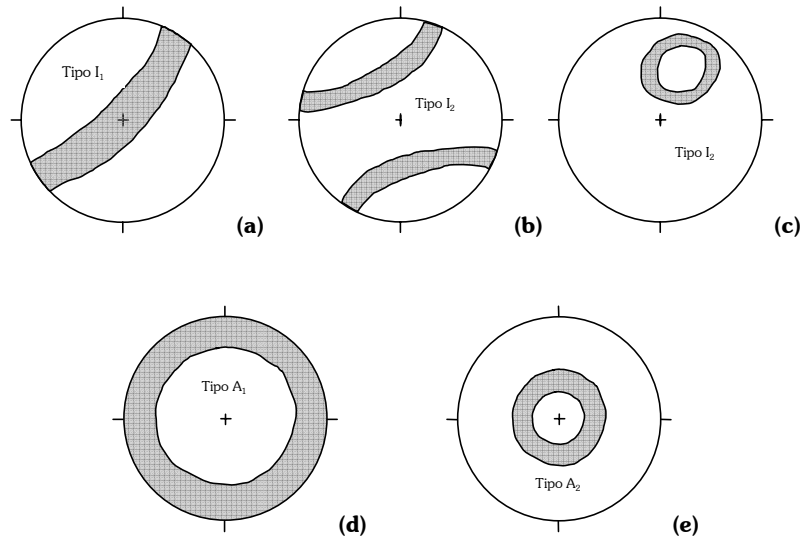


Fig.4.8. Clasificación de los tipos de distribuciones más comúnmente observadas en los diagramas de densidad. (a) Distribución de tipo I_1 según un círculo mayor de la proyección, con excepción del primitivo. (b y c) Distribución de tipo I_2 , corona según un círculo menor de eje no vertical, no coincidente con E_2 . (d) Distribución de tipo A_1 , en anillo, según un círculo menor con eje vertical. Se trata de una corona paralela o subparalela al primitivo de la proyección. (e) Distribución de tipo A_2 en anillo según un círculo menor con eje vertical (E_2).

Los tipos de distribuciones considerados son:

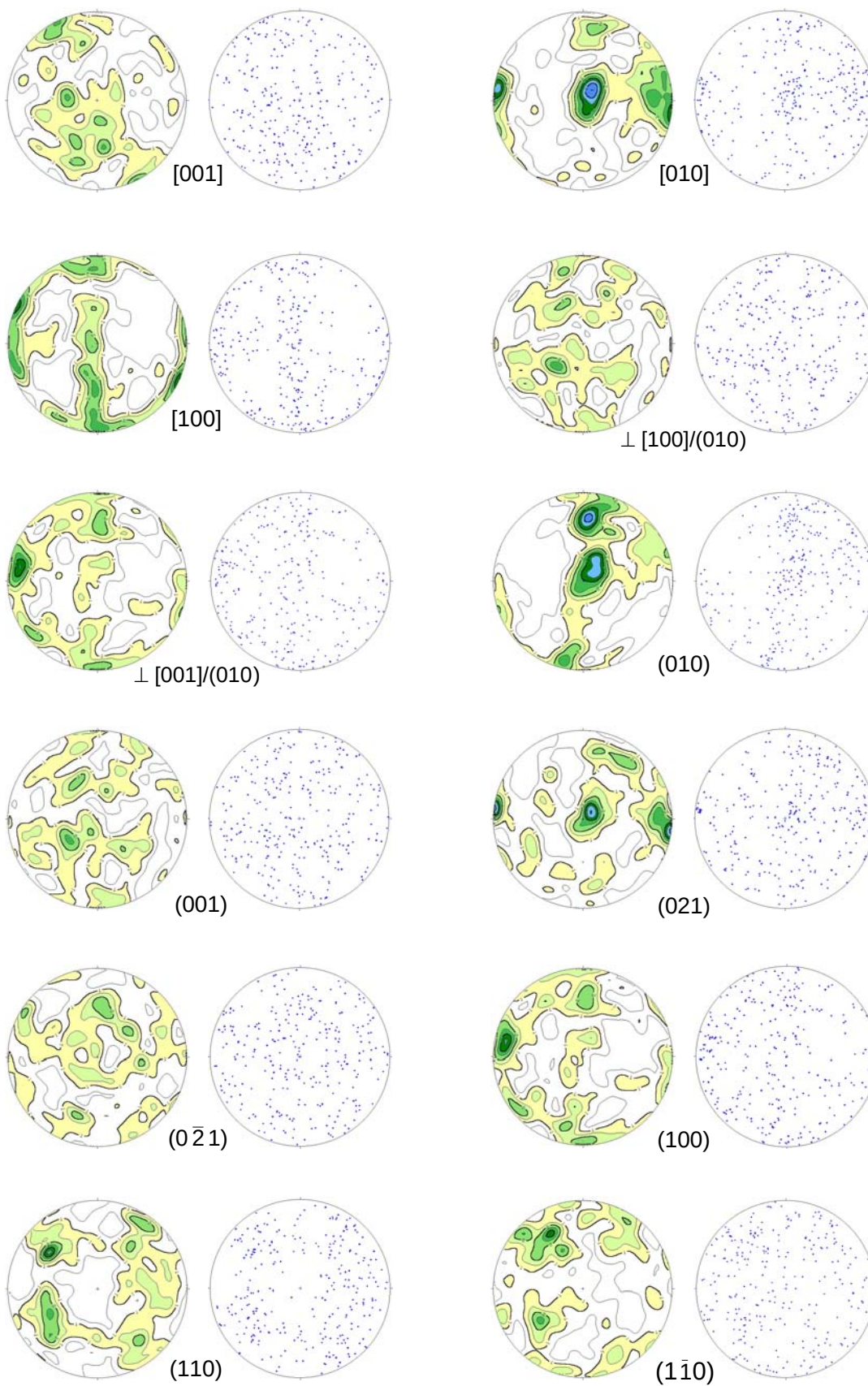
- *Tipo I₁*: distribución en corona según un círculo mayor de la proyección (con excepción del primitivo).
- *Tipo I₂*: distribución en corona según un círculo menor de eje no vertical (no coincidente con E₂).
- *Tipo A₁*: distribución en anillo (círculo mayor) con eje vertical. Se trata, por tanto, de una corona paralela o subparalela al primitivo de la proyección.
- *Tipo A₂*: distribución en anillo (círculo menor) con eje vertical según E₂.

A continuación, y de acuerdo con este patrón de clasificación cuantitativa de los principales tipos de distribuciones observadas, ofrecemos una descripción pormenorizada de cada uno de los diagramas de fábricas cristalográficas obtenidas en las muestras del corte de Almonaster la Real.

Muestra 2 (B.0601-2, fig.4.9)

- [001]. Corona incompleta, algo difusa, con varios máximos menores alrededor del autovector $\bar{t}_1$ (50.6°→190.9°) y a altos ángulos de la lineación mineral.
- [010]. Distribución intermedia entre un máximo principal alargado perpendicularmente al plano de foliación y una corona I₁ incompleta paralela a la foliación, con una mayor concentración de polos paralela a la lineación y también perpendicular a ésta.
- [100]. Doble corona combinada de tipo I₁, sobre el círculo E₁-E₂, y A₁, bastante bien definidas en ambos casos.
- $\perp[100]/(010)$. Doble corona de tipo I₂ dispuesta simétricamente respecto a la foliación y con dos máximos menores cercanos a $\bar{t}_1$ (61.7°→237.8°) y a $\bar{t}_2$ (15.6°→358.9°).
- $\perp[001]/(010)$. Corona doble incompleta de tipo I₁, con eje E₁-E₂, y A₁; pero esta última peor desarrollada que en el caso [001], y con el máximo principal contenido en el plano de foliación y paralelo a la lineación.
- (010). Corona incompleta de tipo I₁, con eje E₁-E₂, al que se suma una distribución en círculo menor de tipo I₂, cuyo eje está inclinado en el cuadrante superior derecho de la proyección. Se observan dos máximos principales sobre la corona I₁, uno situado paralelo a la foliación y perpendicular a la lineación y el otro formando un alto ángulo con el anterior.
- (001). Igual a $\perp[100]/(010)$.
- (021). Caso parecido a [010] pero con una menor concentración de polos en los máximos principales.

- $(0\bar{2}1)$. Distribución en anillo de tipo A_2 , casi concéntrico respecto al centro de la proyección (eje E_2). Se observa una ligera mayor concentración de polos mayor según el autovector $\bar{t}_1$ ($65.6^\circ \rightarrow 21.7^\circ$).
- (100) . Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110) . Corona de tipo A_2 bastante abierta. El eje de la corona es casi coincidente con $\bar{t}_3$ ($80.1^\circ \rightarrow 301.4^\circ$).
- $(1\bar{1}0)$. Distribución en máximos aislados, con el principal cercano a $\bar{t}_1$ ($25.4^\circ \rightarrow 331.3^\circ$) y un secundario próximo a $\bar{t}_2$ ($18.7^\circ \rightarrow 232.0^\circ$).
- $(\bar{2}01)$. Igual a $[100]$.
- Ejes X. Corona en cruz que combina dos coronas de tipo I_1 , una según E_1 - E_2 y otra según E_2 - E_3 . El máximo principal coincide con el eje E_2 , es decir es paralelo a la foliación y perpendicular a la lineación. Se observan otros máximos secundarios bastante bien desarrollados también sobre el primitivo de la proyección: uno de ellos paralelo a la lineación (eje E_3) y el otro situado a 90° (Eje E_1).
- Ejes Y. Se trata de una distribución intermedia entre un caso extremo como el de los ejes X y una distribución en máximos muy concentrados alrededor de los ejes E_1 y E_3 , con una clara e intensa concentración de polos cercanos a $\bar{t}_1$ ($3.8^\circ \rightarrow 75.0^\circ$) y $\bar{t}_2$ ($13.4^\circ \rightarrow 344.9^\circ$). Sin embargo, el máximo coincidente con E_2 es el peor desarrollado, al contrario que en el caso de los ejes X.
- Ejes Z. Es un caso intermedio entre el de los ejes X y el de los ejes Y, con el máximo principal formando un alto ángulo con el plano de foliación y cercano a $\bar{t}_1$ ($33.0^\circ \rightarrow 168.3^\circ$), y un grupo de máximos secundarios alineados paralelamente a la foliación y a ángulos variables respecto a la lineación en la mitad inferior derecha de la proyección.



(continúa)

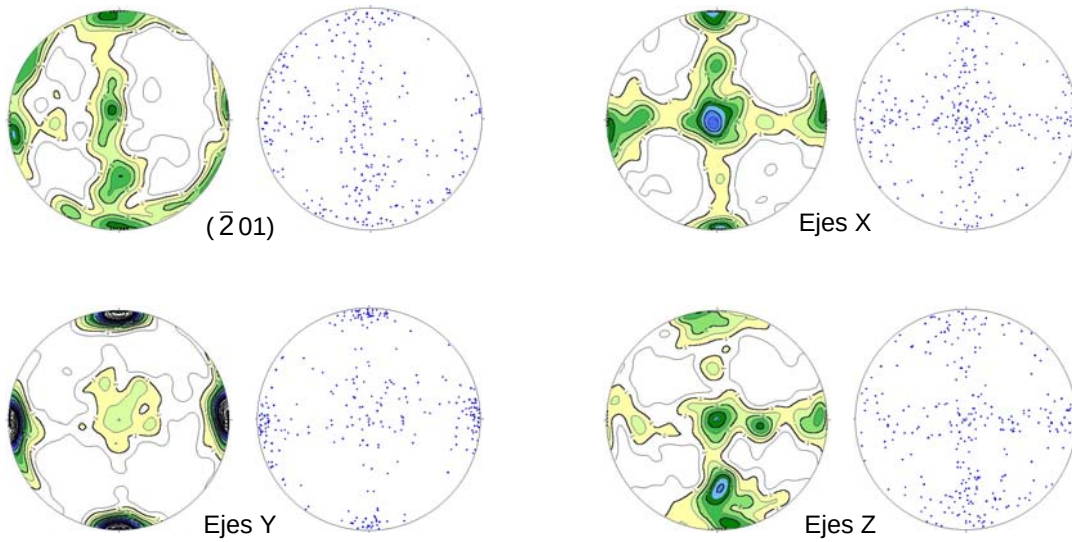
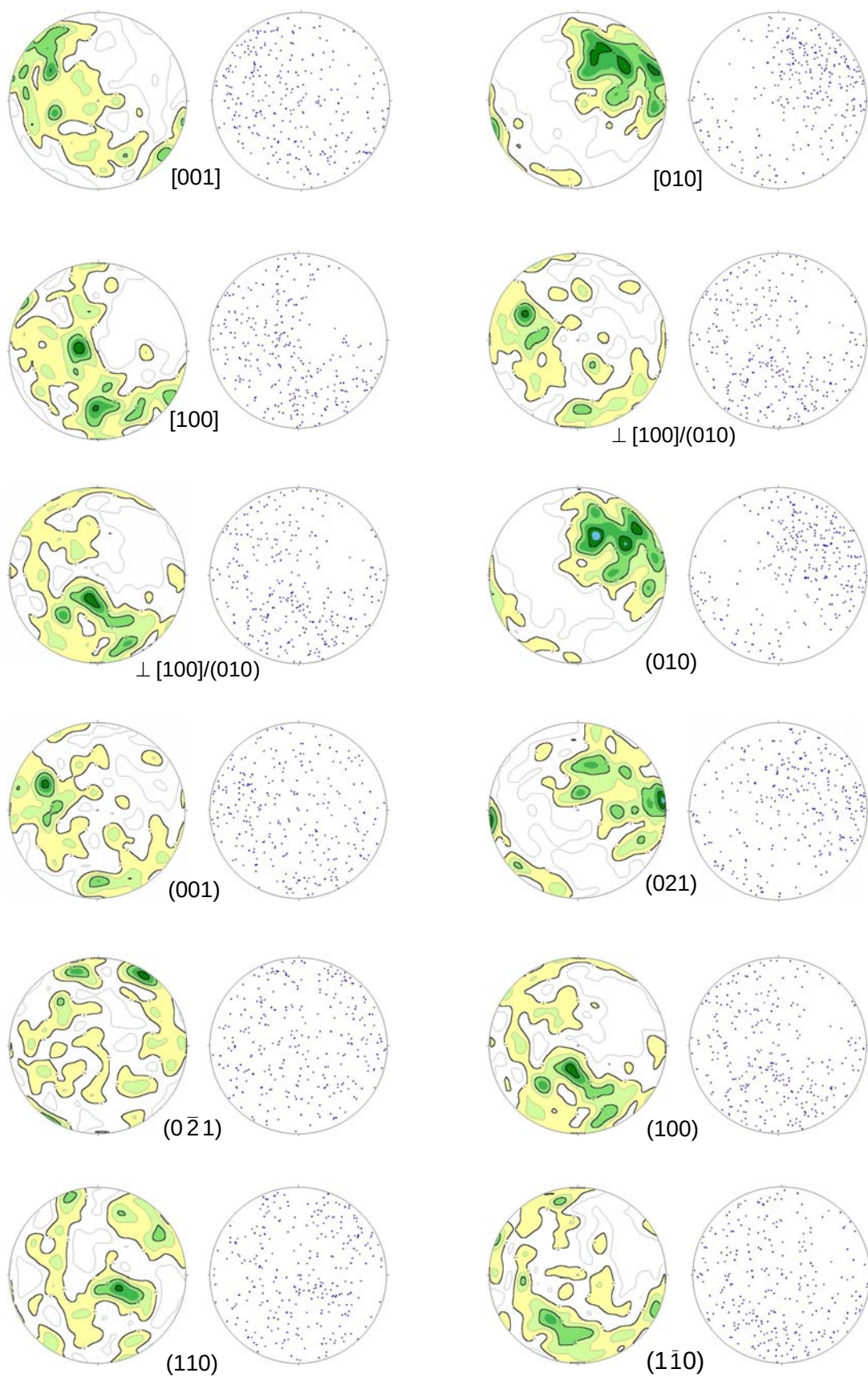


Fig.4.9 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 2 (B.0601-2). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 286 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 4 (B.0601-4, fig.4.10)

- [001]. Corona algo difusa e incompleta de tipo I_1 . Contiene a $\bar{t}_1$ ($34.6^\circ \rightarrow 296.5^\circ$) y $\bar{t}_2$ ($41.9^\circ \rightarrow 168.3^\circ$), con una ligera concentración mayor de polos alrededor del autovector mayor. El máximo principal se sitúa en el cuadrante superior izquierdo de la proyección.
- [010]. Máximo muy estirado alrededor de $\bar{t}_1$ ($32.8^\circ \rightarrow 53.1^\circ$).
- [100]. Corona de tipo I_1 . Al igual que en [001], se desvía unos 45° en sentido horario respecto al plano de foliación. La corona contiene dos pequeños máximos cercanos a $\bar{t}_1$ ($47.7^\circ \rightarrow 186.0^\circ$), uno de ellos casi coincidente con E_2 y el otro a muy alto ángulo de la foliación, en la parte inferior de la proyección.
- $\perp[100]/(010)$. Distribución bastante difusa en corona incompleta, orientada como en los casos [001] y [010].
- $\perp[001]/(010)$. Se trata nuevamente de una distribución bastante difusa, en corona tipo I_1 que contiene a $\bar{t}_1$ y $\bar{t}_2$, y que presenta un mayor concentración de polos según un máximo algo estirado y cercano a $\bar{t}_1$ ($38.3^\circ \rightarrow 179.5^\circ$).
- (010). Igual a [010].
- (001). Igual a $\perp[100]/(010)$.

- (021). Se parece bastante a [010] y (010), pero con el máximo bastante menos concentrado alrededor de $\bar{t}_1$. Se observa una ligera mayor concentración de polos según E_3 , es decir, paralela a la lineación. Se trata de una distribución en corona incompleta de tipo I_2 , con el eje situado sobre el primitivo y a unos 45° de E_1 en sentido horario.
- (0 $\bar{2}$ 1). Distribución bastante uniforme, con un máximo ligeramente mejor desarrollado que el resto y a casi 90° de la lineación (cercano a E_1 por tanto).
- (100). Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110). Corona en anillo incompleto de tipo A_2 aunque ligeramente desplazada con respecto a E_2 . La distribución, en líneas generales, tiende a la uniformidad, con una concentración de polos algo mayor cercana a $\bar{t}_1$ ($63.2^\circ \rightarrow 151.6^\circ$).
- (1 $\bar{1}$ 0). Distribución bastante uniforme, aunque se deja entrever una tendencia hacia una corona incompleta de tipo I_1 con un máximo mejor desarrollado a alto ángulo de la foliación y lineación, en la parte superior de la proyección.
- ($\bar{2}$ 01). Corona incompleta de tipo I_1 desviada 45° en sentido horario con respecto a la foliación y complementada en sus extremos con el desarrollo de una corona de tipo I_2 incompleta. El máximo principal se sitúa cercano a $\bar{t}_1$ ($56.6^\circ \rightarrow 203.1^\circ$), a alto ángulo de la foliación y lineación. Se aprecia también un máximo secundario casi coincidente con E_2 .
- Ejes X. Distribución bastante uniforme que deja entrever, sin embargo, una doble corona en forma de cruz, de las del tipo I_1 ortogonal, con un máximo mejor desarrollado subparalelo a la lineación.
- Ejes Y. Distribución en corona mixta. Se trata de una combinación entre una corona I_1 (según E_2 - E_3) y otra I_2 (con eje E_1). La corona paralela al plano de foliación es la mejor desarrollada.
- Ejes Z. Se trata de un máximo estirado que agrupa varios máximos secundarios cercanos a $\bar{t}_1$ ($54.0^\circ \rightarrow 14.1^\circ$) y a altos ángulos de la lineación.



continúa

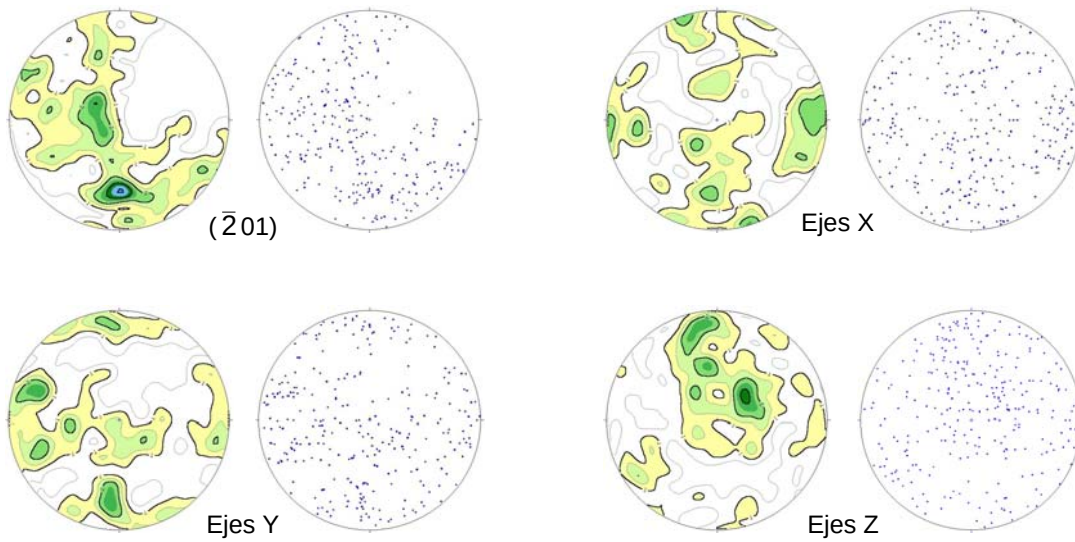
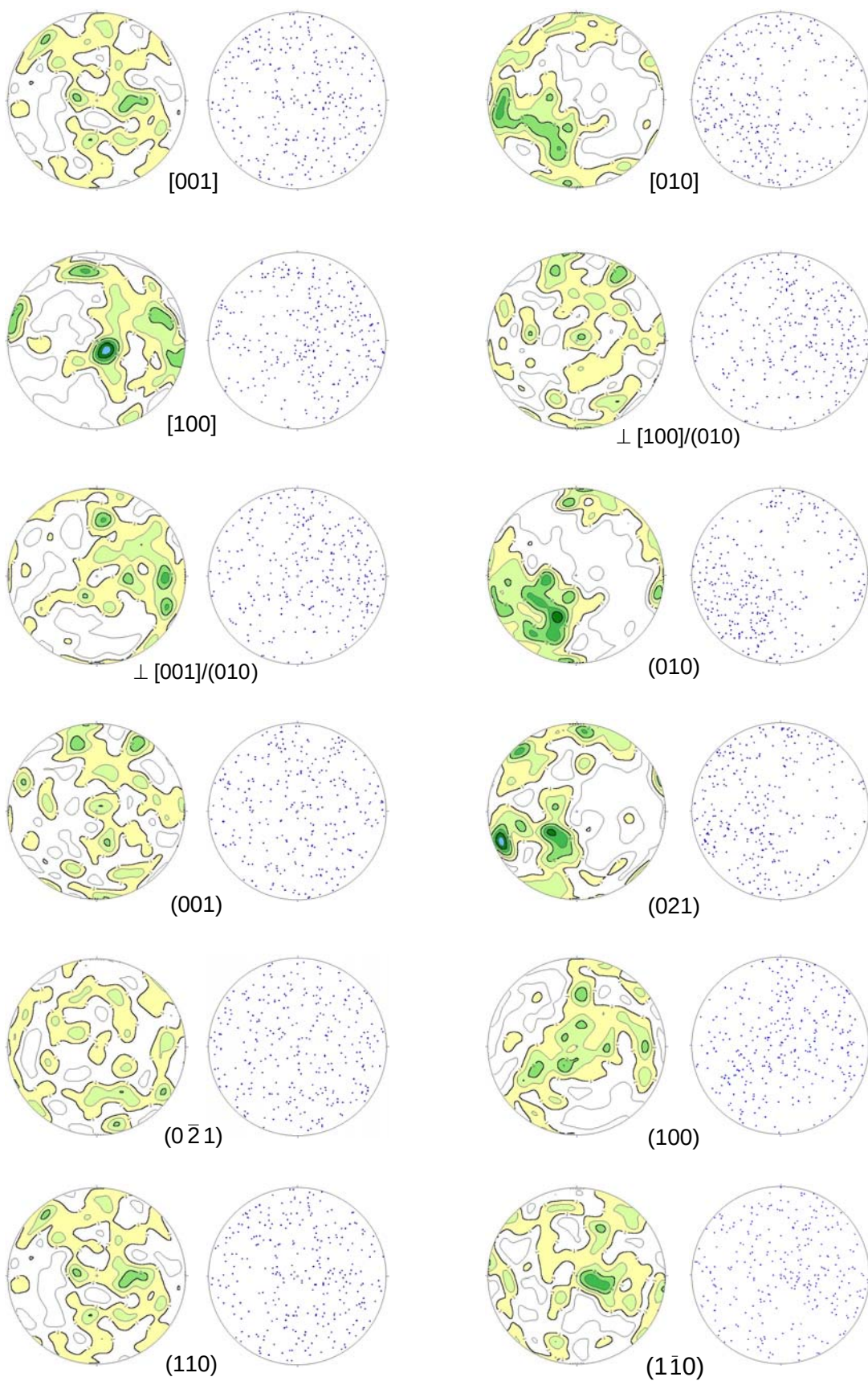


Fig.4.10. (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 4 (B.0601-4). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 288 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 7 (B.0601-7, fig.4.11)

- [001]. Distribución bastante uniforme con varios máximos contenidos en el plano de foliación y a altos ángulos de la lineación.
- [010]. Corona en anillo de tipo A_1 con un máximo muy estirado que contiene a $\bar{t}_1$ ($36.7^\circ \rightarrow 237.9^\circ$). Se podría considerar también un caso combinado de tipo A_1 - I_2 , siendo la corona I_2 la que contiene al máximo que se aleja ligeramente del primitivo de la proyección. Dicha corona I_2 es incompleta y su eje se localiza cercano al primitivo, en la parte inferior izquierda del diagrama.
- [100]. Distribución en máximos estirados, con el principal paralelo a la foliación y a 90° de la lineación, y un grupo de máximos secundarios a bajo ángulo de la lineación. También podría describirse como la suma de una corona I_1 según E_1 - E_2 , incompleta y mejor definida en las cercanías de E_2 , más otra corona I_1 oblicua con respecto a los ejes de referencia. El polo de esta última corona se localiza en el cuadrante inferior izquierdo del diagrama.
- $\perp[100]/(010)$. Distribución uniforme sin máximos representativos.
- $\perp[001]/(010)$. Patrón de distribución bastante uniforme que deja entrever un anillo de tipo A_2 más una corona de tipo I_1 oblicua con respecto a los ejes de referencia, y que representa un grupo de máximos subparalelos a la foliación y a ángulos intermedios de la lineación, y otro máximo a 90° de los anteriores. La corona oblicua presenta una orientación similar a la de la fábrica [001].

- (010). Corona de tipo A_1 parecida a [010] pero más incompleta, con la mayor concentración de polos según un máximo estirado alrededor también de $\bar{t}_1$ ($30.2^\circ \rightarrow 230.2^\circ$). Se identifica también una corona I_2 con eje inclinado en el cuadrante inferior izquierdo de la proyección, y cercano al primitivo.
- (001). Igual a $\perp[100]/(010)$.
- (021). Distribución muy similar a [010], aunque en este caso la corona de tipo I_2 se encuentra mejor definida.
- ($0\bar{2}1$). Se trata de un caso muy claro de uniformidad, con una ligerísima tendencia a formar anillos de tipo A_2 a I_2 incompletos y pobremente desarrollados.
- (100). Corona incompleta de tipo I_1 inclinada en sentido antihorario respecto al plano de foliación, y con varios máximos menores situados alrededor de E_2 .
- (110). Corona en forma de anillo incompleto de tipo A_2 , y con varios máximos a bajo ángulo del plano de foliación y de la lineación, uno de ellos casi coincidente con $\bar{t}_3$ ($28.6^\circ \rightarrow 195.2^\circ$). Se identifica también un segundo anillo de tipo I_2 , cuyo eje se sitúa sobre la foliación, en la parte derecha de la foliación.
- ($1\bar{1}0$). Distribución bastante difusa aunque con un claro máximo paralelo a la foliación y subperpendicular a la lineación, y que no se sitúa cercano a ninguno de los autovectores principales.
- ($\bar{2}01$). Distribución muy parecida a [001], con los máximos situados en las mismas posiciones pero no tan bien desarrollados debido a una menor concentración de polos en este caso.
- Ejes X. Corona incompleta de tipo I_1 cercana a la foliación aunque desviada ligeramente en sentido antihorario con respecto a ella. Presentan dos grupos de máximos: uno paralelo a la lineación y el otro perpendicular. Incluye, además, una corona de tipo I_2 , muy cerrada y con el eje muy próximo a E_1 .
- Ejes Y. Corona doble que combina los tipos I_2 y A_1 , aunque más difusa en el caso de la corona de tipo A_2 , y con algunos pequeños máximos secundarios a altos ángulos de la foliación y lineación. El eje de la corona I_2 se localiza en el cuadrante superior izquierda del diagrama.
- Ejes Z. Corona incompleta de tipo I_1 según E_1 - E_2 , que se complementa con un anillo, también incompleto, de tipo A_1 . Los máximos se sitúan alineados perpendicularmente al trazo del plano de foliación y a muy altos ángulos de la lineación.



(continúa)

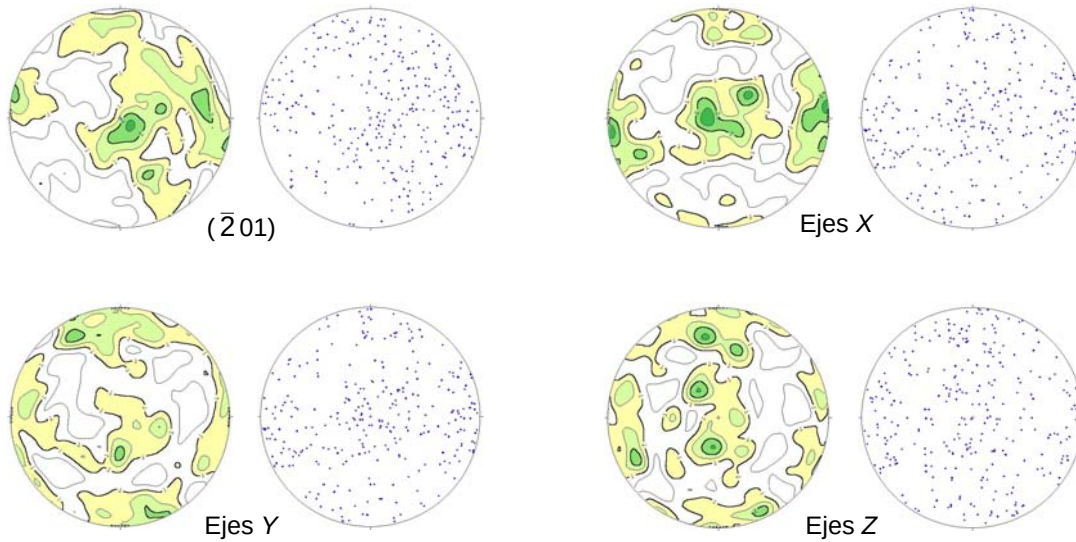
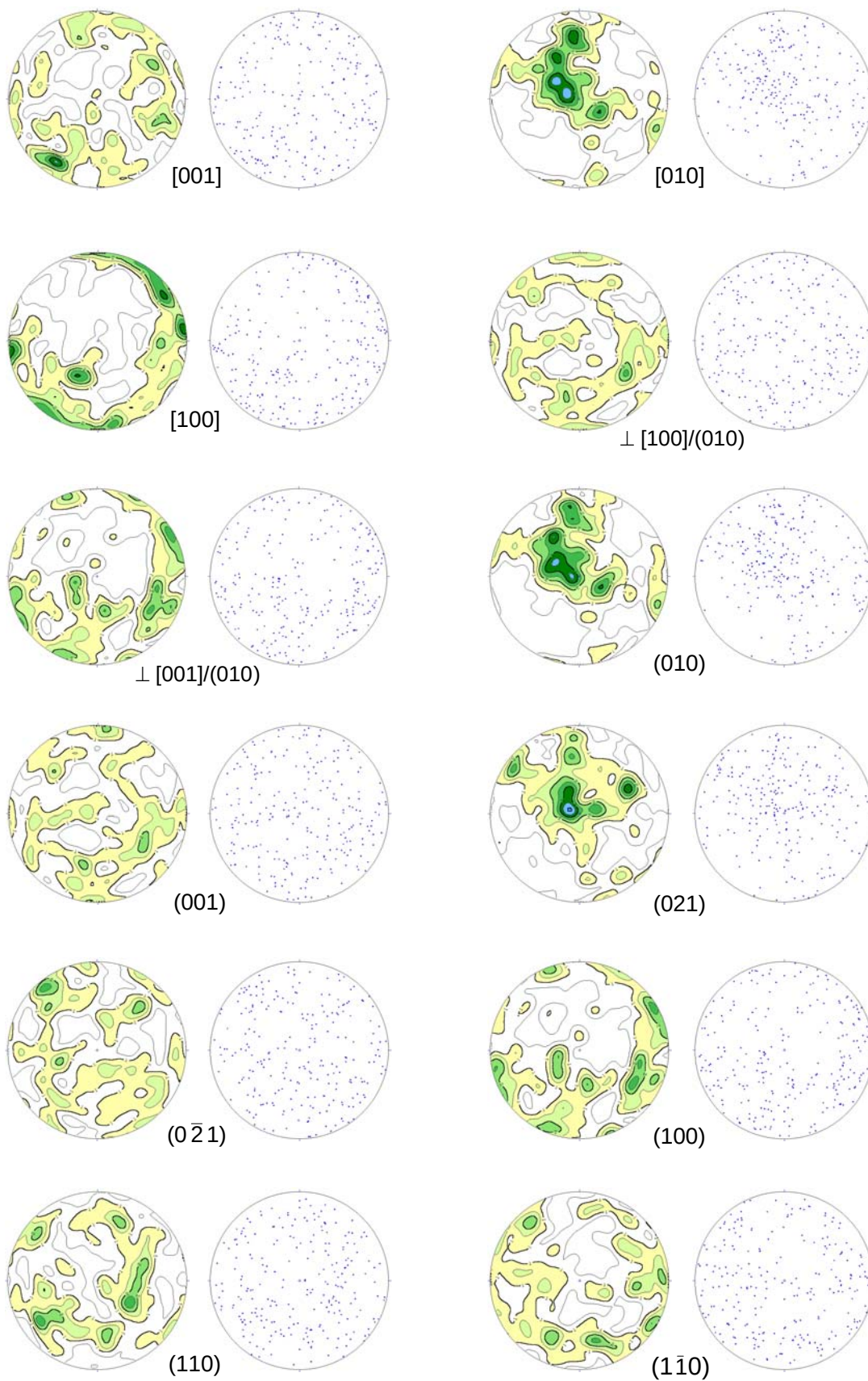


Fig.4.11. (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 7 (B.0601-7). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 297 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 11 (B.0601-11, fig.4.12)

- [001]. Corona incompleta de tipo A_1 , algo difusa y con un máximo principal situado subperpendicular a la foliación y a la lineación, muy cercano a $\bar{t}_1$ ($7.4^\circ \rightarrow 210.6^\circ$).
- [010]. Distribución en corona de tipo I_1 , oblicua al plano de foliación y con una corona de tipo I_2 en su extremo, también incompleta y desigualmente desarrollada. El eje de esta corona se sitúa sobre el primitivo y desviado en sentido antihorario con respecto a E_1 . La mayor concentración de polos, bastante significativa, se dispone según un máximo muy estirado próximo a $\bar{t}_1$ ($63.0^\circ \rightarrow 336.5^\circ$).
- [100]. Corona incompleta de tipo A_1 , con los máximos muy estirados sobre el primitivo de la proyección y a altos ángulos del plano de foliación. Aparece también una corona de tipo I_2 incompleta, cuyo eje se sitúa en el cuadrante inferior derecho del diagrama.
- $\perp[100]/(010)$. Distribución bastante uniforme, con una ligera tendencia a concentrarse los polos según un anillo de tipo A_2 .
- $\perp[001]/(010)$. Distribución con un patrón poco claro. En líneas generales, parece que se trata de una corona incompleta de tipo A_1 con varios máximos dispuestos subparalelamente a la foliación y a ángulos muy variados respecto de la lineación. Dicha corona se complementa con otra de tipo I_2 , incompleta y cuyo eje se sitúa en el cuadrante inferior izquierdo del diagrama.
- (010). Igual a [010].



(continúa)

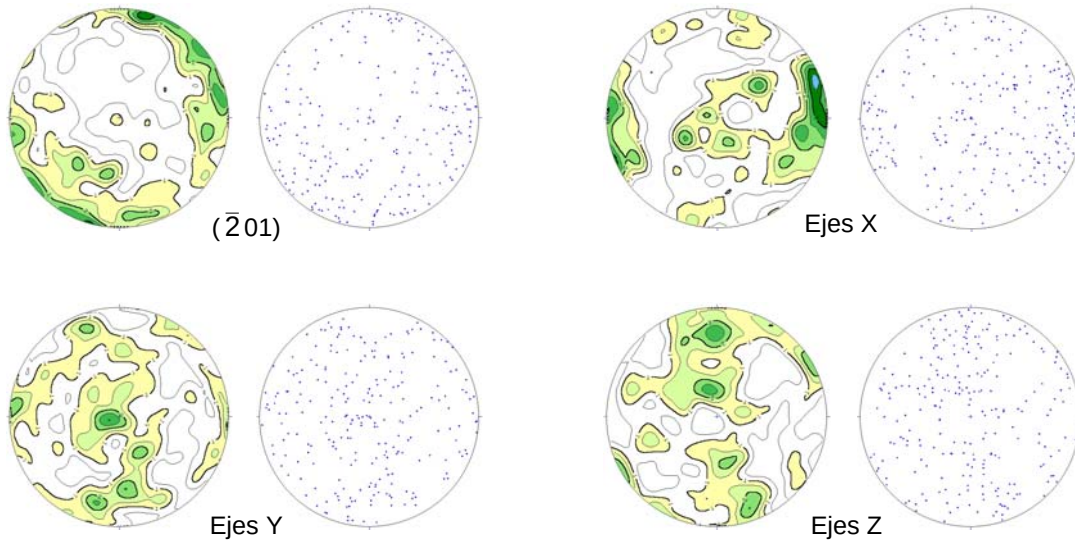
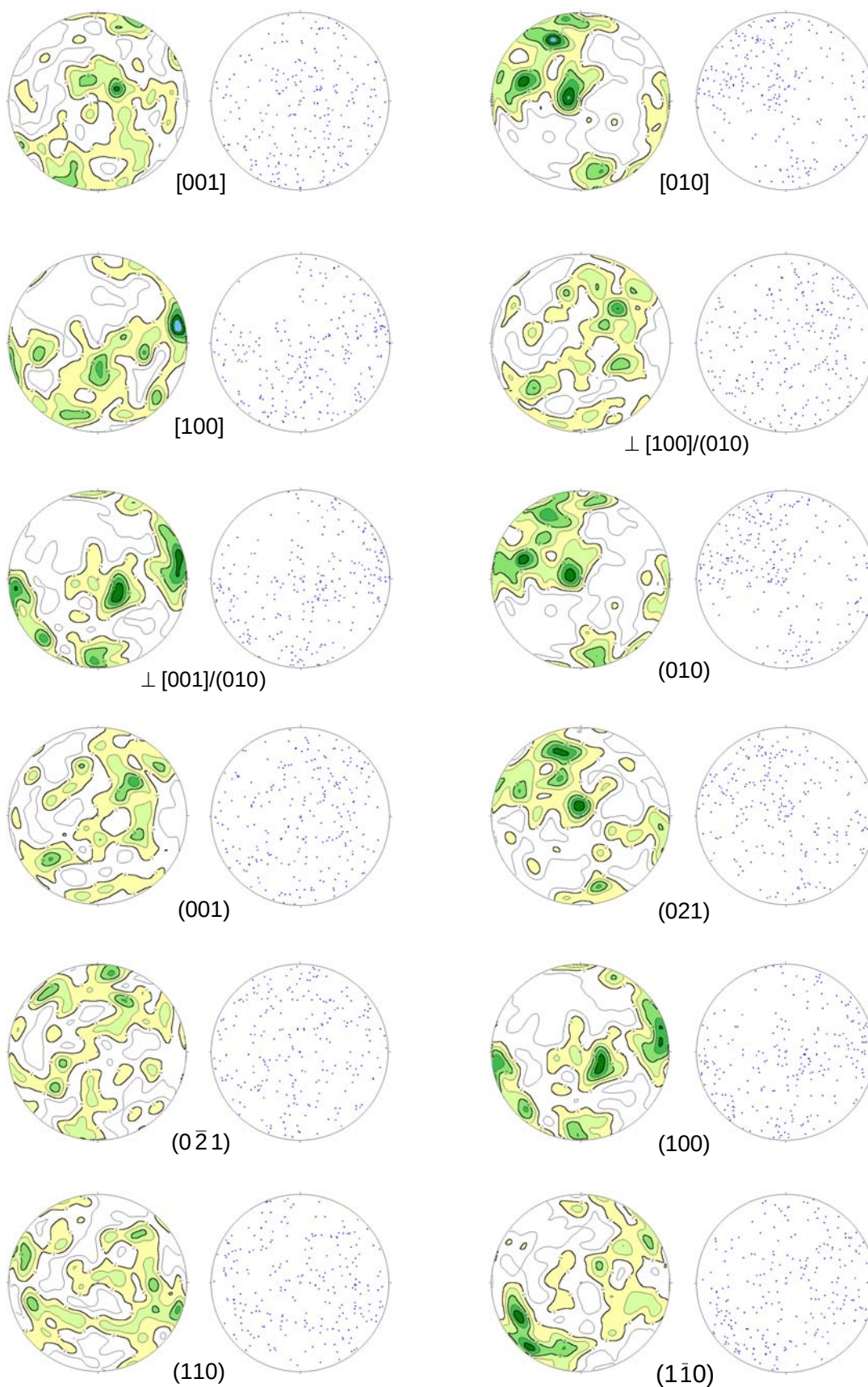


Fig.4.12 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 11 (B.0601-11). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 240 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 14 (B.0601-14, fig.4.13)

- [001]. Distribución de patrón poco claro debido a su tendencia a la uniformidad. Parece que los polos se dispusieran según un anillo de tipo A_2 con centro ligeramente desplazado respecto a E_2 , y con un grupo de máximos menores a alto ángulo de la lineación y situados tanto contenidos en el plano de foliación como a 90° de éste.
- [010]. Clara distribución en tres máximos muy bien desarrollados en torno a $\bar{t}_1$ ($29.6^\circ \rightarrow 319.0^\circ$) que forman un anillo complejo de tipo I_2 .
- [100]. Corona incompleta de tipo A_1 algo difusa, con varios máximos dispersos en sentido horario desde el NE; el principal de ellos, muy concentrado, casi coincidente con E_3 , es decir, paralelo a la lineación. Además, aparece una segunda corona de tipo I_2 con eje oblicuo situado en el cuadrante inferior derecho del diagrama.
- $\perp[100]/(010)$. Distribución bastante uniforme con varios máximos localizados a ángulos intermedios respecto a la foliación y la lineación, uno de ellos cercano a $\bar{t}_1$ ($39.1^\circ \rightarrow 41.8^\circ$).
- $\perp[001]/(010)$. Corona incompleta de tipo I_1 según E_2 - E_3 , aunque desviada ligeramente en sentido antihorario con respecto a dicho plano, y con dos máximos principales sobre el plano de foliación: uno paralelo a la lineación y el otro a casi 90° . Se observan también dos máximos secundarios perpendiculares a la foliación y lineación, que llegan a definir una corona incompleta de tipo A_1 junto con los máximos cercanos a la lineación.

- (010). Igual a [010], pero con los dos máximos principales alineados cerca de la traza de la foliación; uno de ellos perpendicular a la lineación y el otro a bajo ángulo de ésta.
- (001). Se parece bastante a $\perp[100]/(010)$, pero la distribución en este caso presenta un patrón de anillo incompleto tipo A_2 con centro ligeramente desplazado respecto a E_2 . Con peor definición, se observa otro anillo de tipo I_2 con eje situado cerca del primitivo y desviado en sentido horario con respecto a E_1 .
- (021). Distribución muy parecida a [010] y (010), pero con los dos máximos principales perpendiculares a la lineación: uno de ellos paralelo a la foliación y el otro a casi 90° .
- $(0\bar{2}1)$. Distribución bastante uniforme con varios máximos secundarios aislados, situados a alto ángulo de la lineación y a ángulos muy variados con respecto a la foliación.
- (100). Igual a $\perp[001]$.
- (110). Distribución bastante uniforme pero que presenta una tendencia hacia una corona de tipo anillo A_2 , con máximos a ángulos medio-bajos respecto a la foliación y lineación.
- $(1\bar{1}0)$. Caso intermedio entre corona incompleta tipo I_1 , inclinada respecto a la traza de la foliación, y un máximo muy bien desarrollado que estirado y cercano a $\bar{t}_1$ ($5.6^\circ \rightarrow 227.9^\circ$).
- $(\bar{2}01)$. Caso muy parecido a [100], con los máximos situados en las mismas posiciones.
- Ejes X. Se podría considerar o bien una corona incompleta de tipo I_1 paralela a la foliación o una distribución según dos máximos muy concentrados y muy bien definidos en la proyección, situados en el plano de foliación. Uno de ellos es paralelo a la lineación y cercano a $\bar{t}_1$ ($7.5^\circ \rightarrow 272.5^\circ$), y el otro a 90° del anterior y próximo a $\bar{t}_2$ ($82.4^\circ \rightarrow 98.8^\circ$). Esta distribución de los ejes X resulta ser de las más claras y llamativas en esta muestra. Aparece también una concentración de polos en las cercanías del eje E_1 .
- Ejes Y. Distribución en corona que combina los tipos I_1 , según E_1 - E_2 , y A_1 , con una concentración preferente de polos en varios máximos principales: uno de ellos perpendicular a la foliación y lineación, cercano a $\bar{t}_1$ ($1.2^\circ \rightarrow 1.1^\circ$), otro paralelo a la foliación y perpendicular a la lineación, y el otro subparalelo a la lineación. Los máximos coinciden aproximadamente con los ejes E_1 , E_2 y E_3 . No obstante, los máximos situados en las cercanías de E_1 se disponen según una corona de tipo I_2 muy cerrada, y los situados alrededor de E_3 definen otra corona de tipo I_2 , también bastante cerrada. Ambas coronas I_2 se enlazan a través del primitivo, definiendo el anillo de tipo A_1 .
- Ejes Z. Corona incompleta de tipo I_1 según E_1 - E_2 . Se intuye una segunda corona en anillo tipo A_1 muy poco desarrollada. Los máximos principales se sitúan estirados a 90° de la foliación y lineación, cercanos a $\bar{t}_1$ ($0.4^\circ \rightarrow 3.4^\circ$). El anillo A_1 se compone, a su vez, de dos coronas de tipo I_2 unidas a través del primitivo, de manera similar a como sucede en los ejes Y.



(continúa)

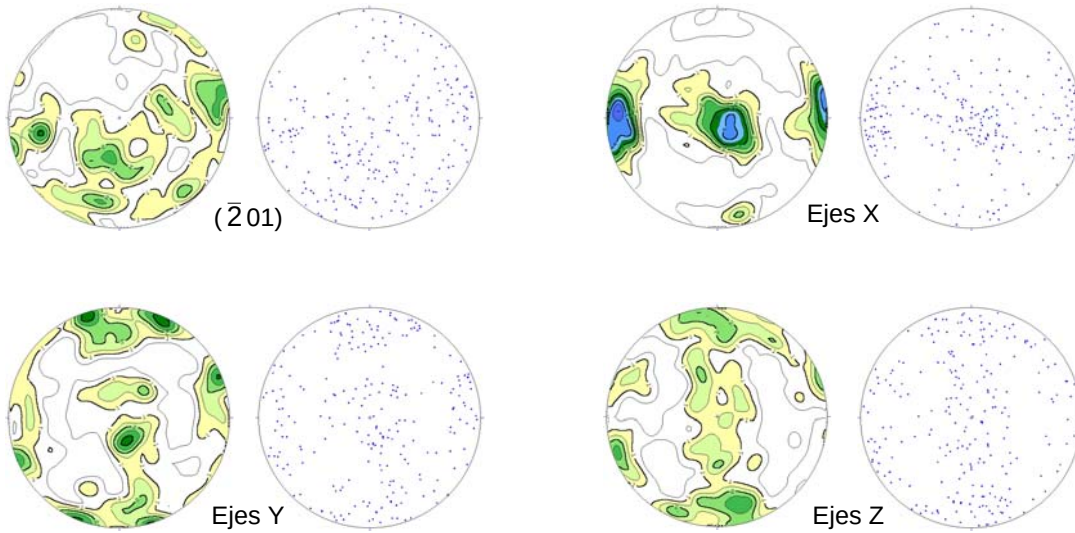
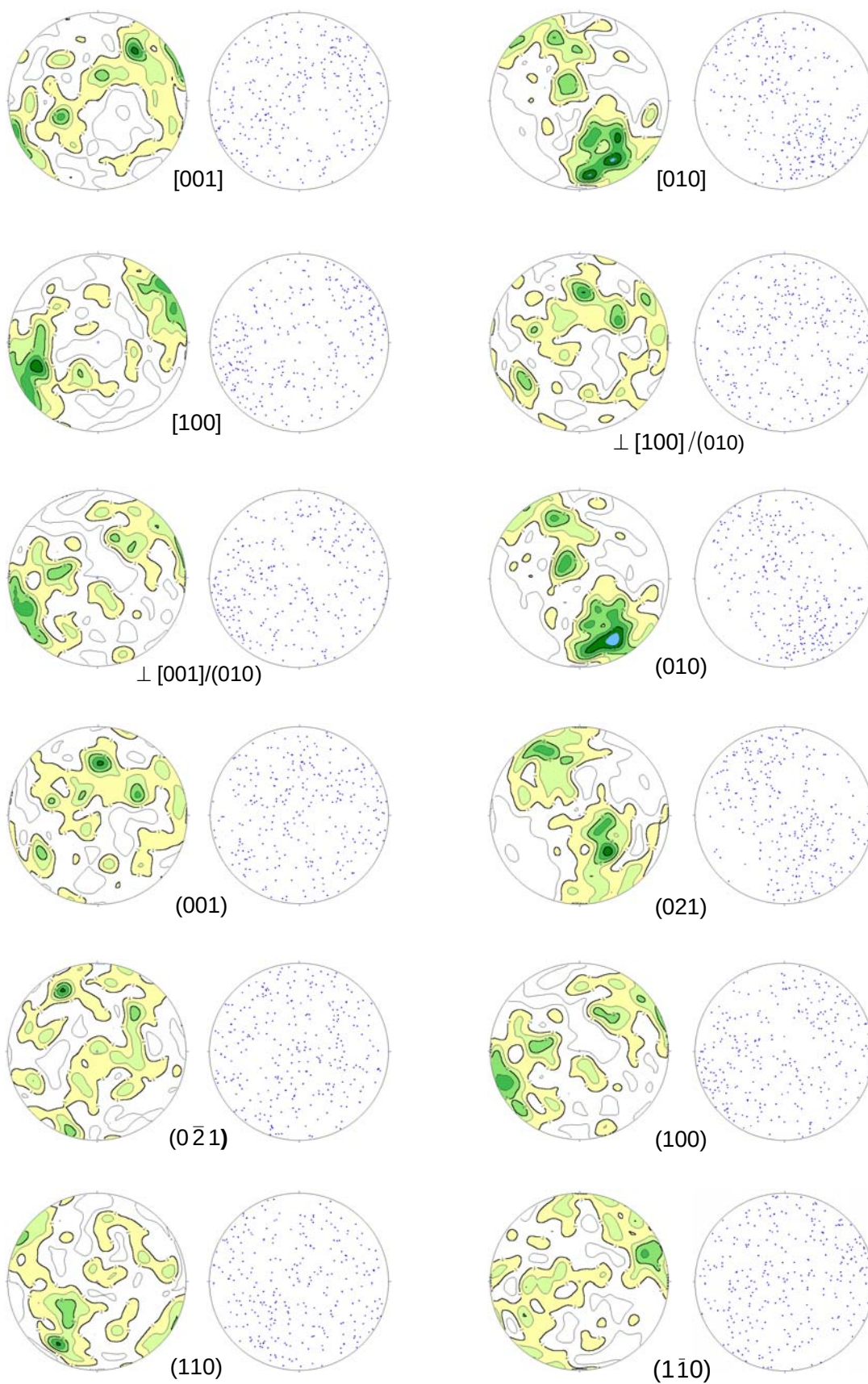


Fig.4.13 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 14 (B.0601-14). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 242 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 15 (B.0601-15, fig 4.14)

- [001]. Corona incompleta de tipo I_1 desviada en sentido antihorario con respecto a la foliación, con un máximo estirado sobre el primitivo de la proyección, a bajo ángulo de la lineación, y otros dos situados a ángulos intermedios de la foliación y lineación.
- [010]. Corona incompleta de tipo I_1 con un grupo de varios máximos muy bien desarrollados a alto ángulo de la foliación y lineación, y cercanos a $\bar{t}_1$ ($22.9^\circ \rightarrow 151.9^\circ$). Dicho autovector coincide con el eje de una corona I_2 muy cerrada.
- [100]. Distribución en un único máximo muy estirado sobre el primitivo de la proyección, a bajo ángulo de la foliación y lineación, y cercano a $\bar{t}_1$ ($8.0^\circ \rightarrow 243.9^\circ$). Se puede observar también un anillo A_2 pobremente definido
- $\perp[100]/(010)$. Distribución bastante uniforme con varios máximos secundarios a ángulos intermedios de la foliación y lineación. Dos de ellos se sitúan cercanos a $\bar{t}_1$ ($31.4^\circ \rightarrow 44.5^\circ$).
- $\perp[001]/(010)$. Muy similar a [001], con la mayor concentración de polos situada también sobre el primitivo de la proyección y cercana a $\bar{t}_1$ ($9.8^\circ \rightarrow 241.8^\circ$).
- (010). Igual a [010], pero con el máximo principal más agrupado y concentrado.
- (001). Igual a $\perp[100]/(010)$.

- (021). Corona incompleta de tipo I_1 que se parece bastante a [010] y (010), pero con el máximo principal menos desarrollado y algo desplazado hacia el centro de la proyección, a ángulos más bajos de la foliación y lineación que en los casos [010] y (010).
- $(0\bar{2}1)$. Distribución muy uniforme con un pequeño máximo a alto ángulo de la foliación y desviado de su polo en sentido antihorario, en el cuadrante superior izquierdo del diagrama.
- (100). Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110). Distribución bastante uniforme a excepción de un pequeño máximo cercano al primitivo de la proyección y subperpendicular a la lineación, aunque desviado en sentido horario con respecto al polo de la foliación.
- $(1\bar{1}0)$. También en este caso se observa uniformidad, al igual que en (110), pero el máximo en este caso se sitúa a bajo ángulo de la lineación, cercano a $\bar{t}_1$ ($1.1^\circ \rightarrow 55.0^\circ$).
- $(\bar{2}01)$. Corona incompleta de tipo I_1 parecida a [100], pero que parece se complementa en su extremo con una corona de tipo I_2 . Se distinguen tres máximos principales: dos de ellos cercanos a $\bar{t}_1$ ($10.8^\circ \rightarrow 218.2^\circ$), a alto ángulo de la foliación y lineación, y un tercer máximo a aproximadamente 20° en sentido antihorario desde el NE.
- Ejes X. Corona incompleta de tipo I_1 , ligeramente oblicua con respecto a la traza de la foliación (desviada con respecto a ella en sentido horario) y con un grupo de máximos a ángulos muy diversos con respecto a la lineación y cercanos, en líneas generales, a $\bar{t}_1$ ($44.1^\circ \rightarrow 283.2^\circ$) y $\bar{t}_2$ ($45.3^\circ \rightarrow 115.3^\circ$).
- Ejes Y. Distribución muy uniforme con varios máximos menores a bajo ángulo de la foliación y a ángulos intermedios de la lineación.
- Ejes Z. Es la distribución mejor definida de todas las de esta muestra. Se trata de un caso intermedio entre una corona incompleta de tipo I_1 con eje en la parte inferior izquierda de la proyección, y un anillo incompleto de tipo A_1 . El máximo principal es casi perpendicular a la foliación y se sitúa cerca de $\bar{t}_1$ ($5.0^\circ \rightarrow 14.9^\circ$); aunque la mayor concentración de polos se desvía en sentido horario del polo de la foliación.



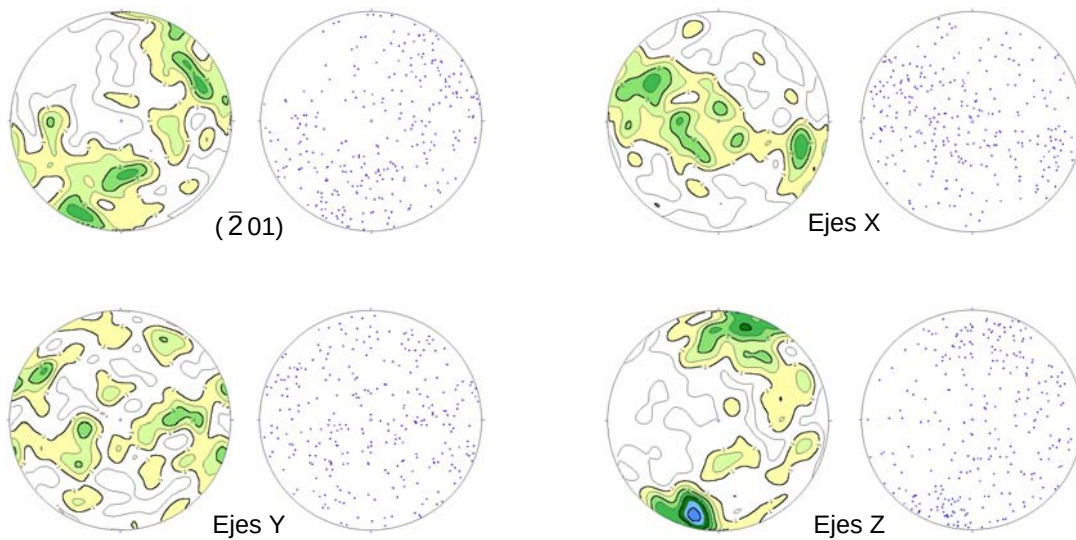


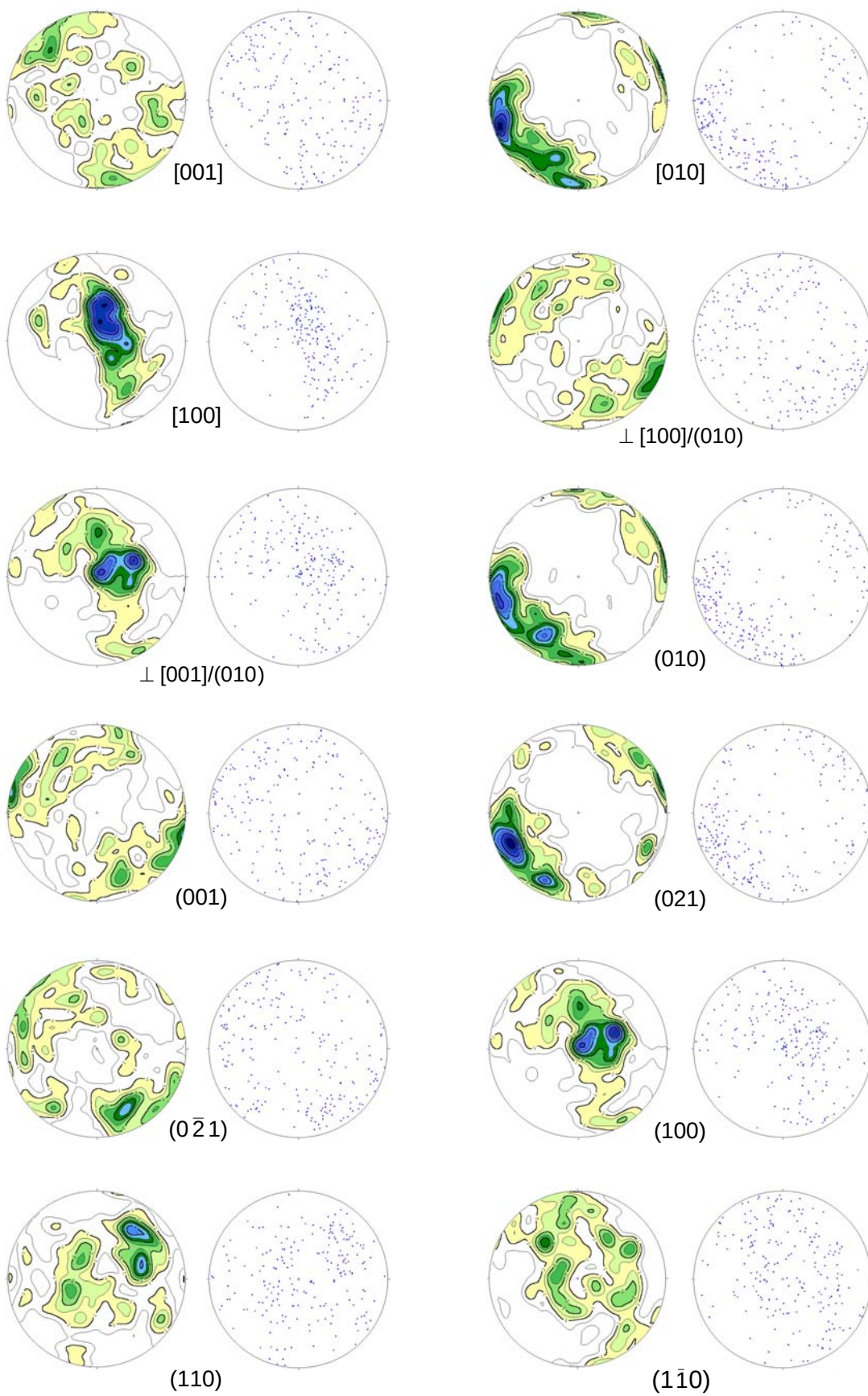
Fig.4.14 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 15 (B.0601-15). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 288 medidas. Área de contaje: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 16 (B.0601-16, fig 4.15)

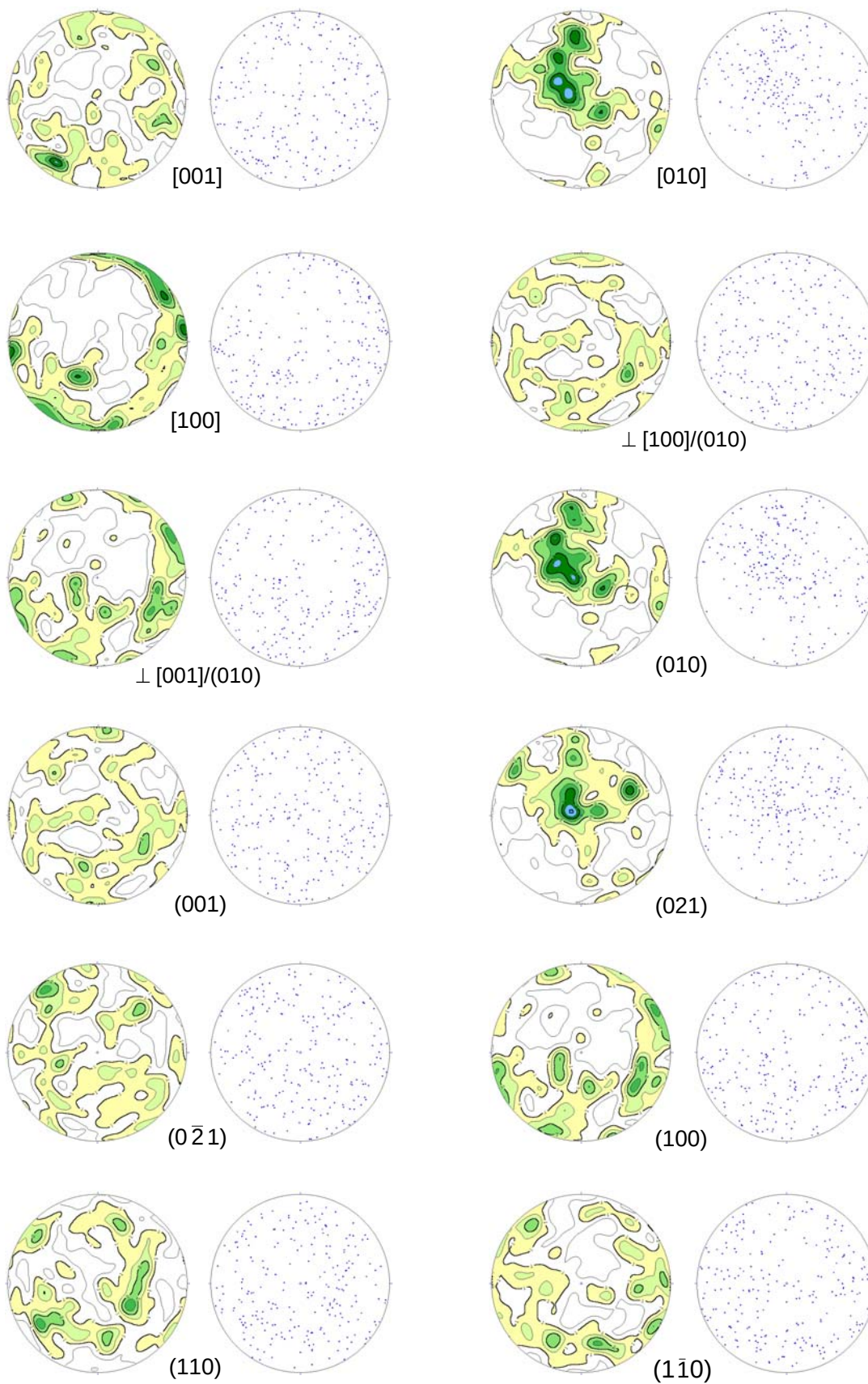
- [001]. Corona incompleta de tipo I_1 , bastante ancha y dejando libre de polos las regiones junto a los primitivos en los cuadrantes superior derecho e inferior izquierdo de la proyección. Se observan varios máximos que no se sitúan cercanos a ninguno de los autovectores. De todos ellos, el principal se localiza cerca del primitivo, a unos 45° del plano de foliación y lineación en sentido horario desde el SW.
- [010]. Distribución según un máximo muy estirado sobre el primitivo y con la mayor concentración de polos cercana a $\bar{t}_1$ ($15.1^\circ \rightarrow 232.2^\circ$). Puede describirse también como un anillo incompleto de tipo A_1 ó, más propiamente, como una corona de tipo I_2 , con el eje situado sobre el primitivo y desviado en sentido horario con respecto al polo de la foliación.
- [100]. Se trata de una corona incompleta de tipo I_1 desviada con respecto a la foliación en sentido horario. Presenta un único máximo muy estirado que se sitúa cerca de $\bar{t}_1$ ($73.3^\circ \rightarrow 37.6^\circ$), bastante cercano al plano de foliación y perpendicular a la lineación.

$\perp[100]/(010)$. Distribución en una corona de tipo I_2 , cuyo eje se sitúa a 35° de la traza del plano de foliación desviada unos 55° en sentido antihorario del polo de la foliación. La máxima concentración de polos se sitúa muy cerca de la lineación, cerca de $\bar{t}_1$ ($1.4^\circ \rightarrow 315.4^\circ$).

- $\perp[001]/(010)$. El tipo de distribución se parece bastante a $[001]$, pero en este caso el máximo se encuentra más concentrado y no tan estirado, aunque también ocupa la misma posición y se localiza cercano a $\bar{t}_1$ ($70.6^\circ \rightarrow 35.8^\circ$).
- (010) . Igual a $[010]$.
- (001) . Igual a $\perp[100]/(010)$.
- (021) . Igual a $[010]$ y (010) .
- $(0\bar{2}1)$. Corona incompleta en forma de anillo, que puede considerarse una combinación entre los tipos A_1 y A_2 . El máximo principal se sitúa cercano al primitivo, a muy alto ángulo de la foliación y lineación.
- (100) . Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110) . Corona incompleta de tipo anillo A_2 y con centro desplazado ligeramente respecto al eje E_2 . Se observan dos máximos principales agrupados y cercanos a $\bar{t}_1$ ($61.9^\circ \rightarrow 55.3$), a ángulos medios de la foliación y lineación, y dos máximos secundarios, simétricos respecto al plano de foliación y a bajo ángulo de éste.
- $(1\bar{1}0)$. Se trata de un caso intermedio entre corona incompleta de tipo I_1 y un anillo de tipo A_2 . Los máximos se disponen definiendo ese anillo al que se hace referencia, con centro ligeramente desplazado respecto a E_2 y a ángulos muy variados respecto a la foliación y lineación.
- $(\bar{2}01)$. Igual a $[100]$.
- Ejes X. Combinación de un anillo de tipo A_2 y una corona de tipo I_2 , cuyo eje se sitúa cercano a la lineación, aunque ligeramente desviado en sentido horario respecto a ella. Los máximos se dividen en dos grupos subparalelos a la foliación: unos al eje E_2 , cercanos a $\bar{t}_2$ ($78.9^\circ \rightarrow 78.0^\circ$) y perpendiculares a la lineación; y los otros perpendicular a los anteriores, a bajo ángulo de la lineación y cercanos a $\bar{t}_1$ ($10.7^\circ \rightarrow 274.9^\circ$).
- Ejes Y. El tipo de distribución es igual a la de los ejes X, pero en este caso los máximos perpendiculares a la lineación de encuentran más desarrollados y los que son paralelos a ésta no son tan concentrados. El eje de la corona de tipo I_2 coincide en este caso con la lineación.
- Ejes Z. Distribución muy clara y bien definida, en un único máximo muy concentrado perpendicular a la foliación y lineación, y localizado en las proximidades de $\bar{t}_1$ ($4.1^\circ \rightarrow 183.1^\circ$).



(continúa)



(continúa)

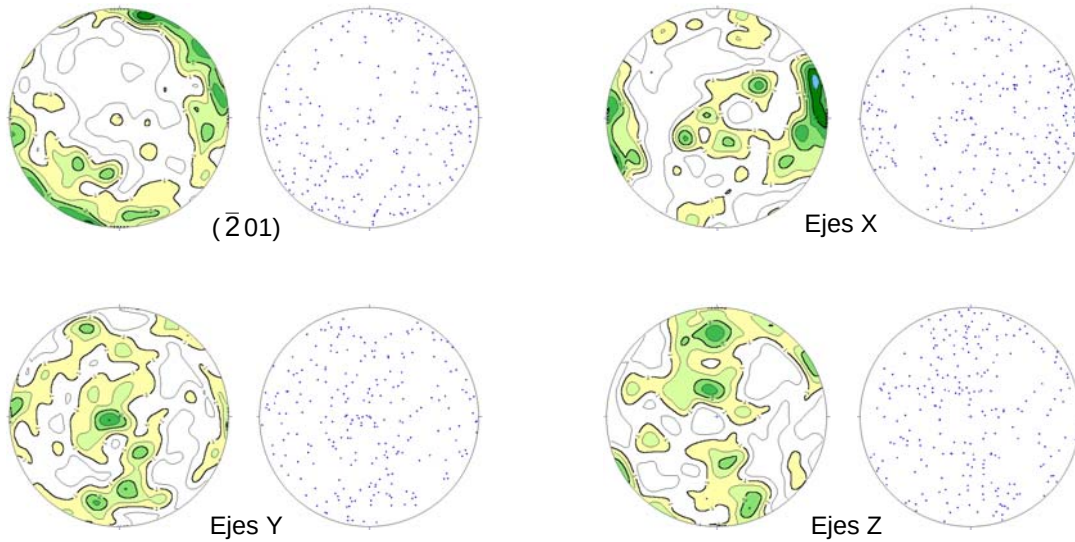
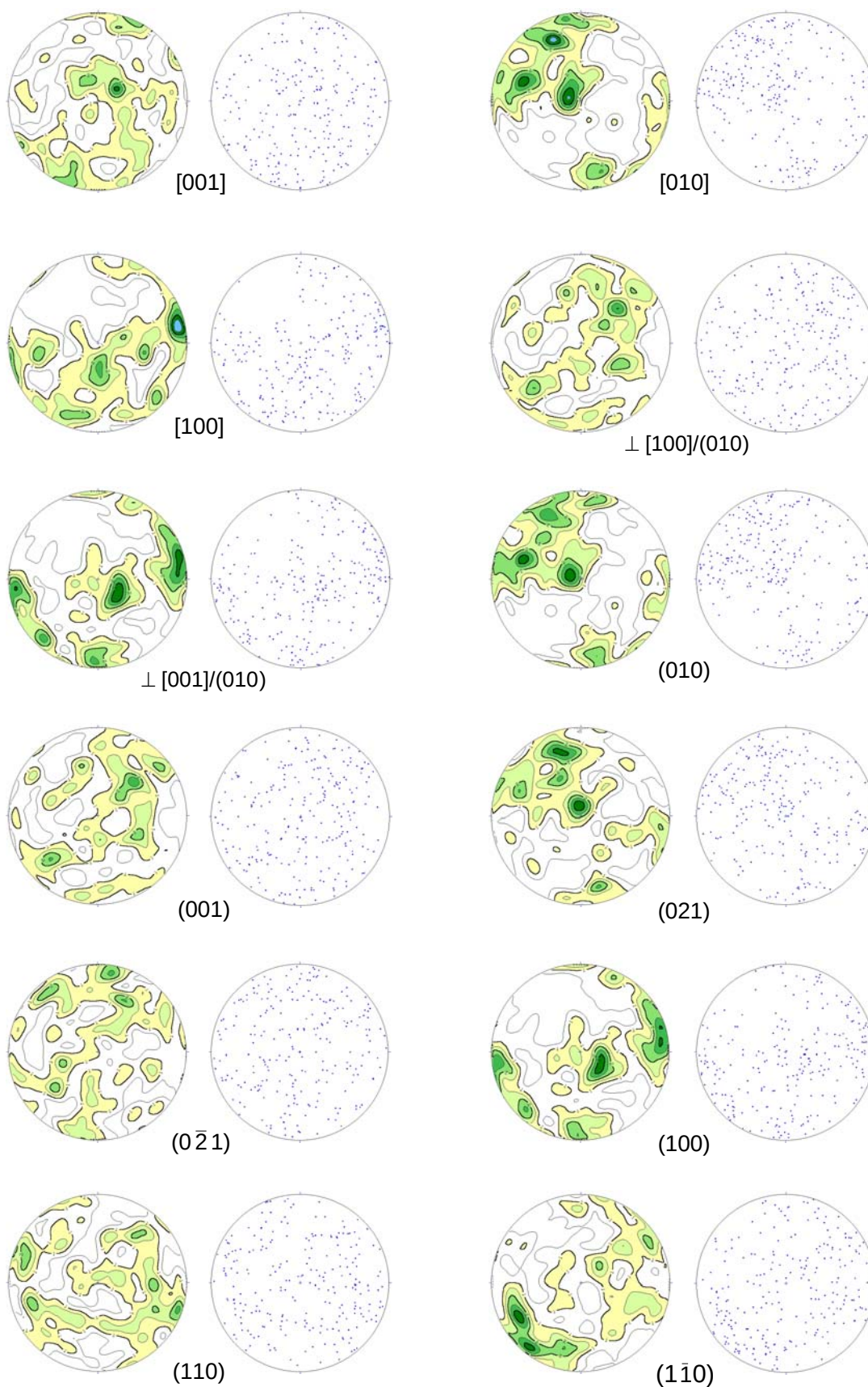


Fig.4.12 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 11 (B.0601-11). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 240 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 14 (B.0601-14, fig.4.13)

- [001]. Distribución de patrón poco claro debido a su tendencia a la uniformidad. Parece que los polos se dispusieran según un anillo de tipo A_2 con centro ligeramente desplazado respecto a E_2 , y con un grupo de máximos menores a alto ángulo de la lineación y situados tanto contenidos en el plano de foliación como a 90° de éste.
- [010]. Clara distribución en tres máximos muy bien desarrollados en torno a $\bar{t}_1$ ($29.6^\circ \rightarrow 319.0^\circ$) que forman un anillo complejo de tipo I_2 .
- [100]. Corona incompleta de tipo A_1 algo difusa, con varios máximos dispersos en sentido horario desde el NE; el principal de ellos, muy concentrado, casi coincidente con E_3 , es decir, paralelo a la lineación. Además, aparece una segunda corona de tipo I_2 con eje oblicuo situado en el cuadrante inferior derecho del diagrama.
- $\perp[100]/(010)$. Distribución bastante uniforme con varios máximos localizados a ángulos intermedios respecto a la foliación y la lineación, uno de ellos cercano a $\bar{t}_1$ ($39.1^\circ \rightarrow 41.8^\circ$).
- $\perp[001]/(010)$. Corona incompleta de tipo I_1 según E_2 - E_3 , aunque desviada ligeramente en sentido antihorario con respecto a dicho plano, y con dos máximos principales sobre el plano de foliación: uno paralelo a la lineación y el otro a casi 90° . Se observan también dos máximos secundarios perpendiculares a la foliación y lineación, que llegan a definir una corona incompleta de tipo A_1 junto con los máximos cercanos a la lineación.

- (010). Igual a [010], pero con los dos máximos principales alineados cerca de la traza de la foliación; uno de ellos perpendicular a la lineación y el otro a bajo ángulo de ésta.
- (001). Se parece bastante a $\perp[100]/(010)$, pero la distribución en este caso presenta un patrón de anillo incompleto tipo A_2 con centro ligeramente desplazado respecto a E_2 . Con peor definición, se observa otro anillo de tipo I_2 con eje situado cerca del primitivo y desviado en sentido horario con respecto a E_1 .
- (021). Distribución muy parecida a [010] y (010), pero con los dos máximos principales perpendiculares a la lineación: uno de ellos paralelo a la foliación y el otro a casi 90° .
- $(0\bar{2}1)$. Distribución bastante uniforme con varios máximos secundarios aislados, situados a alto ángulo de la lineación y a ángulos muy variados con respecto a la foliación.
- (100). Igual a $\perp[001]$.
- (110). Distribución bastante uniforme pero que presenta una tendencia hacia una corona de tipo anillo A_2 , con máximos a ángulos medio-bajos respecto a la foliación y lineación.
- $(1\bar{1}0)$. Caso intermedio entre corona incompleta tipo I_1 , inclinada respecto a la traza de la foliación, y un máximo muy bien desarrollado que estirado y cercano a $\bar{t}_1$ ($5.6^\circ \rightarrow 227.9^\circ$).
- $(\bar{2}01)$. Caso muy parecido a [100], con los máximos situados en las mismas posiciones.
- Ejes X. Se podría considerar o bien una corona incompleta de tipo I_1 paralela a la foliación o una distribución según dos máximos muy concentrados y muy bien definidos en la proyección, situados en el plano de foliación. Uno de ellos es paralelo a la lineación y cercano a $\bar{t}_1$ ($7.5^\circ \rightarrow 272.5^\circ$), y el otro a 90° del anterior y próximo a $\bar{t}_2$ ($82.4^\circ \rightarrow 98.8^\circ$). Esta distribución de los ejes X resulta ser de las más claras y llamativas en esta muestra. Aparece también una concentración de polos en las cercanías del eje E_1 .
- Ejes Y. Distribución en corona que combina los tipos I_1 , según E_1 - E_2 , y A_1 , con una concentración preferente de polos en varios máximos principales: uno de ellos perpendicular a la foliación y lineación, cercano a $\bar{t}_1$ ($1.2^\circ \rightarrow 1.1^\circ$), otro paralelo a la foliación y perpendicular a la lineación, y el otro subparalelo a la lineación. Los máximos coinciden aproximadamente con los ejes E_1 , E_2 y E_3 . No obstante, los máximos situados en las cercanías de E_1 se disponen según una corona de tipo I_2 muy cerrada, y los situados alrededor de E_3 definen otra corona de tipo I_2 , también bastante cerrada. Ambas coronas I_2 se enlazan a través del primitivo, definiendo el anillo de tipo A_1 .
- Ejes Z. Corona incompleta de tipo I_1 según E_1 - E_2 . Se intuye una segunda corona en anillo tipo A_1 muy poco desarrollada. Los máximos principales se sitúan estirados a 90° de la foliación y lineación, cercanos a $\bar{t}_1$ ($0.4^\circ \rightarrow 3.4^\circ$). El anillo A_1 se compone, a su vez, de dos coronas de tipo I_2 unidas a través del primitivo, de manera similar a como sucede en los ejes Y.



(continúa)

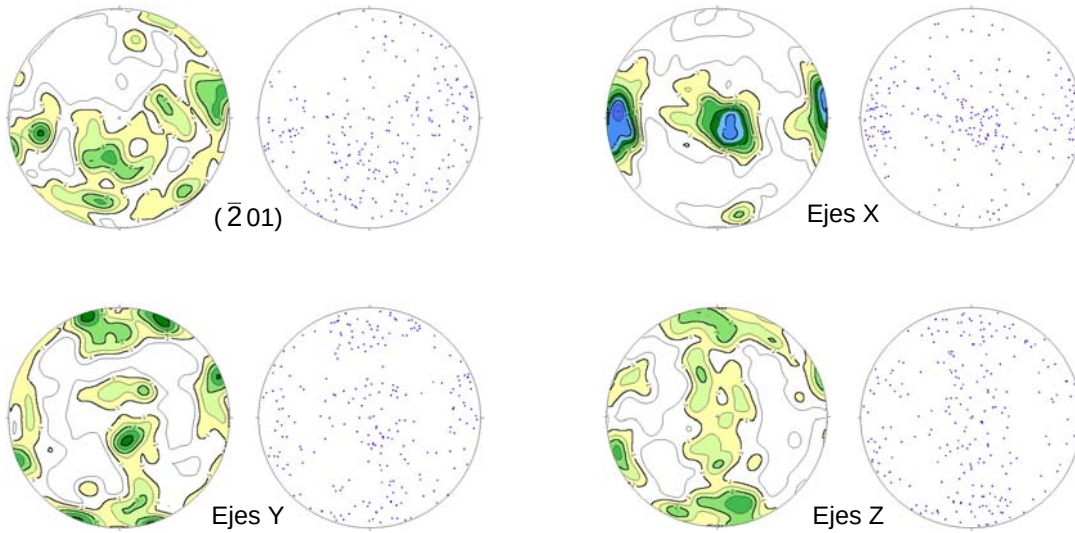
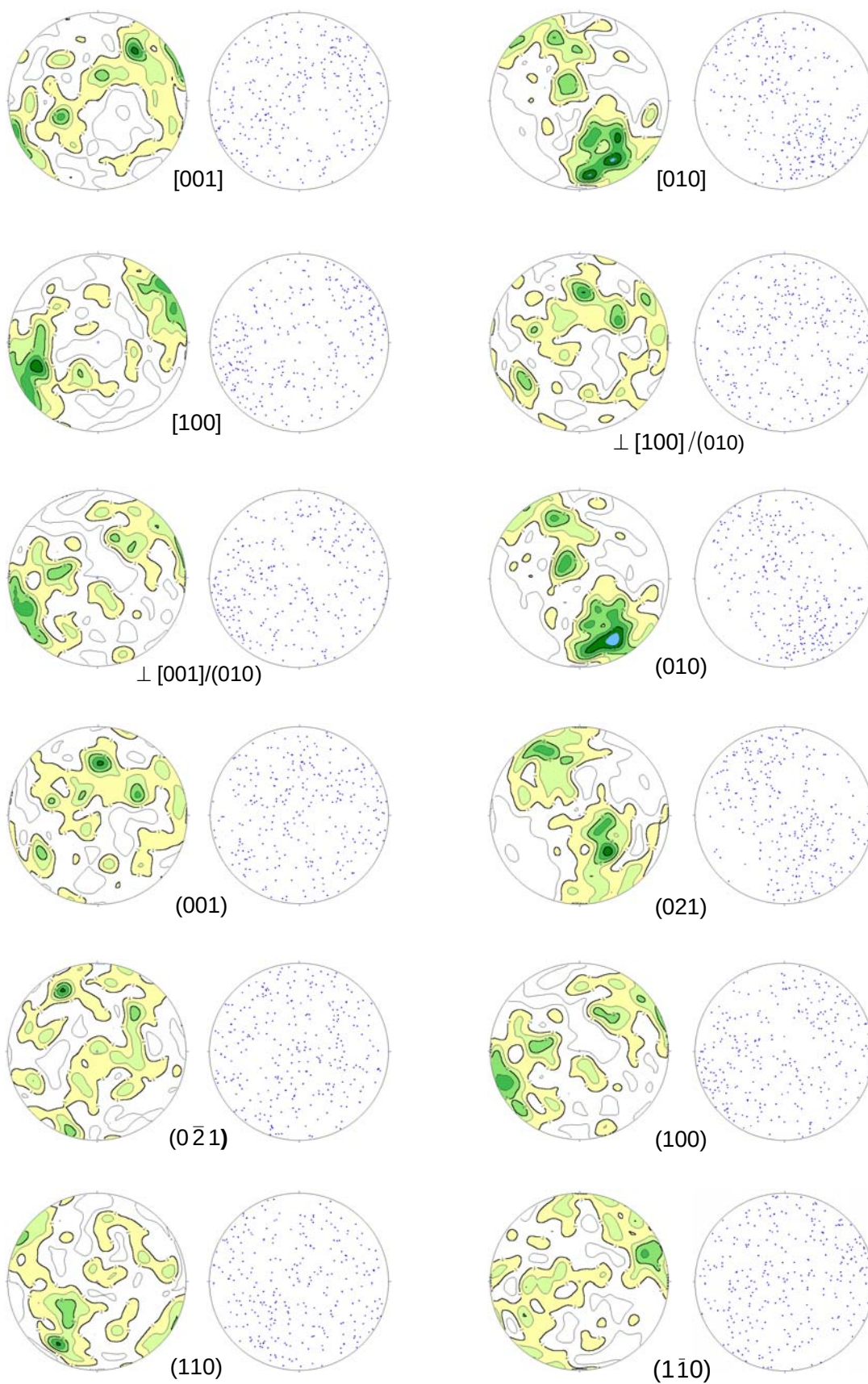


Fig.4.13 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 14 (B.0601-14). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 242 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 15 (B.0601-15, fig 4.14)

- [001]. Corona incompleta de tipo I_1 desviada en sentido antihorario con respecto a la foliación, con un máximo estirado sobre el primitivo de la proyección, a bajo ángulo de la lineación, y otros dos situados a ángulos intermedios de la foliación y lineación.
- [010]. Corona incompleta de tipo I_1 con un grupo de varios máximos muy bien desarrollados a alto ángulo de la foliación y lineación, y cercanos a $\bar{t}_1$ ($22.9^\circ \rightarrow 151.9^\circ$). Dicho autovector coincide con el eje de una corona I_2 muy cerrada.
- [100]. Distribución en un único máximo muy estirado sobre el primitivo de la proyección, a bajo ángulo de la foliación y lineación, y cercano a $\bar{t}_1$ ($8.0^\circ \rightarrow 243.9^\circ$). Se puede observar también un anillo A_2 pobremente definido
- $\perp[100]/(010)$. Distribución bastante uniforme con varios máximos secundarios a ángulos intermedios de la foliación y lineación. Dos de ellos se sitúan cercanos a $\bar{t}_1$ ($31.4^\circ \rightarrow 44.5^\circ$).
- $\perp[001]/(010)$. Muy similar a [001], con la mayor concentración de polos situada también sobre el primitivo de la proyección y cercana a $\bar{t}_1$ ($9.8^\circ \rightarrow 241.8^\circ$).
- (010). Igual a [010], pero con el máximo principal más agrupado y concentrado.
- (001). Igual a $\perp[100]/(010)$.

- (021). Corona incompleta de tipo I_1 que se parece bastante a [010] y (010), pero con el máximo principal menos desarrollado y algo desplazado hacia el centro de la proyección, a ángulos más bajos de la foliación y lineación que en los casos [010] y (010).
- $(0\bar{2}1)$. Distribución muy uniforme con un pequeño máximo a alto ángulo de la foliación y desviado de su polo en sentido antihorario, en el cuadrante superior izquierdo del diagrama.
- (100). Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110). Distribución bastante uniforme a excepción de un pequeño máximo cercano al primitivo de la proyección y subperpendicular a la lineación, aunque desviado en sentido horario con respecto al polo de la foliación.
- $(1\bar{1}0)$. También en este caso se observa uniformidad, al igual que en (110), pero el máximo en este caso se sitúa a bajo ángulo de la lineación, cercano a $\bar{t}_1$ ($1.1^\circ \rightarrow 55.0^\circ$).
- $(\bar{2}01)$. Corona incompleta de tipo I_1 parecida a [100], pero que parece se complementa en su extremo con una corona de tipo I_2 . Se distinguen tres máximos principales: dos de ellos cercanos a $\bar{t}_1$ ($10.8^\circ \rightarrow 218.2^\circ$), a alto ángulo de la foliación y lineación, y un tercer máximo a aproximadamente 20° en sentido antihorario desde el NE.
- Ejes X. Corona incompleta de tipo I_1 , ligeramente oblicua con respecto a la traza de la foliación (desviada con respecto a ella en sentido horario) y con un grupo de máximos a ángulos muy diversos con respecto a la lineación y cercanos, en líneas generales, a $\bar{t}_1$ ($44.1^\circ \rightarrow 283.2^\circ$) y $\bar{t}_2$ ($45.3^\circ \rightarrow 115.3^\circ$).
- Ejes Y. Distribución muy uniforme con varios máximos menores a bajo ángulo de la foliación y a ángulos intermedios de la lineación.
- Ejes Z. Es la distribución mejor definida de todas las de esta muestra. Se trata de un caso intermedio entre una corona incompleta de tipo I_1 con eje en la parte inferior izquierda de la proyección, y un anillo incompleto de tipo A_1 . El máximo principal es casi perpendicular a la foliación y se sitúa cerca de $\bar{t}_1$ ($5.0^\circ \rightarrow 14.9^\circ$); aunque la mayor concentración de polos se desvía en sentido horario del polo de la foliación.



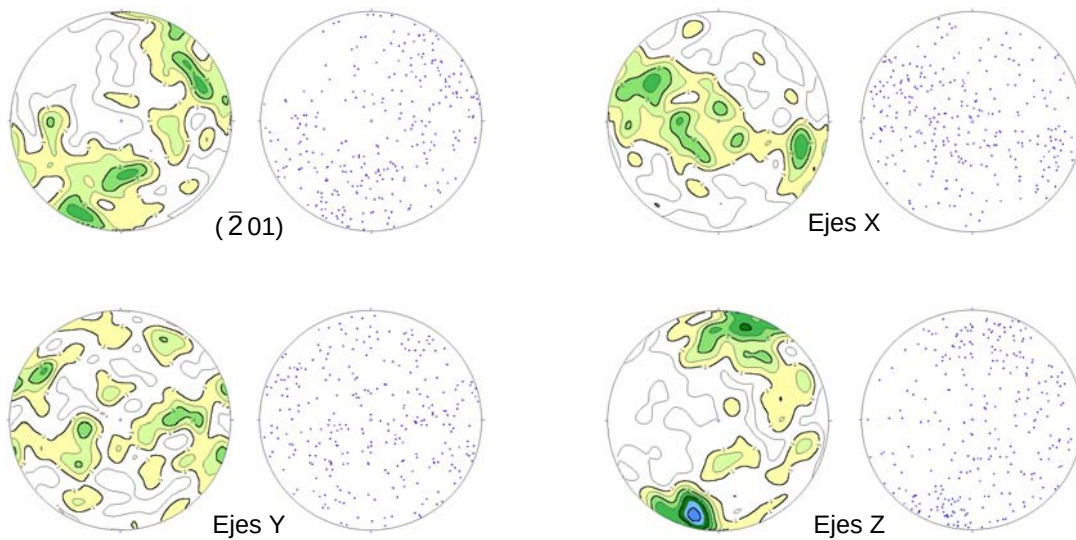


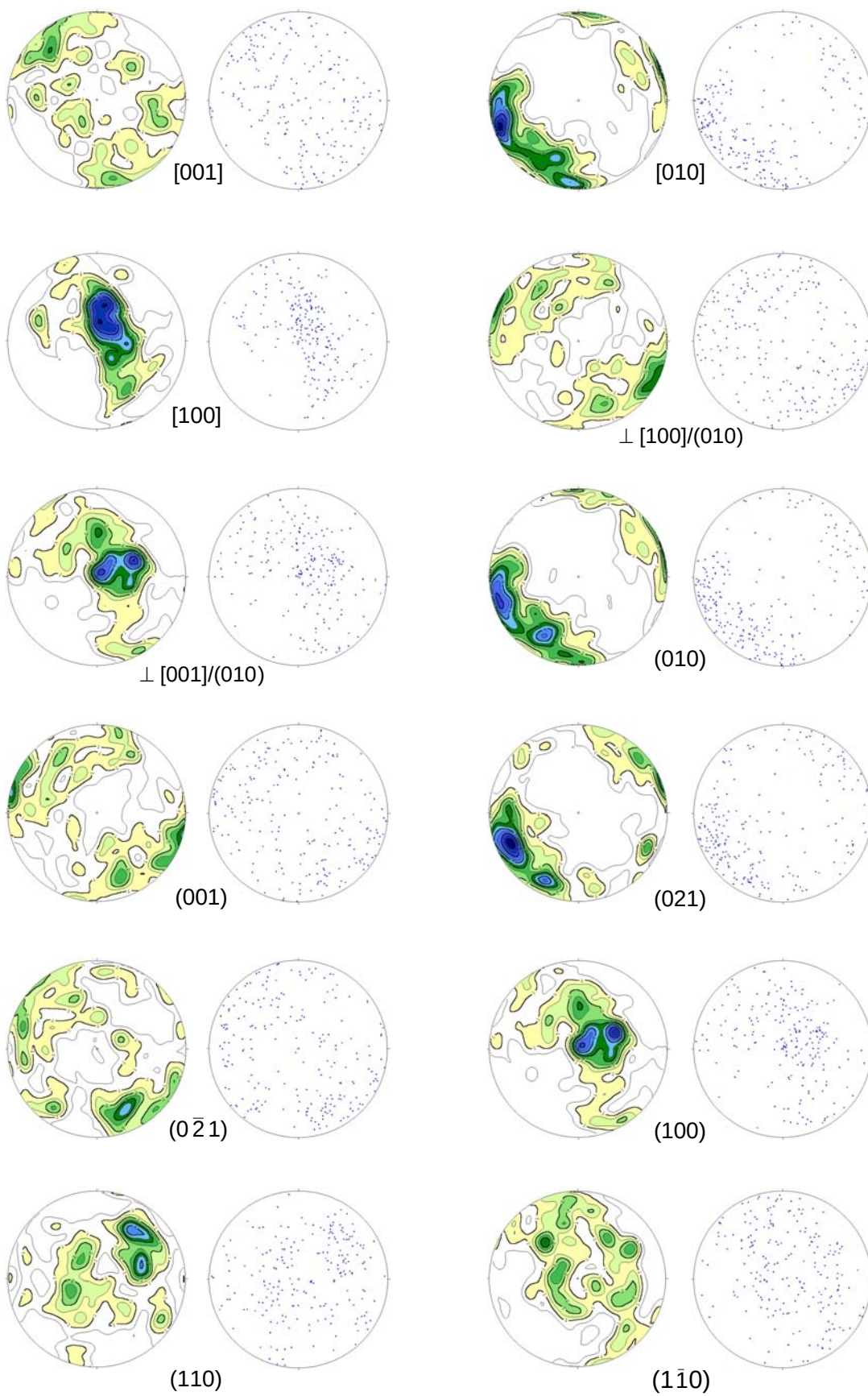
Fig.4.14 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 15 (B.0601-15). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 288 medidas. Área de contaje: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 16 (B.0601-16, fig 4.15)

- [001]. Corona incompleta de tipo I_1 , bastante ancha y dejando libre de polos las regiones junto a los primitivos en los cuadrantes superior derecho e inferior izquierdo de la proyección. Se observan varios máximos que no se sitúan cercanos a ninguno de los autovectores. De todos ellos, el principal se localiza cerca del primitivo, a unos 45° del plano de foliación y lineación en sentido horario desde el SW.
- [010]. Distribución según un máximo muy estirado sobre el primitivo y con la mayor concentración de polos cercana a $\bar{t}_1$ ($15.1^\circ \rightarrow 232.2^\circ$). Puede describirse también como un anillo incompleto de tipo A_1 ó, más propiamente, como una corona de tipo I_2 , con el eje situado sobre el primitivo y desviado en sentido horario con respecto al polo de la foliación.
- [100]. Se trata de una corona incompleta de tipo I_1 desviada con respecto a la foliación en sentido horario. Presenta un único máximo muy estirado que se sitúa cerca de $\bar{t}_1$ ($73.3^\circ \rightarrow 37.6^\circ$), bastante cercano al plano de foliación y perpendicular a la lineación.

$\perp[100]/(010)$. Distribución en una corona de tipo I_2 , cuyo eje se sitúa a 35° de la traza del plano de foliación desviada unos 55° en sentido antihorario del polo de la foliación. La máxima concentración de polos se sitúa muy cerca de la lineación, cerca de $\bar{t}_1$ ($1.4^\circ \rightarrow 315.4^\circ$).

- $\perp[001]/(010)$. El tipo de distribución se parece bastante a $[001]$, pero en este caso el máximo se encuentra más concentrado y no tan estirado, aunque también ocupa la misma posición y se localiza cercano a $\bar{t}_1$ ($70.6^\circ \rightarrow 35.8^\circ$).
- (010) . Igual a $[010]$.
- (001) . Igual a $\perp[100]/(010)$.
- (021) . Igual a $[010]$ y (010) .
- $(0\bar{2}1)$. Corona incompleta en forma de anillo, que puede considerarse una combinación entre los tipos A_1 y A_2 . El máximo principal se sitúa cercano al primitivo, a muy alto ángulo de la foliación y lineación.
- (100) . Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110) . Corona incompleta de tipo anillo A_2 y con centro desplazado ligeramente respecto al eje E_2 . Se observan dos máximos principales agrupados y cercanos a $\bar{t}_1$ ($61.9^\circ \rightarrow 55.3$), a ángulos medios de la foliación y lineación, y dos máximos secundarios, simétricos respecto al plano de foliación y a bajo ángulo de éste.
- $(1\bar{1}0)$. Se trata de un caso intermedio entre corona incompleta de tipo I_1 y un anillo de tipo A_2 . Los máximos se disponen definiendo ese anillo al que se hace referencia, con centro ligeramente desplazado respecto a E_2 y a ángulos muy variados respecto a la foliación y lineación.
- $(\bar{2}01)$. Igual a $[100]$.
- Ejes X. Combinación de un anillo de tipo A_2 y una corona de tipo I_2 , cuyo eje se sitúa cercano a la lineación, aunque ligeramente desviado en sentido horario respecto a ella. Los máximos se dividen en dos grupos subparalelos a la foliación: unos al eje E_2 , cercanos a $\bar{t}_2$ ($78.9^\circ \rightarrow 78.0^\circ$) y perpendiculares a la lineación; y los otros perpendicular a los anteriores, a bajo ángulo de la lineación y cercanos a $\bar{t}_1$ ($10.7^\circ \rightarrow 274.9^\circ$).
- Ejes Y. El tipo de distribución es igual a la de los ejes X, pero en este caso los máximos perpendiculares a la lineación de encuentran más desarrollados y los que son paralelos a ésta no son tan concentrados. El eje de la corona de tipo I_2 coincide en este caso con la lineación.
- Ejes Z. Distribución muy clara y bien definida, en un único máximo muy concentrado perpendicular a la foliación y lineación, y localizado en las proximidades de $\bar{t}_1$ ($4.1^\circ \rightarrow 183.1^\circ$).



(continúa)

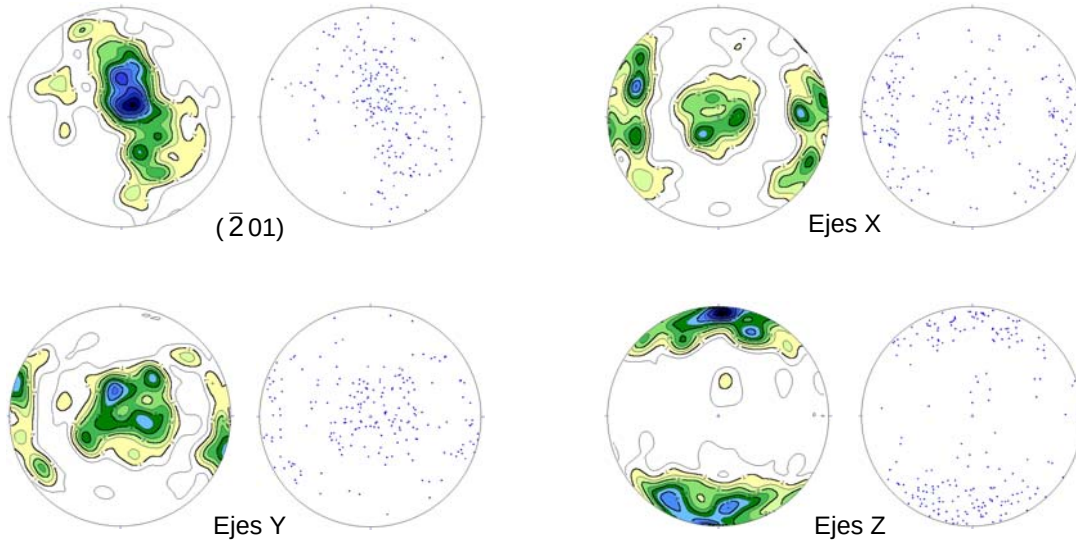


Fig.4.15 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 16 (B.0601-16). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 213 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

De todas las muestras del corte de Almonaster la Real, la 16 es la que presenta los patrones de distribución más claros y mejor definidos. No sólo los máximos se encuentran más concentrados respecto a todas las muestras previas, sino que es el único caso en el que los elementos $[100]$, $\perp[001]/(010)$, (100) y $(\bar{2}01)$ presentan tantas similitudes entre sí. En el resto de muestras, esas semejanzas sólo se apreciaban entre los elementos $\perp[001]/(010)$ y (100) por un lado, y $[001]$ y $(\bar{2}01)$ por otro, pero no para los cuatro casos conjuntamente.

4.2.3. Resultados del Test de Bondad de ajuste a Watson

La comprobación de la bondad de ajuste a la distribución de Watson consiste en dos tipos de test: el de colatitud y el de longitud. Para ambos hemos desarrollado el procedimiento de cálculo numérico, y sólo para el caso del test de colatitud hemos llevado a cabo, también, el procedimiento gráfico para la determinación del ajuste a la distribución de Watson (ver gráficos, apéndice B2). En este último caso el procedimiento matemático ha presentado numerosos problemas debido a las erratas de la fuente consultada y a los problemas que ya se mencionaron en el capítulo de metodología (apartado 3.6, *Descripción general de los principales tipos de test utilizados*). El principal problema ha consistido en que los test numéricos han rechazado sistemáticamente la bondad de ajuste a la distribución de Watson para las medidas de la colatitud de todos y cada uno de los elementos cristalográficos sin excepción. Además, la enorme similitud de los valores de los estadísticos para los elementos

cristalográficos de una misma muestra (ver apéndice B1), cuyos diagramas de densidad difieren mucho entre sí, nos hizo sospechar que las ecuaciones, a pesar de las correcciones enviadas por Fisher, podían seguir conteniendo erratas que hubieran pasado desapercibidas por el autor. Fisher (*comunicación personal*) nos aconsejó llevar a cabo el procedimiento gráfico para el test de colatitud y comprobar si, efectivamente, el procedimiento numérico funcionaba correctamente o si por el contrario se observaban incongruencias.

Con el procedimiento gráfico pudimos comprobar que el procedimiento matemático funcionaba correctamente y que los gráficos de todos los elementos cristalográficos de cada muestra, y del corte en general (ver apéndice B2), presentaban siempre una tendencia tremendamente similar, y sin excepción: tendencia lineal de los datos que pasan por el origen de ordenadas y que a partir de un momento dado pierden la linearidad, de modo que la trayectoria se hace asintótica hacia la parte superior. Esta enorme similitud sistemática entre los gráficos corroboró, una vez más, el porqué los estadísticos siempre tuvieran valores tan parecidos entre sí, sin apenas variaciones significativas. El método gráfico no sólo nos ha permitido una valoración cualitativa en cuanto a la fiabilidad del ajuste, sino que también hemos podido identificar los puntos a partir de los cuales se produce una interrupción en el ajuste lineal de la muestra (recordemos que el ajuste ideal es aquél en el que los puntos se disponen alineados según una línea que pasa por el origen de ordenadas y la pendiente de dicha recta supone una estimación de $1/k$ en el caso de distribución bipolar y $|1/2k|$: $k < 0$ en el caso de distribución en corona).

La bondad de ajuste a Watson la evaluamos de la siguiente manera: en primer lugar realizamos el ajuste a la distribución bipolar (test de colatitud y longitud), y a continuación hacemos lo mismo con la distribución en corona. La bondad de ajuste perfecta consistiría en una muestra que rechazase completamente el ajuste a una de las dos distribuciones (ambos test) y, sin embargo, se ajustara al otro tipo de distribución. Consideramos que la bondad de ajuste es dudosa o hay que tomarla con cierta precaución, incluso rechazarla, cuando existe un ajuste a ambos tipos de distribuciones, aunque no sea completo, es decir, que una muestra en cuestión ajuste por ejemplo solamente al test de longitud para una de la distribución y al test de colatitud para la otra distribución. En líneas generales, y considerando que nunca se cumple el ajuste al test de colatitud (como mencionamos antes) para ninguna de las dos distribuciones, podemos considerar diferentes grados de aproximación a la bondad de ajuste:

- Aquellos casos en los que ha habido ajuste del test de longitud tanto a la distribución bipolar (P_n) como a la de corona (P_n^*). Podríamos estar tratando con un caso intermedio entre ambos tipos de distribuciones. Es el caso, por ejemplo (ver apéndice B1), de (001) en las muestras 2, 7, 11, 14 y 15.
- Aquellos casos en los que sólo ha habido ajuste al test de longitud para uno de los dos tipos de distribución. Podríamos pensar en un ajuste correcto o quizás dudoso (al no poder contar con el resultado del test de longitud) a la distribución en cuestión. Por ejemplo, para el caso de la muestra

2, distribución bipolar para los elementos, [010], (021), ejes X y Z, y distribución en corona para los elementos [001], [100], $\perp[001]/(010)$, $(1\bar{1}0)$ y $(\bar{2}01)$.

- Finalmente, aquellos otros casos en los que no hay ajuste de ningún tipo (ni colatitud ni longitud) a ninguna de las dos distribuciones. Rechazaríamos cualquier posibilidad de ajuste. Véase, por ejemplo, el caso de [001], $\perp[001]/(010)$, y (100) para la muestra 4.

El fallo sistemático en el ajuste de colatitud resulta problemático, aunque seguimos creyendo que se trata de un fallo de partida en las fórmulas y planteamientos propuestos por Fisher *et al.* (1987) en su libro. No obstante, esta falta de ajuste sistemático a dicho test podría explicarse, por lo tanto, de las siguientes maneras:

- Un fallo en el test.
- Las muestras (algunas al menos) siguen una distribución de Bingham general que no coincide con los tipos más concretos de Watson.
- La distribución de polos según la colatitud no es la típica de la distribución de Watson.
- Las muestras no siguen la distribución de Bingham.

La primera de las explicaciones es siempre posible, pero no demostrable. Las otras tres posibilidades que se contemplan pueden funcionar o combinarse de diferente manera para cada muestra, es decir, en una muestra puede predominar la posibilidad (3), por ejemplo, para un elemento cristalográfico dado, y predominar otra posibilidad diferente para otro elemento de esa misma muestra. En el caso concreto de las muestras del corte de Almonaster la Real, en ninguna de ellas (para ninguno de sus 16 elementos cristalográficos considerados) hemos obtenido ajuste al test de colatitud, ni para la distribución en corona ni tampoco para la bipolar. El valor del estadístico de colatitud para la distribución bipolar (MB, valor crítico = 1.094) varía entre 14 y 16 para todas las muestras, excepto para la muestra 16 en la que desciende a valores entre 10 y 13. A pesar de que MB se supone normalizado, caben bastantes dudas al respecto ya que como puede verse en el apéndice B1, los valores se van haciendo más pequeños en aquellas muestras en las que el número de granos medidos es menor. De hecho, esto se hace más evidente en el caso de la muestra 16 en la que sólo hemos medido 213 granos, a diferencia del resto en las que se han medido una media de 290 granos por muestra. Por lo tanto, cabe destacar que el número de granos medidos influye directa y proporcionalmente en el valor de MB, aunque no debiera ser así.

De igual manera, el test de longitud de la distribución en corona tampoco se cumple para ninguno de los elementos cristalográficos de las siete muestras. El valor crítico (1.15) de su estadístico (MG) es superado siempre, alcanzando valores muy diversos, entre 3 y 8; aunque en algunos casos

como en $(0\bar{2}1)$ de la muestra 4, 7 y 15, es superior a 10. Para el caso de MG, a diferencia de MB, el estadístico parece no estar afectado por el número de granos medido en cada muestra, y si lo está es muy ligeramente, casi inapreciable (ver como ejemplos los casos de las muestras 14 y 16, que son en las que se han tomado un menor número de medidas).

4.2.4. Resultados del Test de Uniformidad de Ajne

Inicialmente, y antes de normalizar el valor del estadístico del test de uniformidad de Ajne (A_n), el valor que calculábamos con el programa informático *PLAG-9* era siempre superior a 20 para todos los elementos cristalográficos de las siete muestras, mientras que el valor crítico para el test se sitúa en ≤ 8.9 . Concretamente, los estadísticos obtenidos oscilan entre 20.09 ($(0\bar{2}1)$, muestra 16) y 35.25 ((010) , muestra 15). Al normalizar los datos, los nuevos valores resultantes son, como es lógico esperar, inferiores a la unidad. Todo esto se muestra en el apéndice B3.

Debido a la complicación ya mencionada en el capítulo de metodología (apartado 3.6.3), no se pudo calcular, dada su dificultad, el valor crítico y/o nivel de significación para estos nuevos datos normalizados, razón por la cual sólo hemos procedido a presentar los resultados obtenidos en el apéndice mencionado, sin entrar en si ajustan o no a la uniformidad. Además, los resultados del estadístico de Ajne normalizado (A_n/n) lo representamos gráficamente, junto con el valor del estadístico de uniformidad de Bingham, para cada uno de los elementos cristalográficos de cada muestra en el siguiente apartado (4.2.5). Es a lo que hemos llamado gráficos BDA (Bingham-Distancia-Ajne) y que explicaremos a continuación.

4.2.5. Gráficos BDA (Bingham – Distancia - Ajne)

Se ha procedido a realizar un gráfico de tres ejes para cada uno de los elementos cristalográficos de cada muestra. En la horizontal hemos representado la distancia o posición de cada muestra respecto al techo de la serie de las metabasitas, en el eje vertical izquierdo el valor del estadístico del test de uniformidad de Bingham (S_u , ver apéndice B4 para los valores del estadístico, autovalores y autovectores), y en el eje vertical derecho el valor del estadístico del test de uniformidad de Ajne normalizado (A_n/n , ver apéndice B3). Con esto hemos pretendido comparar los resultados de ambos test y comprobar qué efecto tiene el hecho de haber utilizado un test de tipo paramétrico (Bingham) frente a otro que no lo es (Ajne), es decir, si los resultados de uniformidad y los patrones de variación de estos estadísticos con la distancia son congruentes en ambos casos (fig.4.16). No es prioritario que tengamos en cuenta cuál es el valor crítico que hemos considerado en cada uno de los test. Lo que interesa no es tanto el valor crítico en sí, es decir, si la distribución se ajusta o no a la uniformidad, sino la evolución que siguen ambas trayectorias y su comparación.

Antes de nada, conviene señalar que el hecho de que una muestra no presente ajuste a la distribución de Watson (como, por ejemplo, [010] de la muestra 7 y 11, o [010], [100] y ejes Z de la muestra 11), no significa que no sea aplicable o fiable el estadístico S_u de uniformidad. Esto es debido a que la distribución de Watson es un caso especial de la de Bingham. Una muestra puede no ajustarse a la distribución de Watson y, sin embargo, sí a la de Bingham. En cualquier caso, y como no disponemos del test de ajuste a la distribución de Bingham, los casos de no ajuste a la distribución de Watson deben ser considerados con precaución.

Se describirán los diagramas BDA obtenidos agrupándolos de acuerdo con las similitudes observadas:

- $\perp [100]/(010)$ y (001)

Las trayectorias de uniformidad de Bingham y Ajne son iguales para ambos elementos cristalográficos. Se observan discrepancias entre S_u y A_n/n para las muestras 4 y 16. En estos dos casos aumenta la intensidad de la fábrica respecto a las muestras 2 y 15, respectivamente, alejándose de la uniformidad en el caso del test de Bingham, mientras ocurre lo contrario para el caso del test de Ajne. Salvo estas dos excepciones, en las que los resultados de ambos test se contradicen, la evolución general es hacia una tendencia de mayor intensidad de fábrica hacia techo y muro de la serie de las metabasitas. Anecdóticamente, conviene destacar que las muestras 2 y 16 (junto con la 15) son aquellas en las que el test de ajuste a la distribución de Watson se cumple, al contrario de lo que sucede con el resto de las muestras del perfil en las que el resultado es dudoso.

- [010], (010) y (021)

Los gráficos que más se parecen son [010] y (010) [lo mismo ocurre con los gráficos de Woodcock y los diagramas de densidad]. Para estos dos elementos la muestra 16 vuelve a representar una evolución opuesta según se considere el caso del test de Bingham o el de Ajne (conviene aclarar que en el ajuste a la distribución de Watson se trata de una muestra dudosa). Al contrario que en el caso (a), hay compatibilidad en los resultados de los test de uniformidad para la variación 2-4. La tendencia general es parecida al caso (a), excepto en el descenso de la intensidad de las fábricas para la 2, con una tendencia a aumentar la uniformidad hacia la parte media de la serie (muestras 7, 11 y 14) y alejarse de ella en las muestras 15 y 16. En el caso de estas últimas dos muestras, los problemas que se han encontrado en el ajuste a la distribución de Watson sugieren que hay que considerar con cautela su proyección en los diagramas BDA.

En el caso de (021) la tendencia es algo distinta. No sólo se produce un cambio significativo en la tendencia de la muestra 7 en el caso del test de Ajne, que se aleja de la uniformidad en (021) mientras que sucedía lo contrario para los otros dos elementos cristalográficos, sino que en el caso de la muestra 16 los resultados de ambos test son congruentes con una tendencia hacia una mayor intensidad de la fábrica, alejándose de la uniformidad considerablemente. En este caso (muestra 16) el test de Ajne no contradice al de Bingham, como ocurría en [010] y (010). No obstante, es

conveniente destacar que es la única muestra del corte cuyo ajuste a la distribución de Watson no es fiable.

- $[100]/(010)$ y $(\bar{2}01)$

La evolución de ambas trayectorias es la misma para ambos elementos. Tanto Bingham como Ajne experimentan un cambio bastante brusco y significativo en las muestras 15 y 16, alejándose bastante de la uniformidad e indicando con ello una tendencia hacia una fábrica con una orientación preferente más marcada hacia muro de la serie. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que los resultados de Watson para las muestras mencionadas es dudoso e incluso no fiable.

- $\perp [001]/(010)$ y (100)

Las tendencias de los estadísticos de Bingham y Ajne para estos dos elementos no sólo son muy parecidas entre sí sino que también se parecen bastante a los elementos cristalográficos $[100]$ y $(\bar{2}01)$. Para el caso de $\perp [001]/(010)$ y (100) sólo las muestras 4 y 16 son no fiables desde el punto de vista del ajuste a la distribución de Watson.

- $[001]$

Ambas curvas siguen una trayectoria bastante similar. Sólo se produce un cambio significativo en la evolución de las muestras 4 y 16. Mientras que para el primer caso el test de Ajne presenta valores muy parecidos para 2 y 4, sin embargo el test de Bingham presenta un aumento de la orientación preferente de la fábrica de la muestra 4 respecto a la 2. Para el caso de la muestra 16 vuelve a ocurrir lo que ya se vio en los casos (a) y (b), es decir, según el test de Bingham se aleja de la uniformidad mientras que para el de Ajne ocurre lo contrario. Es importante destacar que las muestras 4 y 16 son las únicas que muestran ajuste a la distribución de Watson, y que el resto son dudosas. La tendencia general es hacia un incremento de la intensidad de la fábrica para las muestras situadas más cerca del techo y muro de la serie.

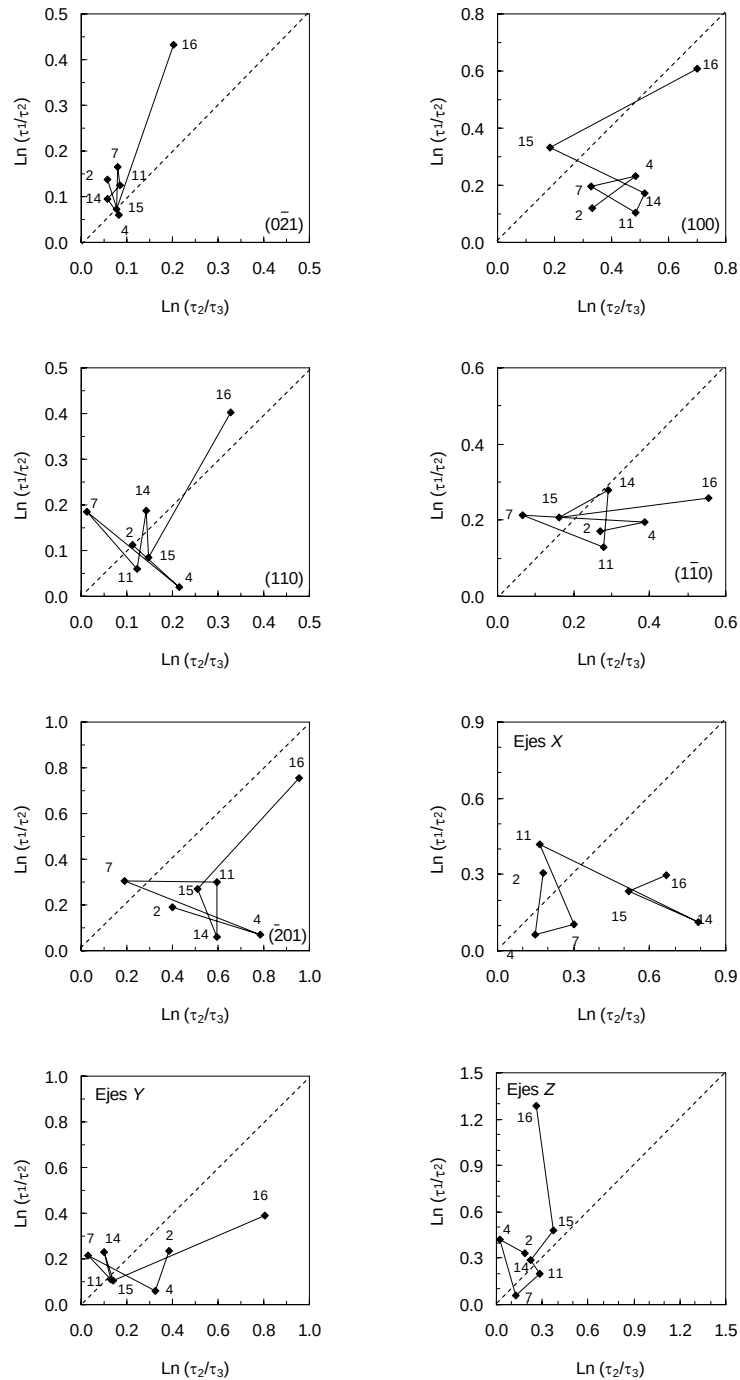


Fig.4.20 (continuación). Gráficos de Woodcock. Igual que en los diagramas de densidad de polos, podemos distinguir cuatro grupos de elementos cristalográficos que presentan un gran similitud: $\perp[100]/(010)$ y (001) ; $[010]$, (010) y (021) ; $[100]$ y $(\bar{2}01)$; y $\perp[001]/(010)$ y (100) . La línea discontinua representa la divisoria de campos ($K=1$) de la distribución en corona ($K<1$) y de la distribución en máximos ($K>1$). La muestra, cuanto más se aleja del origen de ordenadas, aumenta su intensidad de fábrica (su orientación cristalográfica preferente, OCP). Los valores de abscisas y ordenadas para cada punto se resumen en el apéndice B4.

- $(0\bar{2}1)$

Todas las muestras, excepto la 16, se sitúan muy cerca de $K=1$. Todas, salvo las muestras 4 y 15, se sitúan en el campo de los máximos. La intensidad de la fábrica varía muy poco, sólo aumenta ligeramente para 2, 7 y 11, mientras que para la 16 ese cambio resulta realmente significativo, al mismo tiempo que también su patrón de distribución queda mucho mejor definido también.

En general, las líneas que unen las muestras son bastante verticales, paralelas al eje vertical, excepto la 11-14 que es paralela a $K=1$ y la 14-15 que es justo todo lo contrario, perpendicular a la divisoria de campos. Las muestras 2, 7 y 14 tienden a adentrarse, muy ligeramente, en el campo de los máximos.

- (110)

Las muestras 7, 14 y 16 se sitúan en el campo de los máximos, las muestras 4, 11 y 15 en el de las coronas, y la 2 sobre la línea divisoria de campos $K=1$. Sin embargo, observando los diagramas de densidad se aprecian diferencias importantes con su representación en el diagrama de Woodcock. La muestra 16, sí muestra realmente la forma de una corona incompleta o un máximo muy estirado. En cuanto al resto de las muestras, los tipos de distribución son muy claros y no coinciden aparentemente con la posición que ocupan en el diagrama de Woodcock. Sirvan de ejemplos las muestras 4 y 7, que en el diagrama de Woodcock ocupan posiciones totalmente contrarias: la 7 se sitúa casi sobre el eje Y describiendo un máximo sencillo y la 4 sobre el eje horizontal como una corona completa. En el caso de la muestra 4, que consiste en realidad en varias coronas, el predominio de la concentración de polos en una de ellas explica su situación en el diagrama de Woodcock. En cuanto a la muestra 7, que consiste en un anillo A_2 , su representación estadística es la de un máximo como cabía esperar para este tipo de distribuciones.

En cualquier caso, es cierto que la interpretación de los resultados hay que tomarlos con precaución ya que no son completamente fieles a lo que se observan en sus diagramas de densidad. La muestra 16 es la que presenta una mayor concentración de polos, alejándose del resto de las muestras y aumentando la intensidad de su fábrica de forma considerable.

- $(1\bar{1}0)$

Las trayectorias son bastante horizontales, prácticamente paralelas al eje horizontal, excepto la evolución de la muestra 11 a 14, que es perpendicular a dicho eje, al contrario de lo que se observaba en $(0\bar{2}1)$. Las muestras 7 y 15 se sitúan en el campo de los máximos, esta última muy cerca de $K=1$. La muestra 14 se localiza sobre la propia divisoria de campos, y el resto de muestras en el campo de las distribuciones en corona.

La mayor intensidad de fábrica la presentan las muestras 4, 14 y 16, sobre todo esta última. La 4 representa, respecto a la 2, una mayor intensidad de fábrica, pero sin un cambio significativo en

la forma del patrón de distribución. La 7 supone, respecto a la 4, un cambio del campo de coronas al de máximos, reduciéndose muy notablemente la intensidad de su fábrica, para volver a pasar nuevamente a una distribución en corona (muestra 11) y cambiar al de máximos otra vez en la 14. La muestra 15 supone un descenso en la intensidad de la fábrica para aumentar muy notablemente hacia la 16, paralelamente al eje de abscisas, hacia una distribución en corona y con una marcada orientación preferente.

- Ejes X

Sólo las muestras 2 y 11 se sitúan en el campo de los máximos. Las muestras 4, 7, 15 y 16 se alinean en el campo de las coronas paralelamente a $K=1$, lo cual define un aumento en la intensidad de la fábrica hacia muro de la lámina de metabasitas, mientras se mantiene el mismo tipo de patrón de distribución. Según lo que se observa en los diagramas de polos y de densidad, la muestra 2, por ejemplo, debiera situarse en el campo de las coronas y no tan alejada de las muestras 14 y 16, sino próxima a éstas debido a su parecido. Pero hay una gran diferencia entre la muestra 2 y la 14 y 16 que explica esto. En la 2 hay un máximo prominente según E_1 del que carecen las otras. Esto significa que, según la estadística de Bingham, las muestras 14 y 16 aparecen como coronas, mientras que la 2 debe necesariamente aparecer en el campo de las distribuciones en máximos.

La muestra 2 pasa a la 4 paralelamente al eje ordenadas, adentrándose en el campo de las coronas y reduciéndose la intensidad de la fábrica, la cual vuelve a aumentar a partir de la muestra 7 hasta la 16. Todo esto también se observa cualitativamente en los diagramas de densidad. Por lo tanto, se deduce que en este caso las proyecciones el gráfico de Woodcock son más fieles a los rasgos visibles en los diagramas de densidad. La muestra 14 no sólo representa un cambio en la forma de la distribución hacia un caso muy claro de corona, sino que aumenta muy significativamente la intensidad de la fábrica para volver a disminuir en el caso de la muestra 15, y volver a aumentar, aunque muy ligeramente, para la 16. Dicha muestra 15 representa un caso claro de distribución intermedia entre la de 11 y la 14.

- Ejes Y

Las muestras 7 y 14 caen en el campo de los máximos cuando debieran situarse, según sus diagramas de densidad, en el campo de las coronas junto con el resto de las muestras del corte. La explicación de este hecho reside en que consisten en la combinación de, al menos, dos coronas distintas, cosa que no se contempla en la estadística de Bingham. La combinación de coronas perpendiculares origina una distribución que, tratada con la estadística de Bingham, recuerda a la de los máximos. Además, la muestra 14 presenta un patrón de fábrica, según muestra su diagrama de densidad, más próximo a la 2 que el lugar que ocupa respecto a ella en el gráfico de Woodcock. La muestra 2, junto con la 16, es la que presenta la mayor intensidad de fábrica (véase su diagrama de densidad) y, sin embargo, esa característica no queda manifiesta tampoco en Woodcock debido a la presencia de un máximo según el autovector menor $\bar{t}_3$ (ó el eje E_2).

- Ejes Z

En este caso, el gráfico de Woodcock es más congruente con los patrones de los diagramas de densidad. Según aquél, las muestras 2, 4, 14, 15 y 16 se sitúan en el campo de los máximos. No obstante, las muestras 2 y 14 debieran localizarse en el campo de las coronas. Como en el caso descrito antes, ambas muestras consisten en dos coronas cruzadas a 90° , caso que no se contempla en la estadística de Bingham. Es por ello que el resultado estadístico es una representación de estas muestras en el campo de los máximos y no en el de las coronas. Se propone, por tanto, que el campo de los máximos del diagrama de Woodcock pase a ser denominado, para el caso de las fábricas de plagioclasas, “campo de los máximos sencillos y de las coronas cruzadas”. Alternativamente, al campo de las coronas se le podría denominar “campo de las coronas y de los dobles máximos”. La intensidad de la fábrica aumenta de techo a muro, excepto en el caso de la muestra 7, que representa un descenso importante de esta variable con respecto a las demás muestras.

En resumen: no hay que esperar un ajuste perfecto entre cada diagrama de densidad y su proyección en el diagrama de Woodcock (aunque casi todas las muestras son explicables desde el punto de vista estadístico), pero sí se pueden observar patrones de variación bastante sistemáticos de una muestra a otra y para los distintos elementos cristalográficos. Hay que entender que el diagrama de Woodcock está pensado y diseñado para describir la forma de distribuciones sencillas, del tipo de las de Bingham. Cuando se aplica a muestras que consisten en la combinación de máximos y/o coronas tienen que producirse, necesariamente, diferencias entre lo que se observa en los diagramas de densidad y su proyección en Woodcock. Aún así, estamos convencidos de que es de mucha utilidad y que muestra cosas que no se aprecian a simple vista en los diagramas de densidad. En concreto, la interpretación más general de los diagramas según se ve en la fig.4.20, es que la intensidad de la fábrica disminuye al disminuir la temperatura en la zona no afectada por la zona de cizalla Suribérica. En la parte central de las metabasitas la fábrica fluctúa en su forma pero no en su intensidad y, finalmente, al aumentar la deformación en dicha zona de cizalla, aumenta también fuertemente la intensidad de la fábrica. Ahora ya, dependiendo de los elementos cristalográficos considerados, la evolución de techo a muro puede describirse de manera diferenciada, tal como se ha hecho, pero siempre según un patrón similar. Salvando la muestra 16, que representa un cambio notable tanto en la forma como en la intensidad de la fábrica para todos los elementos cristalográficos, hay dos tipos básicos de variación espacial de la fábrica, tal y como se aprecia en los diagramas de Woodcock:

- Tipo 1: variaciones en dirección subparalela a la línea divisoria de campos $K=1$. Este es el tipo que caracteriza la variación de elementos como $[001]$, $\perp[100]/(010)$, (001) y, quizás, los ejes Z.

- Tipo 2: variaciones en dirección subperpendicular a la línea $K=1$. Este patrón es el mostrado por todos el resto de elementos cristalográficos, con excepción de $(0\bar{2}1)$, en el que las variaciones de la fábrica de unas muestras a otras son muy escasas.

El tipo 1 implica que cambia la intensidad de la fábrica sin modificarse su geometría, patrón o diseño. Por el contrario, en el tipo 2 las fluctuaciones en la intensidad de la fábrica son escasas, aunque ésta cambia fuertemente de geometría al pasar de una muestra a otra. Este segundo tipo es, con mucho, el más abundante y generalizado, y puede ser propuesto como el modelo característico de variación de las fábricas cristalográficas de plagioclasas en el corte de Almonaster la Real la Real. Si tomamos como referencia la fábrica del elemento (010), puede observarse que el paso o transición de la muestra 2 (campo de coronas en el diagrama de Woodcock) a la 4 (campo de máximos en dicho diagrama) se produce por la desaparición de la corona incompleta de tipo I_1 , aunque se preserve la corona I_2 , que produce la representación estadística en máximos. La corona I_1 vuelve a reconstruirse, aunque con otra orientación, en la muestra 7. Este tipo de transiciones de fábrica serán descritas con más detalle en el capítulo de interpretación y discusión de los resultados. Baste aquí con señalar que tanto la temperatura como la intensidad de la deformación deben ser factores fundamentales en la activación de tales transiciones. Por su parte, el elemento [001] consiste, para casi todas las muestras, en una corona sencilla de tipo I_1 que simplemente cambia de posición de una muestra a otra. Este es el origen del tipo 1 de variaciones de fábrica, mucho menos comunes que el tipo 2, pero de notable interés para la interpretación de la fábrica.

4.2.7. Gráficos SD (*Strength* frente a Distancia)

Cabe esperar que en estos gráficos se observen las mismas similitudes entre diferentes elementos cristalográficos, al igual que sucedió en los diagramas de densidad y de Woodcock. Es el caso, una vez más, de los siguientes cuatro grupos: $\perp [100]$ y (001); [010], (010) y (021); [100] y $(\bar{2}01)$; $\perp [001]$ y (100). En cuanto a los diagramas de S (*Strength*) frente a la distancia, dentro de la lámina anfibolítica (fig.4.18a), son muy similares (por no decir que casi iguales) a los de S_u frente a la distancia (fig.4.21), por lo que podrían comentarse conjuntamente, aunque aquí los trataremos por separado.

- $\perp [100]/(010)$ y (001)

Se observa un aumento muy significativo en la intensidad de la orientación preferente de la fábrica de la muestra 2 a la muestra 4, a pesar de que esta última se encuentra por debajo en la serie. Dicha intensidad disminuye hacia la parte media de la lámina de las metabasitas (muestras 7 y 11) y vuelve a aumentar hacia muro (muestras 14, 15 y 16), siendo la muestra 15 una excepción ya que en ella disminuye ligeramente el grado de orientación preferente respecto a las muestras supra y subyacente.

- [010], (010) y (021)

En líneas generales, se aprecia un aumento progresivo en la orientación preferente de techo a muro de las metabasitas, aunque en los casos de las muestras 7 y 14 se produce justamente lo contrario, un ligero descenso en la intensidad de la orientación, sobre todo para la 7 en [010].

- [100] y ($\bar{2}$ 01)

Para ambos elementos se observa el mismo patrón, una tendencia hacia una orientación preferente más marcada de techo a muro, con una clara excepción en la muestra 7 que se caracteriza por lo contrario.

- $\perp$ [001]/(010) y (100)

Se observa lo mismo que en (c), pero en este caso la muestra 15, además de la 7, presenta también un descenso en la intensidad de la fábrica. Salvando estas excepciones, ocurre como en los casos anteriores, es decir, un aumento de la orientación de la fábrica hacia muro, sobre todo en lo que concierne a la muestra 16.

- [001]

Se aprecia un descenso en la orientación preferente de la fábrica hacia la parte media de la serie de las anfíbolitas (muestras 7, 11 y 14) y un aumento hacia techo y muro. Aunque hacia techo cabe destacar, una vez más, que la fábrica de la muestra 2 se encuentra peor definida que la de la muestra 4 a pesar de encontrarse por encima en la serie.

- (0 $\bar{2}$ 1)

Este es el primer caso en el que la muestra 2 presenta una orientación preferente más marcada que la de la muestra 4. Se observa un aumento progresivo de la intensidad de la fábrica hacia muro de la serie, con una clara excepción en la muestra 15 en la que disminuye notablemente para volver a aumentar significativamente hacia la muestra 16.

- (110)

Las cuatro primeras muestras (2, 4, 7 y 11), así como la muestra 15, presentan una intensidad de fábrica muy similar, produciéndose un aumento considerable de esta variable con respecto a la muestra 14 y, sobre todo, respecto en la 16. Es por ello que la muestra 15 supone un cambio o un *quiebro* significativo en la evolución de las trayectorias de intensidad de fábrica hacia el muro de la serie.

- ($1\bar{1}$ 0)

La evolución que se observa en este elemento no es tan clara como en los elementos anteriores. De la muestra 4 a la 7 disminuye notablemente la intensidad de la orientación preferente de la fábrica. Ésta vuelve a aumentar hasta llegar a la muestra 14, a partir de la cual disminuye para el caso de la

muestra 15 y aumenta nuevamente para la muestra 16. Es decir, la mayor intensidad de fábrica se observa para las muestras 4, 14 y 16.

- Ejes X

Al igual que en el caso de $(0\bar{2}1)$, los ejes Y y los Z, éste es otro caso en el que la muestra 2 presenta una intensidad de fábrica mayor que la muestra situada por debajo (la 4). Este fenómeno sólo se produce en cuatro de los dieciséis elementos cristalográficos posibles. A partir de la muestra 4 aumenta progresivamente, y de forma lineal, la orientación cristalográfica hacia muro, siendo el caso de la muestra 15, nuevamente, un punto de inflexión o *quiebro* hacia un valor menor de S, para volver a aumentar en la muestra 16.

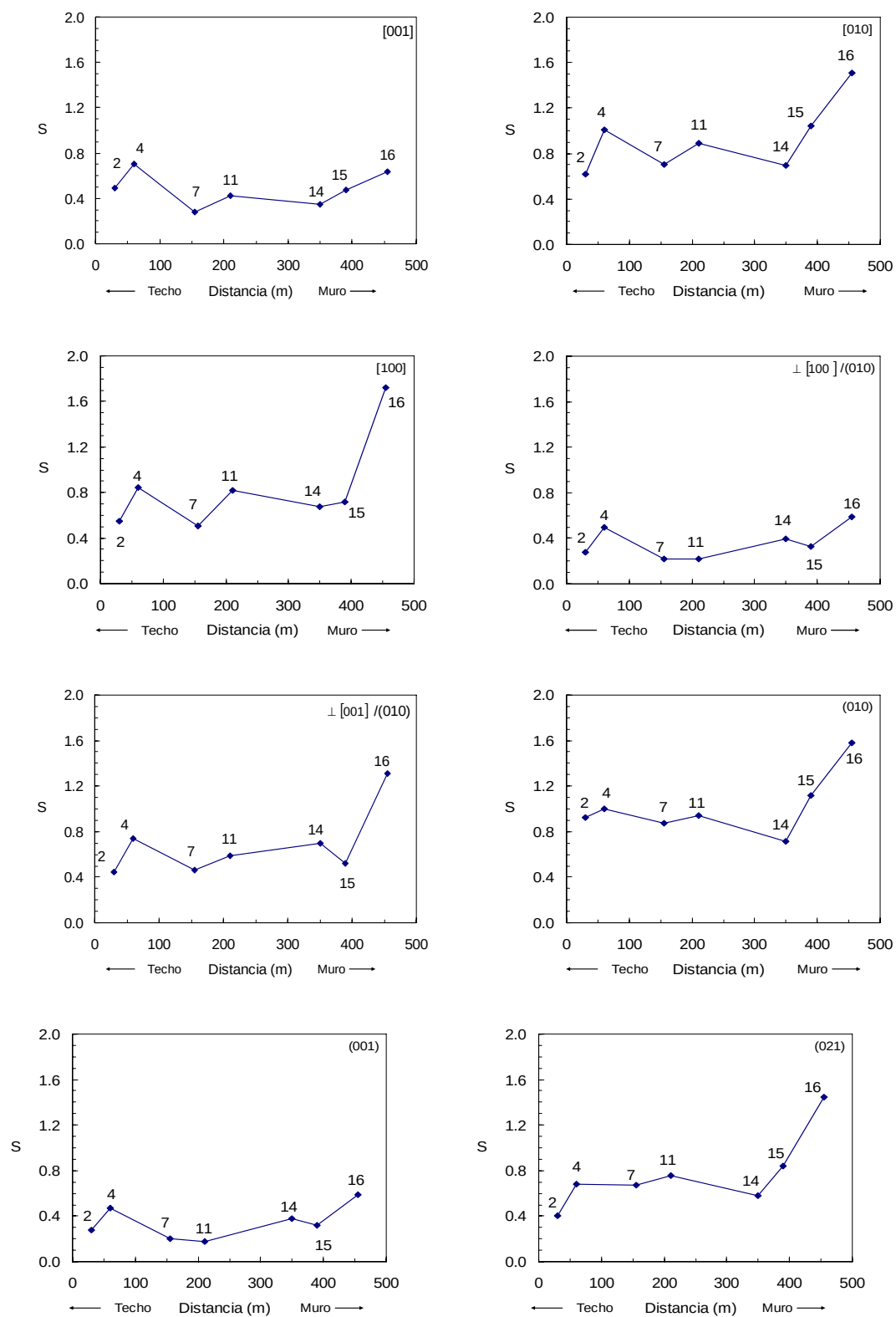
- Ejes Y

La intensidad de la fábrica desciende hacia la parte media de la serie y aumenta hacia techo y, muy significativamente, hacia muro. La muestra 15 vuelve a suponer un punto de inflexión, aunque no tan acusado como en el caso de los ejes X. Sin embargo, para el caso de los ejes Y la muestra 16 supone un aumento muy importante en su orientación cristalográfica preferente respecto a lo que sucedía en los ejes X.

- Ejes Z

La intensidad de la fábrica aumenta hacia muro de la serie, aunque las muestras 4 y 7 suponen un descenso. A partir de esta última vuelve a aumentar hacia muro, sobre todo para las dos últimas muestras de la serie, la 15 y 16. A diferencia de los ejes X e Y, el patrón de los ejes Z para la muestra 15 es totalmente diferente y representa un aumento de la intensidad de su fábrica y no un descenso.

Como resumen, se puede decir que sólo en cuatro elementos cristalográficos ($(0\bar{2}1)$, ejes X, ejes Y y ejes Z) de los dieciséis, la muestra 2 presenta una intensidad de fábrica mayor que en la muestra situada inmediatamente por debajo (muestra 4). En el resto de los elementos ocurre justamente lo contrario. También es importante destacar que la muestra 15 representa un punto de inflexión importante en la evolución de los elementos $\perp [001]$, $\perp [100]$, (001) , $(0\bar{2}1)$, (100) , (110) , $(1\bar{1}0)$, ejes X y ejes Y, en cuanto a que supone un descenso en la intensidad de la orientación cristalográfica preferente respecto a las muestras inmediatamente anterior y posterior.



(continúa)

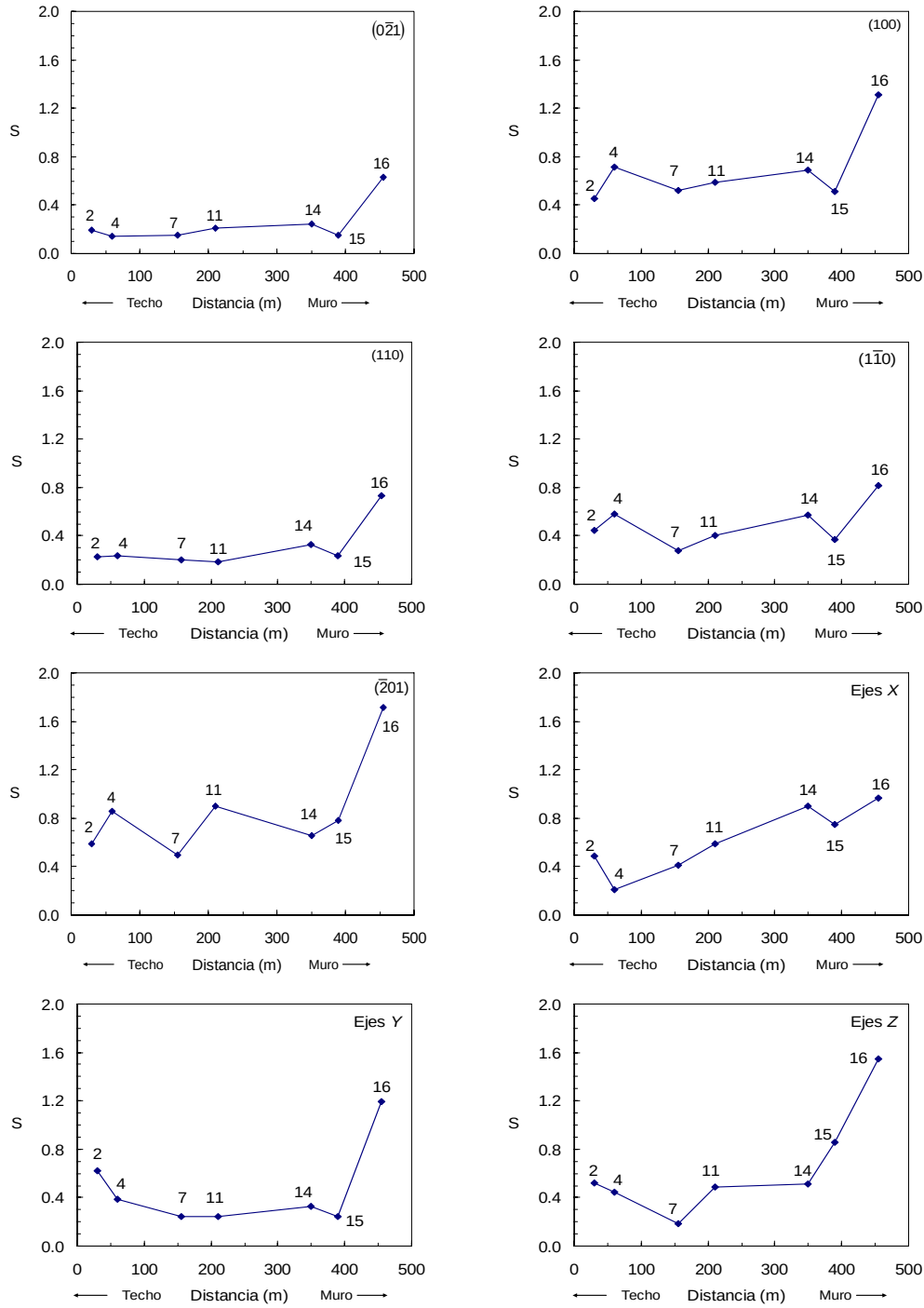


Fig.4.21. (continuación). Gráficos S (Strength) frente a la distancia, con la misma escala vertical para una mejor comparativa. En estos gráficos se observan las mismas similitudes que el los diagramas de densidad y los de Woodcock. Es el caso de los siguientes cuatro grupos: (a) $\perp[100]$ y (001), (b) $[010]$, (010) y (021), (c) $[100]$ y $(\bar{2}01)$, y (d) $\perp[001]$ y (100). Estos gráficos son muy similares, prácticamente iguales, a los de Su frente a la distancia (fig.4.21). Ver texto para explicación.

Para el resto de elementos cristalográficos la muestra 15 presenta una evolución contraria. Esto puede deberse a que dicha muestra correspondería a una zona de metabasitas menos afectada por la ZCS que las muestras 14 y 16. De ser así, las características de su fábrica cristalográficas serían fácilmente comprensibles, ya que se parecería más a la muestra 7 que a la 14 ó 16.

Haciendo también un gráfico de S (*Strenght*) frente a la temperatura (fig.4.22) observamos que es muy similar, prácticamente igual, al de S_u frente a la temperatura (fig.4.17a). Resulta claro que S desciende con el descenso de la temperatura en la mitad superior de la lámina de metabasitas, y aumenta con el incremento de la deformación dentro de la ZCS. En líneas generales, se observa que todos los elementos presentan, conjuntamente, un patrón en forma de *artesa* o *fondo de barco*. Y este patrón puede verse también en el gráfico donde se representa S (*Strength*) frente a la distancia (fig.4.23). Haciendo referencia al primero de los gráficos, en el que sólo se representan las muestras para las que se tienen datos de temperatura (2, 4, 7 y 15), se observa también un patrón en *artesa*. En líneas generales, la intensidad de fábrica desciende con el descenso de la temperatura en la mitad superior de la lámina de metabasitas, desde los 826°C de la muestra 4 hasta los 727°C de la muestra 7.

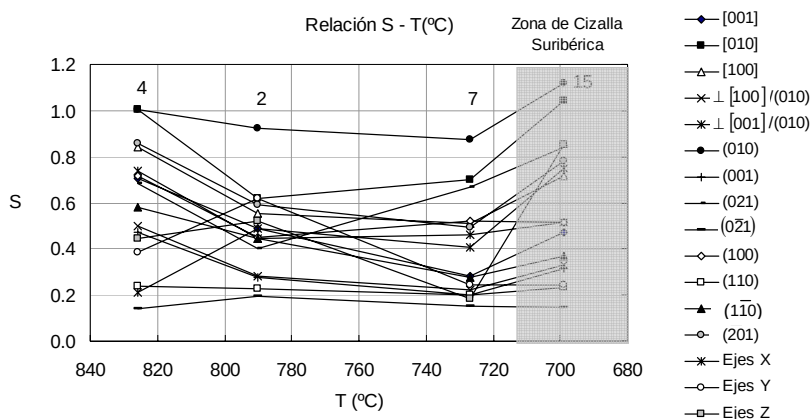


Fig.4.22. S (*Strength*) frente a la temperatura para las muestras 2, 4, 7 y 15, indicando la influencia de la ZCS. Este gráfico es muy similar al de S_u frente a la temperatura. El patrón es en *artesa* y los valores mayores de S también corresponden a [010] y (010). Se observa un descenso de la intensidad de la fábrica de la muestra 4 hacia la muestra 2 para todos los elementos, excepto para los ejes X e Y para los cuales aumenta. En general, S disminuye con la temperatura excepto en la ZCS (muestra 15) en donde se registran las temperaturas más bajas.

La intensidad de la fábrica aumenta, sin embargo, para la muestra 15, a pesar de haberse visto sometida a las temperaturas más bajas (699°C) de las presentadas en el perfil de la fig.4.22. Esto es debido al efecto de un factor contrario al del descenso de la temperatura: la intensidad de la deformación. La muestra 15 se encuentra dentro de la ZCS, y aunque no ha sufrido la transformación textural de las muestras adyacentes (11, 14 y 16), probablemente porque la intensidad de la

deformación sufrida ha sido mucho menor, su fábrica cristalográfica se ha reforzado en comparación con la de las muestras situadas fuera de la zona de cizalla.

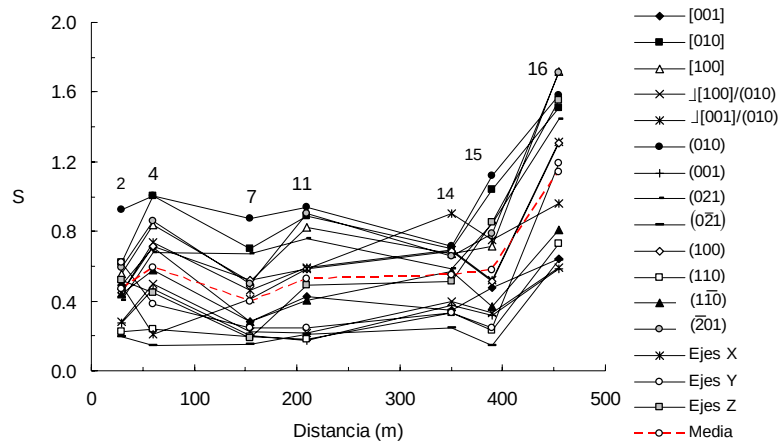


Fig.4.23. S (Strength) frente a la distancia, con la media aritmética indicada en trazo discontinuo. La intensidad de la orientación cristalográfica de las fábricas aumenta, sobre todo, hacia muro de la serie de las metabasitas (muestras 15 y 16). Ver texto para explicación.

Respecto al segundo de los gráficos (S frente a distancia, fig.4.23) la intensidad de la orientación cristalográfica de las fábricas aumenta conforme se hace mayor S , es decir, de la muestra 2 a la 4. Desciende para la muestra 7 y vuelve a aumentar hacia la 11. Desde ésta observamos un ascenso y/o descenso, indistintamente según qué elemento cristalográfico se considere, hacia la muestra 14 (por ejemplo, S descende para $[001]$, $[100]$, (010) y (201) , y aumenta para $(1\bar{1}0)$ y los ejes X, entre otros casos). Desde la muestra 14 y en dirección al muro de la serie de las metabasitas (muestras 15 y 16) aumenta nuevamente, de forma generalizada, la intensidad de la fábrica. Esto último lo explicaríamos de la misma manera que para el caso de S frente a la temperatura, es decir, las muestras 15 y 16 se encuentran dentro de la ZCS y probablemente debido a que la intensidad de la deformación que han sufrido ha sido mucho menor, su fábrica cristalográfica se ha reforzado en comparación con la de las muestras situadas fuera de la zona de cizalla.

4.2.8. Gráficos S_u , An/n y S (valores medios y desviación estándar) frente a la distancia

Con objeto de reforzar la descripción que se ha hecho de la variación de los estadísticos que caracteriza la intensidad de la fábrica con respecto a la distancia dentro de la lámina de metabasitas, se presentan en este apartado los diagramas de variación de los valores medios de estas variables para todos los elementos cristalográficos analizados. Por consiguiente, cuando se hace referencia a los

valores de los diferentes estadísticos, conviene aclarar que se está teniendo en cuenta, en cada caso, la media aritmética (ver apartado 3.6.7). Esta media se representa por una línea negra gruesa que une las diferentes muestras (círculos huecos). Las líneas verticales que parten de cada círculo hueco representan la magnitud de la desviación estándar en cada una de ellas. La zona sombreada recoge la dispersión en el diagrama de todos los elementos cristalográficos estudiados. Veamos cada caso por separado:

Estadístico de Bingham (S_u)

Los valores del estadístico S_u se mantienen bastante constantes para todas las muestras del corte, excepto para la última de ellas (la 16), es decir, la situada a muro de la serie de las metabasitas y fuertemente afectada por la zona de cizalla Suribérica (ZCS). Para el resto de las muestras, los valores oscilan entre 26.76 para la muestra 7, y 56.27 para la muestra 4 (fig.4.24).

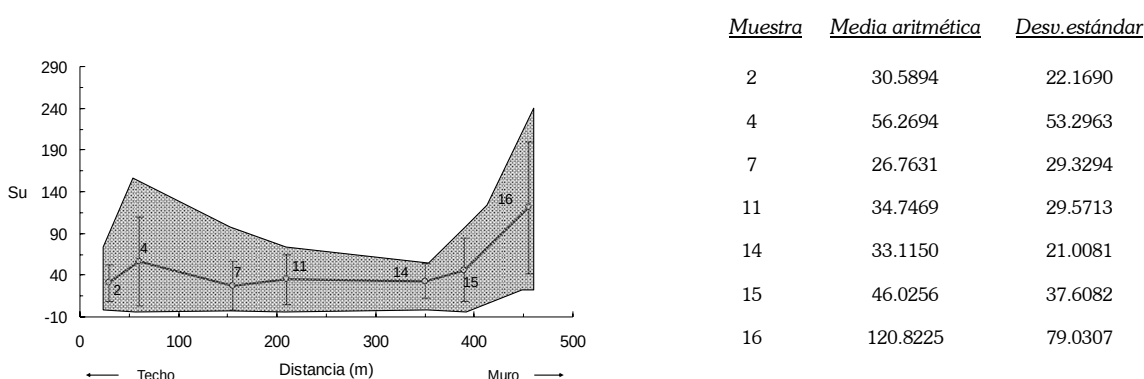


Fig.4.24. Gráfico de valores medios (media aritmética) y desviación estándar de S_u frente a la distancia. La media aritmética se representa por la línea continua que une las muestras (círculos huecos). Las líneas verticales representan la magnitud de la desviación estándar en cada una de ellas. La zona sombreada recoge la dispersión en el diagrama de todos los elementos cristalográficos estudiados. A la derecha, una tabla con los valores representados. Ver texto.

En líneas generales, y observando la zona sombreada, se aprecia claramente que la uniformidad aumenta para la parte media de la serie y decrece, sin embargo, para las muestras 4 y 16, en cuyos casos la parte sombreada dibuja unos picos ascendentes y la desviación estándar es mayor que en el resto de muestras (53.30 y 79.03, respectivamente). Es destacable que la muestra situada a muro (la 16) presenta una fuerte intensidad de su fábrica en cuanto al grado de orientación cristalográfica preferente, alejándose considerablemente de la uniformidad hasta alcanzar un valor del estadístico de 120.82.

Estadístico de Ajne normalizado (An/n)

La uniformidad según el test de Ajne se mantiene bastante constante a lo largo de todo el perfil, observándose una ligera tendencia a alejarse de este patrón en las muestras 15 y 16 (fig.4.25). La uniformidad es mayor para la parte media de la serie, en donde oscila entre 0.0993 para la muestra 7 y 0.0990 para la 11. Esa uniformidad se hace menor, sin embargo, hacia techo (1.1009 para las muestras 2 y 4) y muro (1.1030 para la muestra 15 y 1.1061 para la 16). En líneas generales, el gráfico de variación espacial de An/n se parece bastante al de Su , aunque se mantiene más constante a lo largo del perfil, sin los cambios que experimenta Su , por ejemplo, en las muestras 4 y 7. Al igual que en el estadístico Su , la evolución es siempre hacia una menor intensidad de fábrica y, por tanto, a una menor orientación preferente hacia la parte media de la serie de las metabasitas.

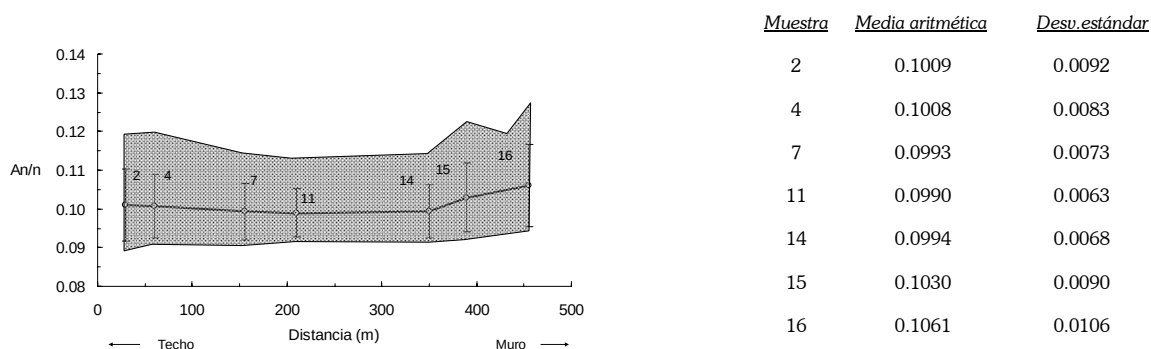


Fig. 4.25. Gráfico de valores medios (media aritmética) y desviación estándar de An/n frente a la distancia. La media aritmética se representa por la línea continua que une las muestras (círculos huecos). Las líneas verticales representan la magnitud de la desviación estándar en cada una de ellas. La zona sombreada recoge la dispersión en el diagrama de todos los elementos cristalográficos estudiados. A la derecha, una tabla con los valores representados. Ver texto.

Intensidad de fábrica o *Strenght* (S)

En este caso lo que estamos midiendo es la distancia de cada muestra al origen del diagrama de Woodcock (1977), de manera que cuando aumenta S es porque la muestra se aleja del origen de coordenadas y, por lo tanto, de la uniformidad. En estos casos se interpreta que existe una dirección media preferente en el patrón de distribución de la fábrica. La distancia al origen en Woodcock, también llamada *strength*, es un parámetro de la intensidad de la fábrica o, lo que es lo mismo, de su grado de orientación cristalográfica preferente.

En el gráfico de S frente a distancia (fig.4.26), la curva de la media aritmética es igual a la de Su y sigue exactamente la misma tendencia. Sólo se observan diferencias significativas en el área sombreada, la cual se mantiene bastante uniforme para el caso de An/n hasta la muestra 15, a partir de la cual se ve una clara tendencia ascendente hacia la muestra 16. No obstante, no se observa el pico ascendente de la muestra 7 como en el gráfico de Su .

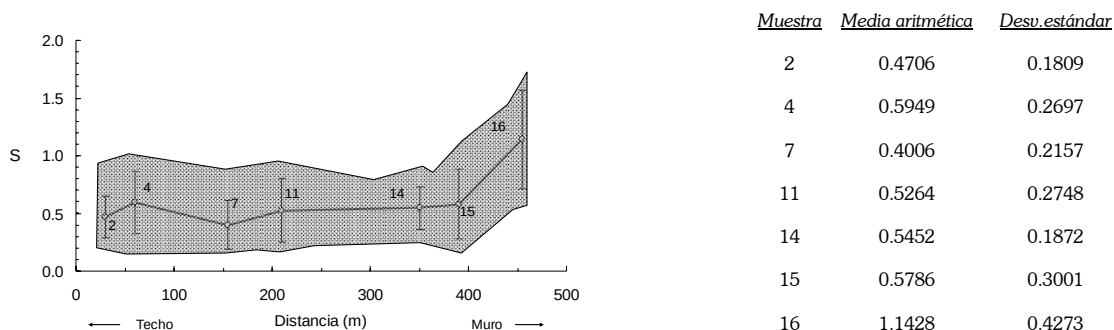


Fig.4.26. Gráfico de los valores medios (media aritmética) y la desviación estándar de S frente a la distancia. La media aritmética se representa por la línea continua que une las muestras (círculos huecos). Las líneas verticales representan la magnitud de la desviación estándar en cada una de ellas. La zona sombreada recoge la dispersión en el diagrama de todos los elementos cristalográficos estudiados. A la derecha, una tabla con los valores representados. Ver texto.

En cualquiera de los tres casos, la evolución de las curvas de las medias aritméticas y las áreas sombreadas presentan sistemáticamente el mismo patrón: hacia la parte media de la serie de las metabasitas se produce un incremento de la uniformidad y, por lo tanto, un descenso en el grado de orientación cristalográfica preferente de la fábrica de las muestras. Sin embargo, hacia techo y muro de la serie, sobre todo hacia muro, ocurre precisamente todo lo contrario, es decir, en el caso de la muestra 16, que es la más fuertemente deformada por la Zona de Cizalla Suribérica (ZCS), ésta es la que se aleja más de la uniformidad y la que presenta una OCP mejor definida. En líneas generales, y como ya se ha repetido en varias ocasiones, la forma típica de las zonas sombreadas es en *artesa* o *fondo de barco*. Teniendo presente que hacia techo aumenta la temperatura y la deformación de la primera fase que afectó a la pila de metabasitas, y hacia muro aumenta la deformación de la segunda fase (ZCS), es posible concluir que el aumento en el grado de orientación preferente de las plagioclasas en el corte de Almonaster la Real, responde a un incremento en la temperatura y/o en la intensidad de la deformación.

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DEL CORTE DE VEREDAS

4.3.1. Planos de ajuste y frecuencia de maclado

Hacia el muro de las metabasitas va aumentando el porcentaje de plagioclasas que ajustan a ley de macla paralela o compleja respecto a las maclas de ley normal (fig.4.27), aunque dentro de ese patrón ascendente observamos un ligero descenso en las muestras 3 y 5. En el caso de la muestra 4, se produce un aumento espectacular del ajuste de los planos de macla de la ley paralela o compleja, a diferencia del resto de las muestras.

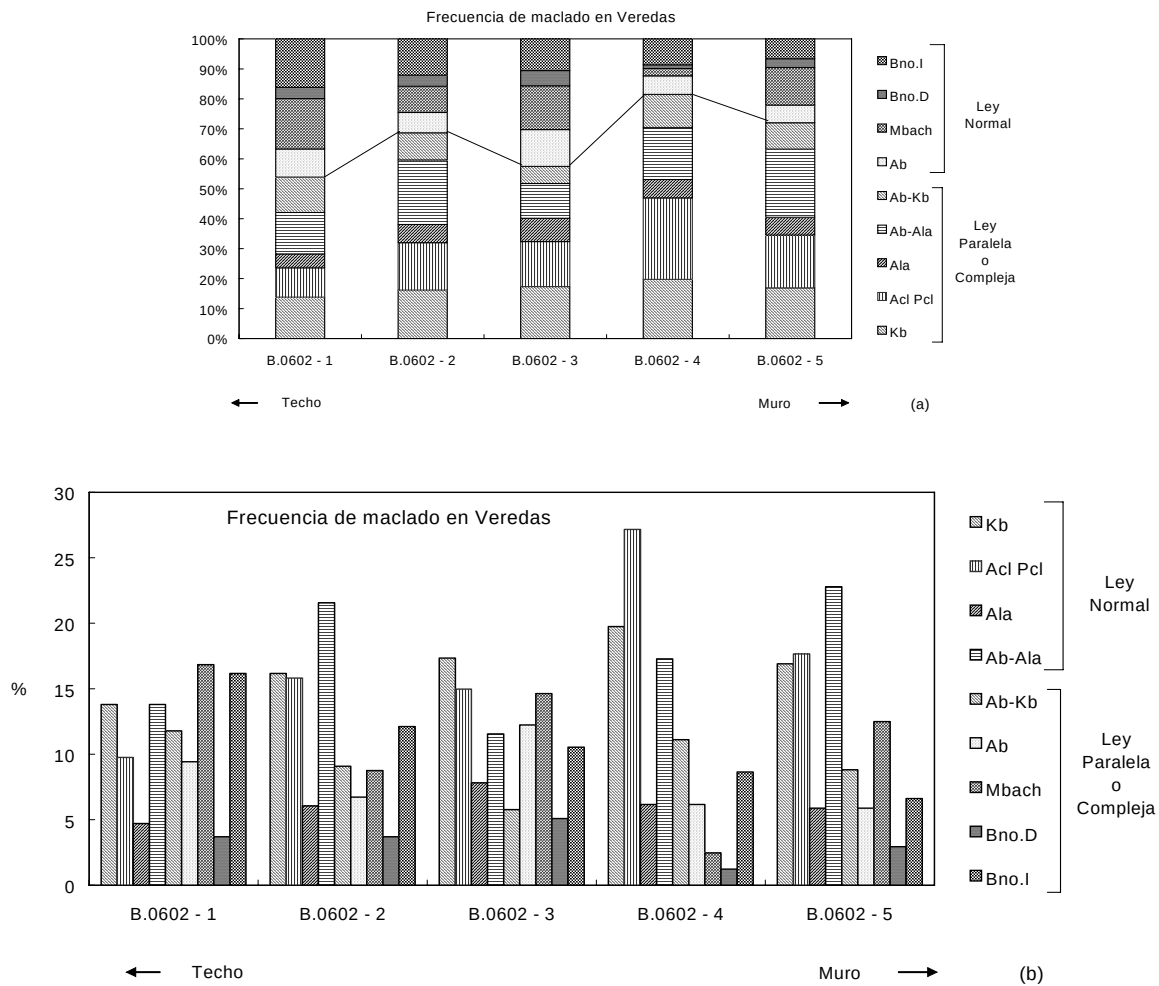


Fig.4.27. Frecuencia de maclado. (a) Diagrama de barras de porcentajes acumulados dónde se indican los dos tipos de leyes de maclas (normal y paralela o compleja) según la terminología de Burri et al. (1967). La línea continua que una las barras representa el límite entre ambas leyes de macla. (b) Diagrama de barras de porcentajes sencillos. Se observa el fuerte incremento de Aclina Periclina para la muestra 4, el descenso de Albita-Ala para las muestras 1 y 3, el descenso progresivo de Baveno izquierda de techo a muro y, finalmente, la baja frecuencia de las maclas de ley normal para la muestra 4 (ver Tabla IV.2). En el eje de abscisas de representan las

muestras y su proximidad hacia techo o muro de la serie. . Bno. I: Baveno izquierda, Bno. D: Baveno derecha, Mbach: Manebach; Ab: Albita, Ab-Kb: Albita-Carlsbad, Ab-Ala: Albita-Ala, Ala: Ala, Acl Pcl: Aclina Periclina, Kb: Carlsbad..

Dentro del grupo de maclas de ley paralela o compleja, las maclas de tipo Carlsbad, Aclina Periclina y Albita-Ala son las más comunes, como también ocurría en Almonaster la Real, mientras que Ala y Albita-Carlsbad son las menos frecuentes, representando en torno a un 15% del total (Tabla IV.2). Mientras que para Aclina Periclina se observa un aumento muy significativo para la muestra 4, ocurre algo similar para Albita-Ala en las muestras 2 y 5. En el caso de las maclas de ley normal, Baveno derecha es, con diferencia, la menos frecuente de la cuatro. Resulta muy significativo el descenso tan drástico, aunque progresivo, de techo a muro, del porcentaje de Baveno izquierda. De hecho, se pasa de un 16.16% en la muestra 1 a un 6.62% en la muestra 5. También observamos un descenso importante de Manebach para la muestra 4. Considerando cada tipo de macla por separado, sin tener en cuenta que correspondan a un tipo de ley u otra, las más frecuentes son Carlsbad, Albita-Ala y Albita-Periclina, y las menos frecuentes son Ala y Baveno derecha, como también pudimos observar en Almonaster la Real.

TABLA IV.2. Relación de muestras, números de granos medidos en cada una de ellas y los porcentajes de cada tipo de macla. Ver fig.4.2 para las abreviaturas empleadas para los diferentes tipos de las maclas. Se observa, en líneas generales, un aumento progresivo del porcentaje de leyes de maclas paralelas o complejas de techo a muro, igual que en Almonaster la Real, con un ligero descenso para las muestras 3 y 5. Ver fig.4.27 para las abreviaturas empleadas.

MUESTRAS	B.0602 - 1	B.0602 - 2	B.0602 - 3	B.0602 - 4	B.0602 - 5
Nº de granos	297	297	295	81	136
MACLAS	%	%	%	%	%
Kb	13.80	16.16	17.35	19.75	16.91
Acl Pcl	9.76	15.82	14.97	27.16	17.65
Ala	4.71	6.06	7.82	6.17	5.88
Ab-Ala	13.80	21.55	11.56	17.28	22.79
Ab-Kb	11.78	9.09	5.78	11.11	8.82
L.PARALELA ó C.	53.85	68.68	57.48	81.47	72.05
Ab	9.43	6.73	12.24	6.17	5.88
Mbach	16.84	8.75	14.63	2.47	12.5
Bno.D	3.70	3.70	5.10	1.23	2.94
Bno.I	16.16	12.12	10.54	8.64	6.62
L.NORMAL	46.13	31.30	42.51	18.51	27.94

Es importante señalar que el porcentaje de maclas de ley normal y de ley paralela o compleja es directamente proporcional a la temperatura de deformación¹. La muestra 1, por ejemplo, sufrió una temperatura mayor que la muestra 3 (827°C frente a 731°C). Si se proyectan los porcentajes de maclas de ley normal y ley paralela o compleja frente a la temperatura para aquellas muestras de las que se disponemos de una estimación de esta variable (fig.4.28a y 4.28b, respectivamente), se aprecia una correlación clara entre las leyes de macla y la temperatura de deformación. Para las maclas de ley normal, con el incremento de la temperatura se produce un aumento en el porcentaje de maclas de tipo Manebach y Baveno izquierda, mientras que para Albita y Baveno derecha ocurre lo contrario. Para el caso de ley de macla paralela o compleja ocurre algo similar, con el incremento de la temperatura se produce un aumento en los tipos de maclas Albita-Ala y Albita-Carlsbad y un descenso en Carlsbad, Aclina Periclina y Ala. Estos resultados parecen, a simple vista, contradictorios.

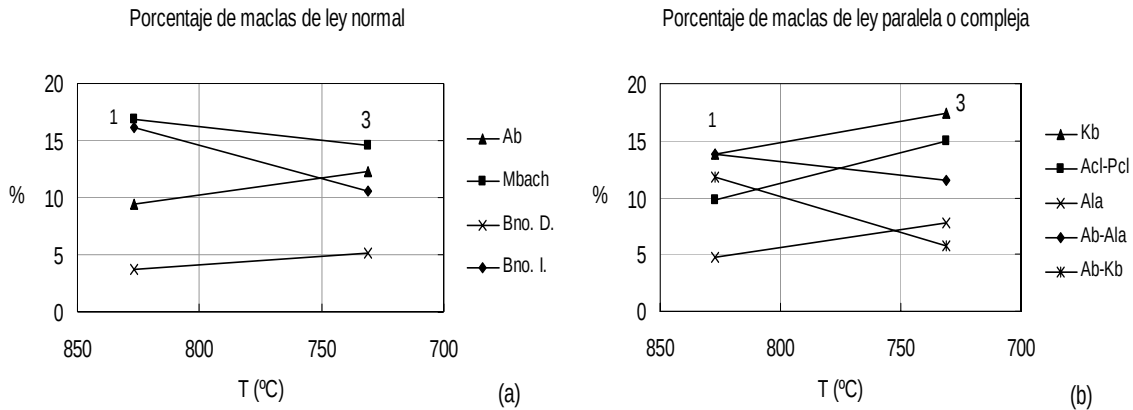


Fig.4.28. Porcentajes de tipos de maclas frente a la temperatura para las muestras 1 y 3. (a) Maclas de ley normal; el porcentaje de las maclas Manebach y Baveno izquierda aumenta con el incremento de la temperatura, lo contrario sucede para Albita y Baveno derecha. (b) Maclas de ley paralela o compleja; con el aumento de la temperatura también aumentan los porcentajes de las maclas Albita-Ala y Albita-Carlsbad y desciende, sin embargo, la abundancia de Carlsbad, Aclina Periclina y Ala. . Bno. I: Baveno izquierda, Bno. D: Baveno derecha, Mbach: Manebach; Ab: Albita, Ab-Kb: Albita-Carlsbad, Ab-Ala: Albita-Ala, Ala: Ala, Acl Pcl: Aclina Periclina, Kb: Carlsbad..

No obstante, hay que hacer hincapié en que las maclas de ley normal más comunes (Manebach y Baveno izquierda) se hacen menos abundantes al descender la temperatura, lo contrario de lo que sucede con las maclas de Carlsbad y Aclina Periclina, que se encuentran entre las más comunes de las de ley paralela o compleja. Si se suman los porcentajes relativos de cada tipo de macla se comprueba que, en efecto, las maclas de ley normal son más abundantes a alta temperatura (muestra 1, 46.13%), mientras que su proporción desciende con el descenso de ésta (muestra 3,

¹ Temperaturas calculadas con el geotermómetro Hb-Pl (Holland & Blundy, 1994) por Díaz Azpiroz (tesis, 2001). Ver tabla. III.1 (capítulo de metodología).

42.51%). Además, como en estos gráficos sólo se contemplan dos de las cinco muestras del corte de Veredas y ambas muestras son, precisamente, las que presentan una mayor igualdad entre los porcentajes de maclas de un tipo de ley y otra, es conveniente investigar también la variación en el resto de las muestras. En las muestras en las que se han estimado las mayores temperaturas de deformación (muestra 1: 827°C, muestra 3: 731°C; Díaz Azpiroz, 2001), Manebach excede a Albita-Ala como macla más frecuente. Sin embargo, considerando el total de las maclas, independientemente de la temperatura, ocurre lo contrario (ver Tabla IV.2). Si representamos la frecuencia de maclado según diagramas de dispersión de puntos unidos por líneas rectas (fig.4.29), veríamos que existen patrones de variación bastante similares entre diferentes tipos de maclas, con ligeras diferencias en la tendencia que presentan las muestras 2 y 4, que son precisamente aquellas para las que no se tienen datos de temperatura y que no han podido ser representadas en la fig.4.28. Si atendemos a la fig.4.29, vemos que las curvas de evolución de Albita, Ala y Baveno derecha son muy parecidas, con la única diferencia apreciable en la muestra 1 donde Albita aumenta a diferencia de los otros dos tipos mencionados. La curva Baveno izquierda se parece también a la de Baveno derecha, aunque se diferencia de ésta en la muestra 3 en la que aumenta Baveno derecha y disminuye Baveno izquierda. Para la curva de Carlsbad la tendencia es bastante estable, con una tendencia progresiva del aumento de su abundancia hacia muro de la serie de las metabasitas. Las curvas de Aclina-Periclina y Manebach son muy distintas, reflejando un patrón de evolución opuesto en cada muestra (es decir, aquella muestra donde aumenta un tipo de macla disminuye la otra y viceversa), al igual que ocurría en Almonaster la Real. De hecho, mientras para las muestras 3 y 5 la frecuencia de maclado de Aclina Periclina disminuye, la frecuencia de Manebach aumenta.

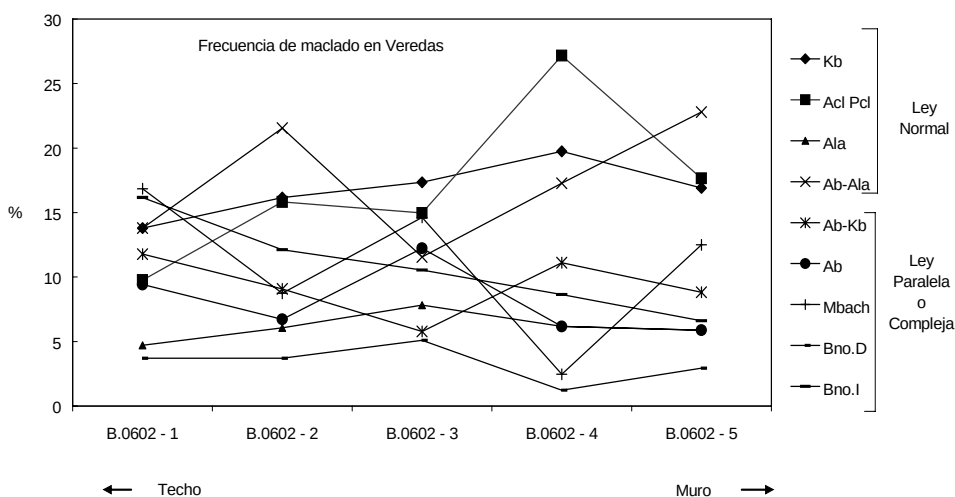


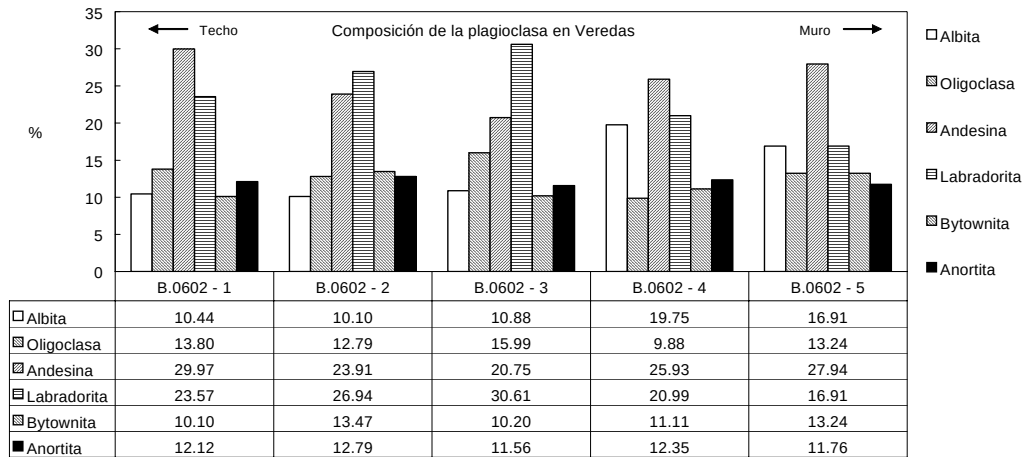
Fig.4.29. Frecuencia maclado. Representa lo mismo que la fig.27 pero según un diagrama de dispersión que puede resultar, según qué casos, más intuitivo que los diagramas de barras para apreciar las diferencias entre los patrones de evolución de techo a muro de los distintos tipos de maclas. En general, el porcentaje de todas las maclas aumenta hacia muro, con algunas excepciones (ver texto para explicación). En el caso de Carlsbad, Ala y Baveno derecha, los porcentajes se mantienen bastante constantes. El caso

contrario lo representa *Aclina Periclina* y *Manebach*, con fuertes variaciones a lo largo de todo el perfil y con tendencias totalmente opuestas para cada muestra. Bno. I: Baveno izquierda, Bno. D: Baveno derecha, Mbach: Manebach; Ab: Albita, Ab-Kb: Albita-Carlsbad, Ab-Ala: Albita-Ala, Ala: Ala, Acl Pcl: *Aclina Periclina*, Kb: Carlsbad..

En líneas generales, podemos terminar concluyendo que el tipo y porcentaje de planos de maclas de ajuste en Almonaster la Real y en Veredas es muy similar, sin llegar a observarse diferencias significativas en ambos cortes geológicos.

Composición de la plagioclasa

La composición de la plagioclasa se mantiene bastante constante a lo largo de todo el corte de Veredas, sobre todo en lo referente al término composicional anortítico (fig.4.30a y 4.30b). El porcentaje del término albitico aumenta considerablemente hacia muro (muestras 4 y 5), y la oligoclasa lo hace hacia la parte media de la serie (muestra 3). La andesina evoluciona de manera muy similar a la anortita, pero se hace mucho más patente el descenso de su porcentaje hacia la parte media de la serie, algo que, por el contrario, no se dejaba notar tanto en la anortita. La labradorita sigue una trayectoria similar a la oligoclasa, pero más acusada y se diferencia también de ésta en la muestra 5, donde disminuye el componente labradorítico y aumenta la oligoclasa. En cuanto a la bytownita, sigue un patrón contrario al de la oligoclasa y resulta ser más parecida a la andesina si no fuera por la muestra 1, en la que aumenta el porcentaje de andesina y disminuye el de bytownita.



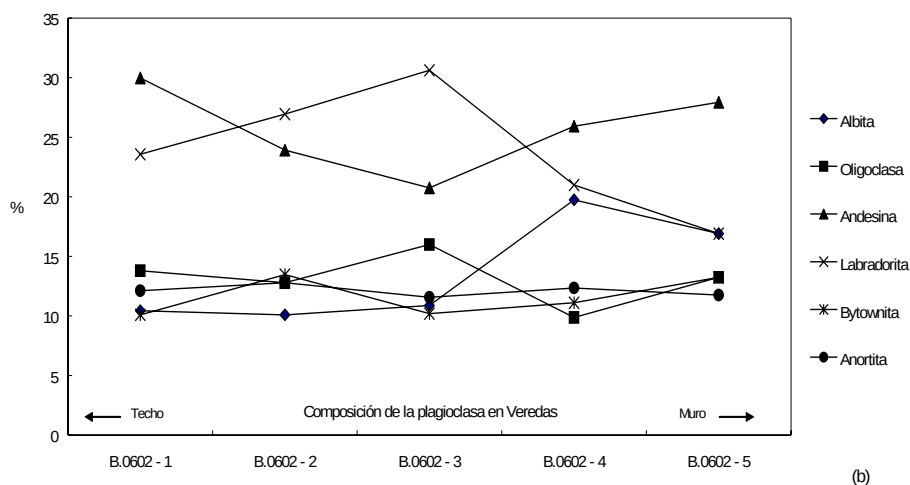


Fig.4.30. Frecuencia o porcentaje de abundancia de cada tipo de plagioclasa en las muestras estudiadas. (a) Diagrama de barras sencillo. (b) Diagrama de dispersión de puntos. Los gráficos reflejan los mismos resultados, el poner ambos es porque puede resultar más intuitivo uno u otro según las apreciaciones hechas en el texto. En (a) y (b) se observa que la andesina y labradorita son las composiciones más abundantes (igual que en Almonaster la Real). El resto de composiciones presentan una abundancia mucho menor y muy similar entre ellas, excepto el aumento de la oligoclasa en la muestra 3 y el de anortita en la muestra 5. Ver porcentajes en (a).

En líneas generales, se observa que aproximadamente en torno a un 50-55% de los granos de plagioclasas medidos presentan una composición que varía principalmente entre andesina y labradorita, tendiendo ligeramente hacia composiciones más andesínicas hacia techo y labradoríticas a muro (al igual que en Almonaster la Real). De todos modos, cabe destacar que las trayectorias de evolución de ambas curvas son totalmente opuestas (fig.4.30b). En aquellas muestras donde aumenta la labradorita (muestras 2 y 3), disminuye sin embargo la andesina y viceversa. Hacia la parte media-alta de la serie (muestras 1 a 3) la composición menos abundante es la albita. Sin embargo, ésta aumenta espectacularmente hacia muro (muestras 4 y 5) a expensas de la labradorita, que disminuye drásticamente. Hacia muro, las composiciones menos frecuentes son la oligoclasa, bytownita y anortita. La muestra 4 representa un punto de inflexión importante en la evolución de la mayoría de las curvas composicionales y quizás esto se deba, en parte, a que el número de datos (n) medidos en esta muestra es muy inferior al resto de las muestras del corte, lo cual implica claramente el efecto que tiene n en los resultados. La plagioclasa es ligeramente más albítica que anortítica a lo largo de todo el corte, sobre todo hacia muro de la serie (muestras 4 y 5). Este aspecto no resulta tan evidente, sin embargo, en Almonaster la Real.

Proyectando la composición de la plagioclasa frente a la temperatura (fig.4.31), se observa que los términos más frecuentes son la andesina y la labradorita, y los menos abundantes son la albita, bytownita y anortita, lo cual constata todo lo dicho al respecto anteriormente. Y también se observa que con la disminución de la temperatura aumenta el porcentaje de labradorita y disminuye el de andesina, al menos para las dos muestras para las que se dispone de datos de la temperatura del metamorfismo. Este resultado es diferente al observado en Almonaster la Real. Debe concluirse de

nuevo que el procedimiento de la platina universal, basado en la determinación selectiva de los granos de mayor tamaño (susceptibles de ser medidos), proporciona resultados válidos en líneas generales para la determinación de la composición de las plagioclasas, pero que no pueden ser utilizados en un estudio detallado de la química de estos minerales.

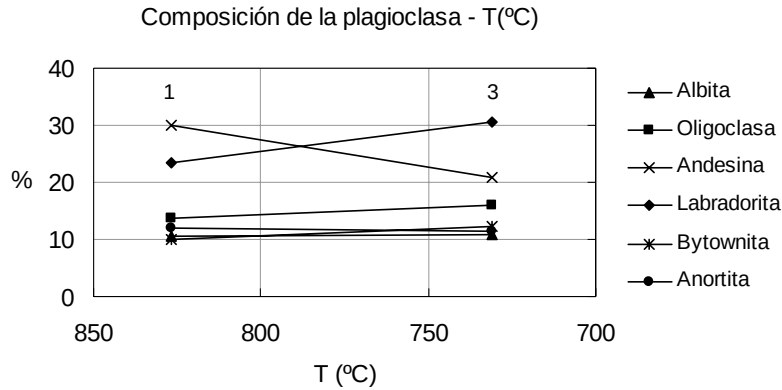


Fig.4.31. Porcentajes de los distintos tipos de plagioclasas frente a la temperatura para las muestras 1 y 3. Para todas las composiciones las abundancias se mantienen bastante constantes con el descenso de temperatura, excepto para la labradorita y la andesina que siguen patrones opuestos. En el primer caso aumenta con el descenso de la temperatura y en el segundo caso, disminuye con el descenso de la temperatura.

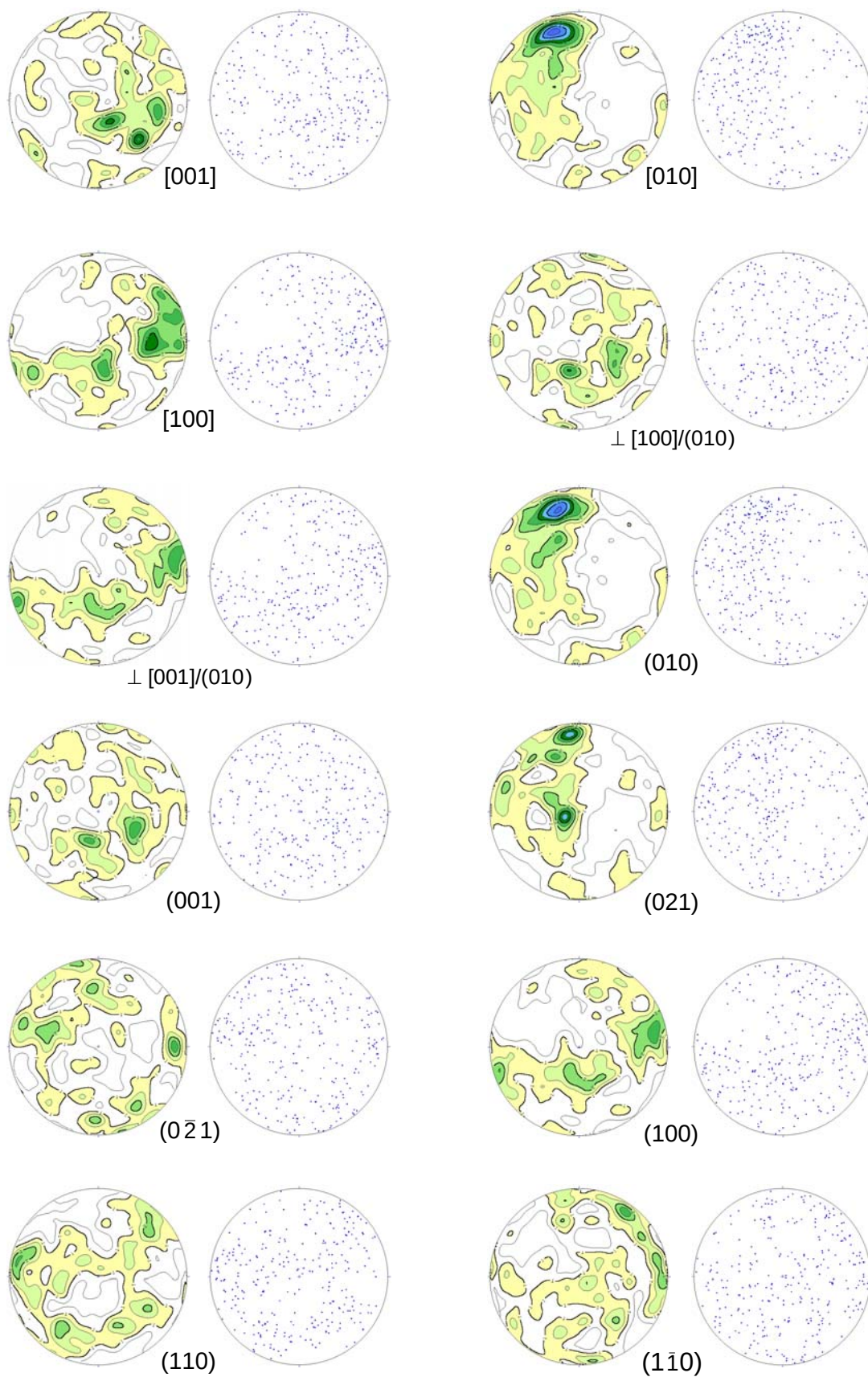
4.3.2. Descripción de los diagramas de densidad de polos de los elementos cristalográficos de la plagioclase

Para la representación estereográfica de polos y para la representación de los diagramas de densidad de los elementos cristalográficos de las muestras, se ha empleado la proyección equiareal en el hemisferio inferior. Hemos utilizado un intervalo de contornos de 0.5%, empezando por un primer intervalo de densidad del 1%. La foliación se ha situado en posición E-W y vertical, la lineación en posición horizontal, sobre el primitivo de la proyección, y el techo en el norte de la falsilla (fig.4.7b). Ver apéndice C4 para los autovectores a los que se hace referencia en la descripción de las distribuciones y, en general, para todos los de los elementos de las muestras estudiadas.

Muestra 1 (B.0602-1, fig.4.32)

- [001]. Distribución en máximos, con tres de ellos agrupados a bajo ángulo de la foliación y a alto de la lineación, muy cercanos a $\bar{t}_1$ ($50.1^\circ \rightarrow 102.5^\circ$).
- [010]. Caso intermedio entre corona incompleta de tipo I_1 y un único máximo muy bien definido y concentrado a alto ángulo de la foliación y lineación, próximo a $\bar{t}_1$ ($33.3^\circ \rightarrow 318.1^\circ$).

- [100]. Corona incompleta de tipo I_1 ligeramente oblicua a la traza del plano de foliación, con un máximo principal bastante estirado a bajo ángulo de la foliación y de la lineación, cercano a $\bar{t}_1$ ($32.7^\circ \rightarrow 77.6^\circ$), y un segundo máximo secundario subparalelo a la foliación y a 90° de la lineación, cercano a $\bar{t}_2$ ($39.3^\circ \rightarrow 199.3^\circ$). El polo de la corona se inclina suavemente en el cuadrante superior izquierdo de la proyección.
- $\perp[100]/(010)$. Se trata de una distribución bastante uniforme, con sólo dos máximos algo mejor desarrollados, cercanos al plano de foliación y perpendiculares a la lineación, y cercanos a $\bar{t}_1$ ($57.8^\circ \rightarrow 120.3^\circ$). Parece quedar definirse un anillo de tipo A_2 incompleto, con un ángulo de apertura elevado.
- $\perp[001]/(010)$. Es una distribución muy parecida a [100], con los máximos principales situados en la misma posición pero, en este caso, menos concentrados y también menos estirados.
- (010). Igual a [010].
- (001). Igual a $\perp[100]/(010)$.
- (021). Distribución en varios máximos aislados que se disponen formando un anillo de tipo I_2 con centro en $\bar{t}_1$ ($39.4^\circ \rightarrow 313.7^\circ$). Uno de los máximos se sitúa paralelo a la foliación y a perpendicular a la lineación; el otro se localiza a 90° del anterior, es decir, perpendicularmente a la foliación y a la lineación.



(continúa)

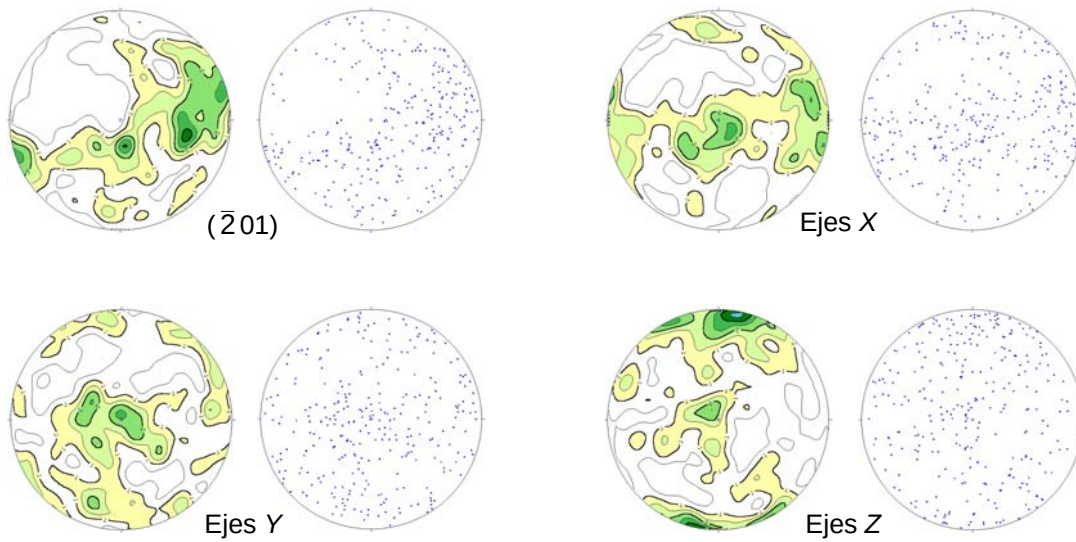


Fig.4.32 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 1 (B.0602-1). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 297 medidas. Área de contaje: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

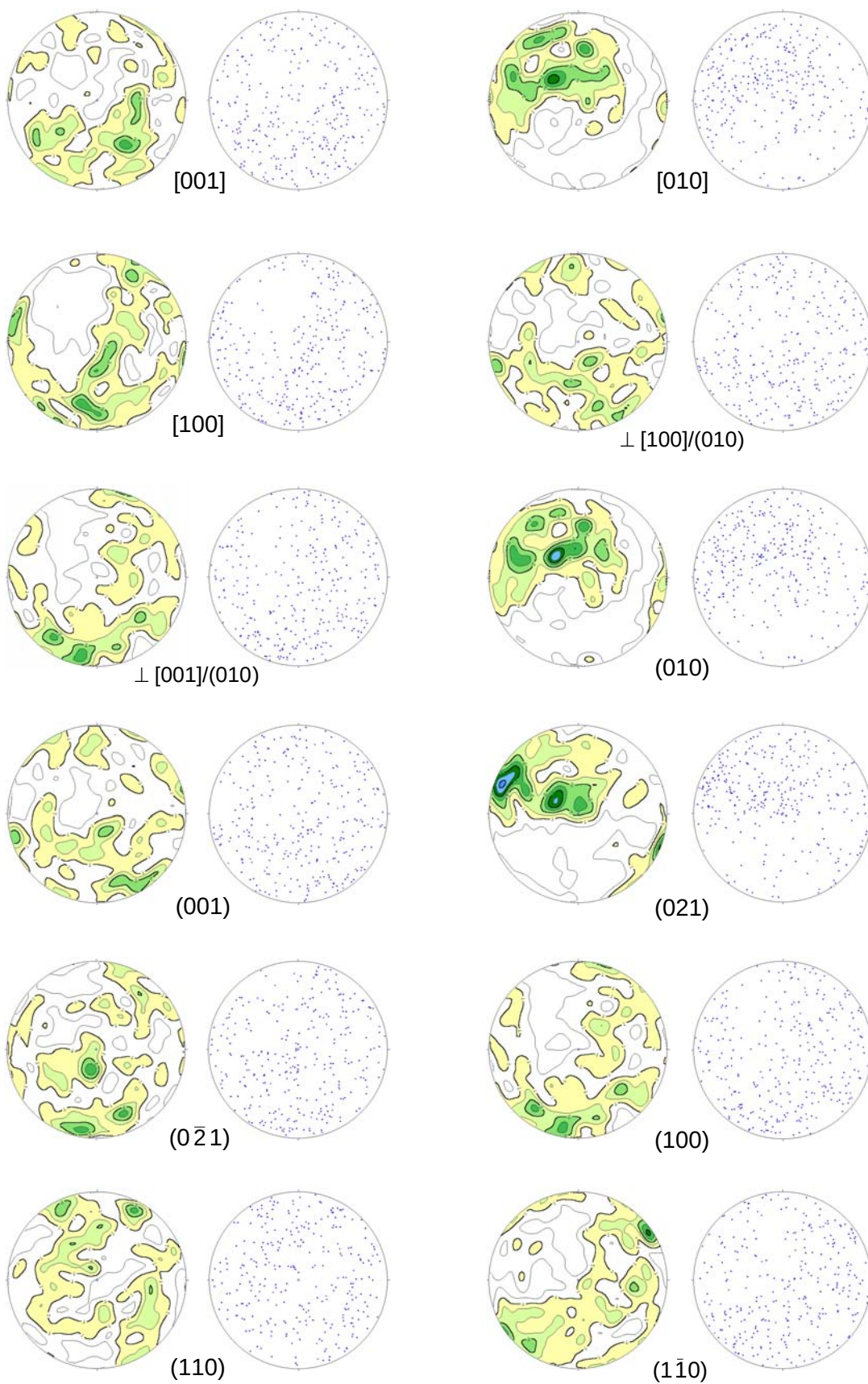
- $(0\bar{2}1)$. Distribución bastante uniforme que tiende a una corona incompleta de tipo anillo A_2 muy abierto, y con máximos de orden menor a muy diferentes posiciones respecto a la foliación y lineación.
- (100) . Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110) . Corona incompleta en forma de anillo de tipo A_2 con su eje ligeramente desplazado respecto a E_2 . Se observan varios máximos en posiciones muy diferentes respecto a la foliación y lineación. El principal de ellos se sitúa casi paralelo a la lineación.
- $(1\bar{1}0)$. Distribución bastante uniforme con un grupo de máximos muy estirados casi sobre el primitivo de la proyección, cercanos a $\bar{t}_1$ ($0.2^\circ \rightarrow 44.4^\circ$).
- $(\bar{2}01)$. Igual a $[100]$.
- Ejes X. Corona incompleta de tipo I_2 casi paralela a la traza del plano de foliación. Se trata de una distribución igual a $\perp[001]/(010)$ y (100) .
- Ejes Y. Distribución en varios máximos localizados alrededor del centro de la proyección (E_2), a muy bajo ángulo del plano de foliación y subperpendiculares a la lineación. Se define también un anillo de tipo A_2 algo difuso e incompleto.

- Ejes Z. Corona incompleta de tipo I_1 según el plano E_1 - E_2 . Se observa un máximo principal muy bien desarrollado, estirado sobre el primitivo de la proyección y a 90° de la foliación, muy cercano a $\bar{t}_1$ ($16.1^\circ \rightarrow 357.0^\circ$). También se aprecia un máximo menor contenido en el plano de foliación y perpendicular a la lineación.

Muestra 2 (B.0602-2, fig 4.33)

- [001]. Corona incompleta de tipo I_1 cuyo polo se inclina en el cuadrante superior izquierdo del diagrama. Los máximos se sitúan formando ángulos intermedios respecto a la foliación y la lineación, y cercanos a $\bar{t}_1$ ($37.8^\circ \rightarrow 176.3^\circ$).
- [010]. Distribución en corona de tipo anillo I_2 , con los máximos dispuestos alrededor de $\bar{t}_1$ ($50.5^\circ \rightarrow 320.2^\circ$). El máximo mejor desarrollado se dispone estirado en las cercanías de la traza del plano de foliación, de modo que forma ángulos muy variados respecto a la lineación.
- [100]. Es un caso que combina una corona incompleta tipo de I_1 similar a la de [001] y un anillo A_1 también incompleto. Se diferencian tres máximos que se localizan: dos de ellos sobre el plano de foliación, uno paralelo a la lineación y el otro perpendicular; y un tercer máximo situado a casi 90° de los dos anteriores.
- $\perp[100]/(010)$. Distribución bastante uniforme con varios máximos menores situados a alto ángulo de la foliación y lineación, y cercanos todos ellos a $\bar{t}_1$ ($29.0^\circ \rightarrow 177.8^\circ$).
- $\perp[001]/(010)$. Corona incompleta de tipo anillo A_1 que contiene un máximo muy estirado perpendicular a la foliación y lineación y cercano a $\bar{t}_1$ ($22.4^\circ \rightarrow 193.6^\circ$).
- (010). Igual a [010].
- (001). Se parece bastante a $\perp[100]/(010)$, pero en este caso el conjunto de máximos agrupados que se observaba en $\perp[100]/(010)$, aquí aparecen como un único máximo.
- (021). Se parece a [010] y (010). En este caso, los máximos aparecen mejor desarrollados y más concentrados, tendiendo a diferenciarse sólo dos máximos: uno casi coincidente con el primitivo y a muy bajo ángulo de la lineación, y el otro subparalelo también a la foliación y a alto ángulo de la lineación.
- $(0\bar{2}1)$. Distribución en tres máximos: dos de ellos perpendiculares a la lineación y el tercero subparalelo a la foliación y perpendicular a la lineación.
- (100). Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110). Distribución bastante uniforme que tiende a una corona incompleta de tipo anillo A_2 , con dos máximos menores ligeramente desarrollados a alto ángulo de la foliación y lineación, cercanos al primitivo de la proyección.

- $(1\bar{1}0)$. Corona incompleta de tipo I_1 con su polo inclinado hacia el cuadrante superior izquierdo del diagrama. Presenta un máximo sobre el primitivo que se desvía del eje E_3 unos 35° en sentido antihorario.
- $(\bar{2}01)$. Muy similar a $[001]$, con una ausencia significativa de polos alrededor de $\bar{t}_3$ ($44.5^\circ \rightarrow 319.1^\circ$); pero en este caso se observa un máximo mejor definido localizado en dirección SW y paralelo a la lineación.
- Ejes X. Distribución intermedia entre un anillo incompleto A_1 y una corona incompleta tipo I_1 según el plano E_1 - E_2 . Los máximos se agrupan perpendicularmente a la lineación: unos contenidos en el plano de foliación y el otro a 90° de ésta.
- Ejes Y. Combinación de un anillo A_1 y otro A_2 , ambos incompletos. El máximo principal se sitúa a bajo ángulo de la foliación y a alto de la lineación.
- Ejes Z. Distribución bastante uniforme que describe una corona incompleta de tipo I_1 según el plano E_2 - E_3 que parece combinarse con una corona, también incompleta, de tipo A_1 . Se diferencian tres máximos que se sitúan alineados perpendicularmente a la traza del plano de foliación y a la lineación, uno de ellos contenido en la foliación y los otros dos a 90° .



(continúa)

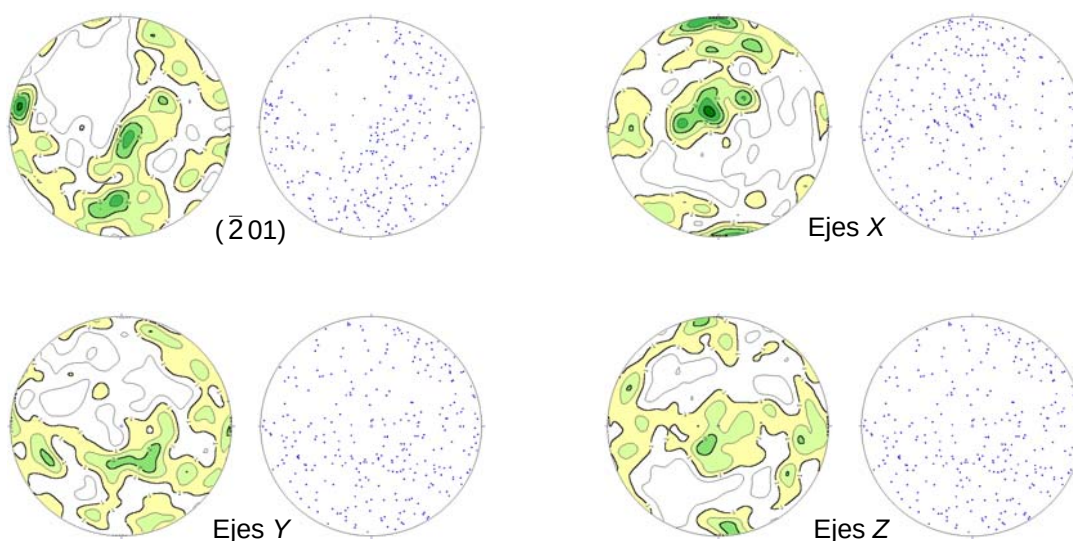


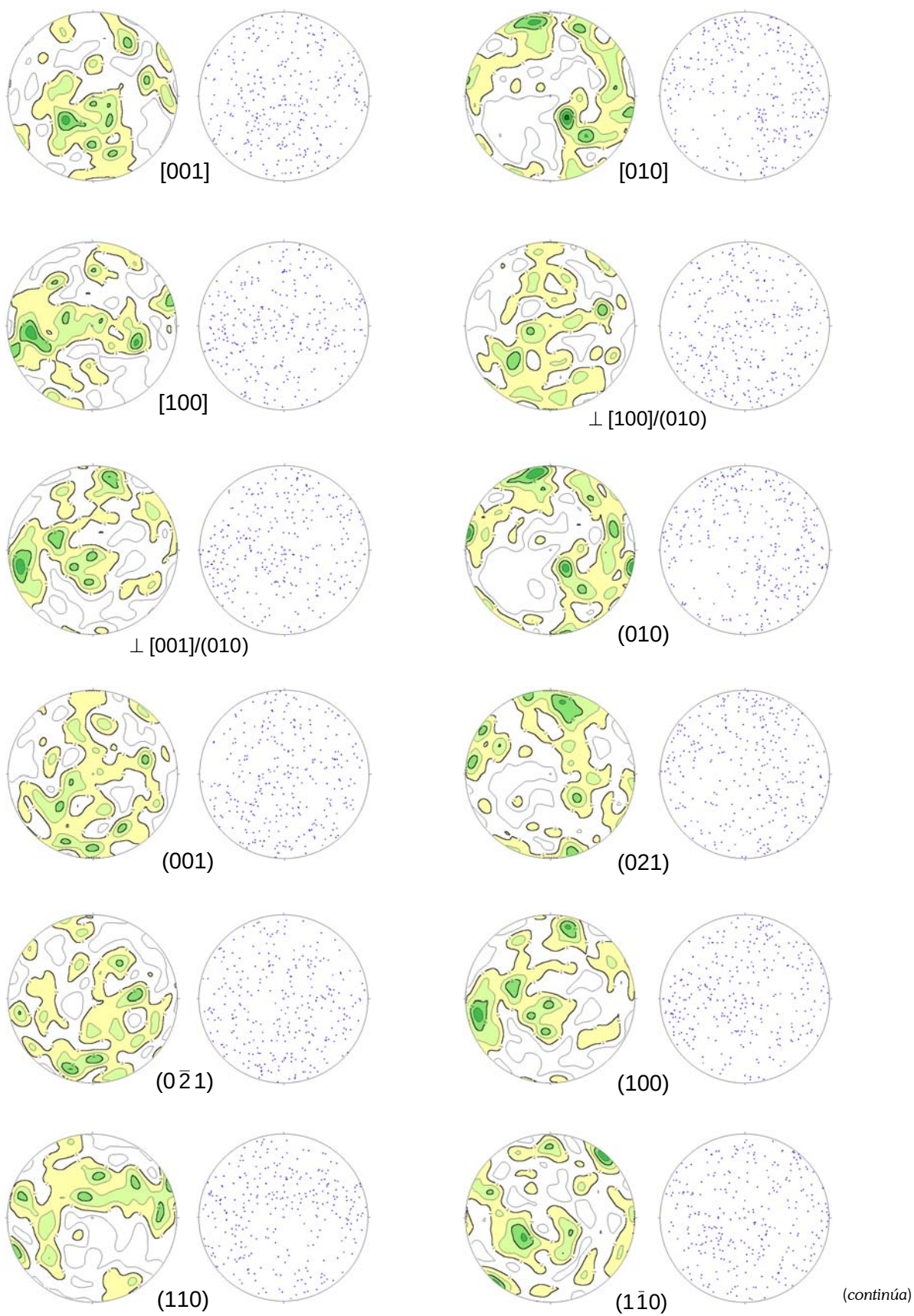
Fig.4.33 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 1 (B.0602-2). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 297 medidas. Área de contaje: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 3 (B.0602-3, fig.4.34)

Esta es la única muestra de todas las estudiadas, junto con la B.0602-5, en la que a la derecha de la proyección equiareal no se sitúa el NE sino el SE. Esto se debe a que en Veredas el cabeceo de la lineación milonítica asociada a la ZCS es al Oeste, y por tanto contrario al de Almonaster la Real. En las dos primeras muestras de Veredas se ha situado el NE a la derecha de la proyección, sin embargo, ya que se ha asumido que la lineación previa a la activación de la ZCS presenta cabeceos altos hacia el NE.

- [001]. Distribución según varios máximos agrupados a ángulos bajos-medios de la foliación y casi perpendicularmente a la lineación; todos ellos cercanos a $\bar{t}_1$ ($56.9^\circ \rightarrow 196.5^\circ$).
- [010]. Corona incompleta en anillo tipo A_2 muy abierto, con varios máximos a alto ángulo de la lineación; el principal de ellos a muy bajo ángulo de la foliación.
- [100]. Corona incompleta de tipo I_1 según el plano E_2 - E_3 , y con los máximos, por lo tanto, paralelos a la foliación, pero a ángulos de entre 5° y 45° de la lineación.
- $\perp[100]/(010)$. Distribución bastante uniforme que no describe un patrón concreto, sino más bien tres máximos menores a muy bajo ángulo de la foliación y a alto ángulo de la lineación.
- $\perp[001]/(010)$. Corona incompleta de tipo I_2 con varios máximos contenidos en el plano de foliación a ángulos muy variados respecto a la lineación. Se observa un tercer máximo casi a 90° de los anteriores y perpendicular a la foliación.

- (010). Igual a [010].
- (001). Es un caso de distribución bastante uniforme que tiende a describir una corona incompleta en anillo de tipo I_2 con centro cercano a $\bar{t}_1$ ($39.7^\circ \rightarrow 194.8^\circ$). Los máximos se localizan a ángulos muy diversos de la foliación y, en líneas generales, a alto ángulo de la lineación.
- (021). Es la primera vez en que la distribución de este elemento no se parece a [010] y (010) como siempre ha ocurrido en el resto de las muestras, no sólo en el corte de Veredas sino también en el de Almonaster la Real. En este caso, la distribución parece dibujar una corona incompleta de tipo I_2 , bastante abierta, que contiene varios máximos perpendiculares a la lineación y a la foliación, excepto uno de ellos que se localiza a bajo ángulo de ésta. Aparte de esta corona, se observan otros dos máximos subparalelos a la lineación.
- ($0\bar{2}1$). Distribución bastante uniforme, con varios máximos menores. Un par de ellos se localizan a bajo ángulo de la foliación y a unos 45° de la lineación, los otros dos se sitúan subperpendiculares a la foliación y lineación.
- (100). Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110). Corona incompleta de tipo I_2 cuyo eje es subparalelo al polo de la foliación (eje E_1), aunque desviado de él en sentido horario, y con los máximos a muy diferentes orientaciones de la lineación, entre $\bar{t}_1$ ($50.9^\circ \rightarrow 337.3^\circ$) y $\bar{t}_2$ ($5.8^\circ \rightarrow 74.5^\circ$).
- ($1\bar{1}0$). Distribución bastante uniforme con dos máximos mejor definidos y aislados, uno de ellos cercano a $\bar{t}_1$ ($39.7^\circ \rightarrow 232.2^\circ$) y el otro sobre el primitivo de la proyección, a 45° de la foliación y lineación.
- ($\bar{2}01$). En este caso ocurre algo similar a (021), es decir, mientras en todas las muestras de ambos cortes el elemento ($\bar{2}01$) presentaba una similitud sistemática con [100], esto no sucede para esta muestra. El tipo de distribución es un caso intermedio entre una corona incompleta de tipo I_1 según E_2 - E_3 y un anillo A_2 , con los máximos cercanos a $\bar{t}_1$ ($48.3^\circ \rightarrow 255.1^\circ$), a muy bajo ángulo de la foliación y a menos de 45° respecto a la lineación.
- Ejes X. Corona incompleta de tipo I_1 paralela al plano E_2 - E_3 , con un grupo de tres máximos estirados próximos a $\bar{t}_1$ ($86.8^\circ \rightarrow 270.4^\circ$) y, por lo tanto, paralelos a la foliación y a 90° de la lineación. Se observa otro segundo conjunto de máximos menos concentrados, también contenidos en el plano de foliación, y casi perpendiculares a la lineación.
- Ejes Y. Distribución según una corona I_2 de eje paralelo a E_1 unida por una corona incompleta de tipo I_1 paralela al plano E_1 - E_2 . La mayor concentración de polos se localiza según varios máximos a altos ángulos de la foliación y lineación, en general cercanos a $\bar{t}_1$ ($0.1^\circ \rightarrow 5.6^\circ$).
- Ejes Z. Corona más o menos completa y en forma de anillo de tipo A_1 , con los máximos a muy diferentes orientaciones de la foliación y lineación.



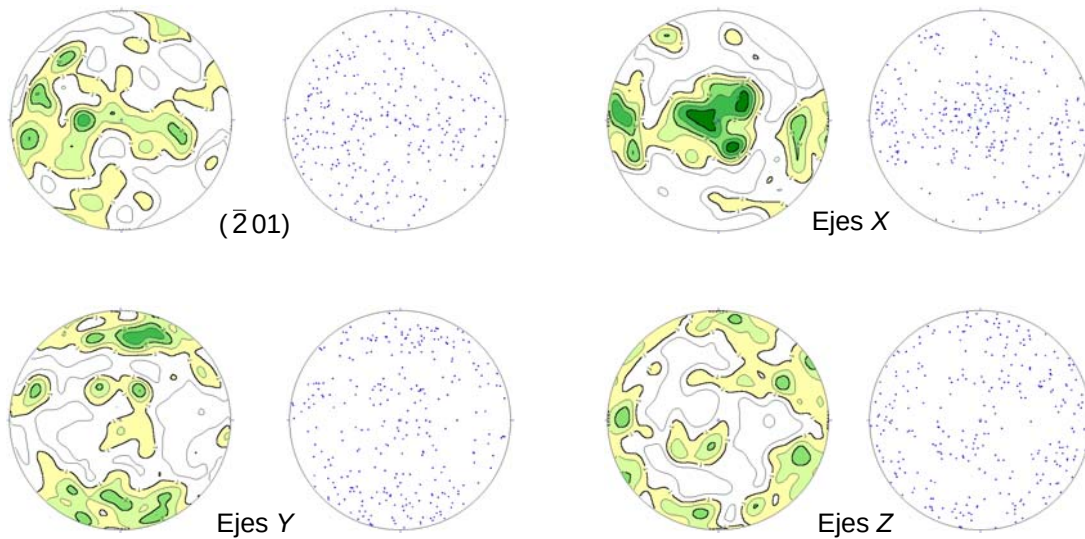
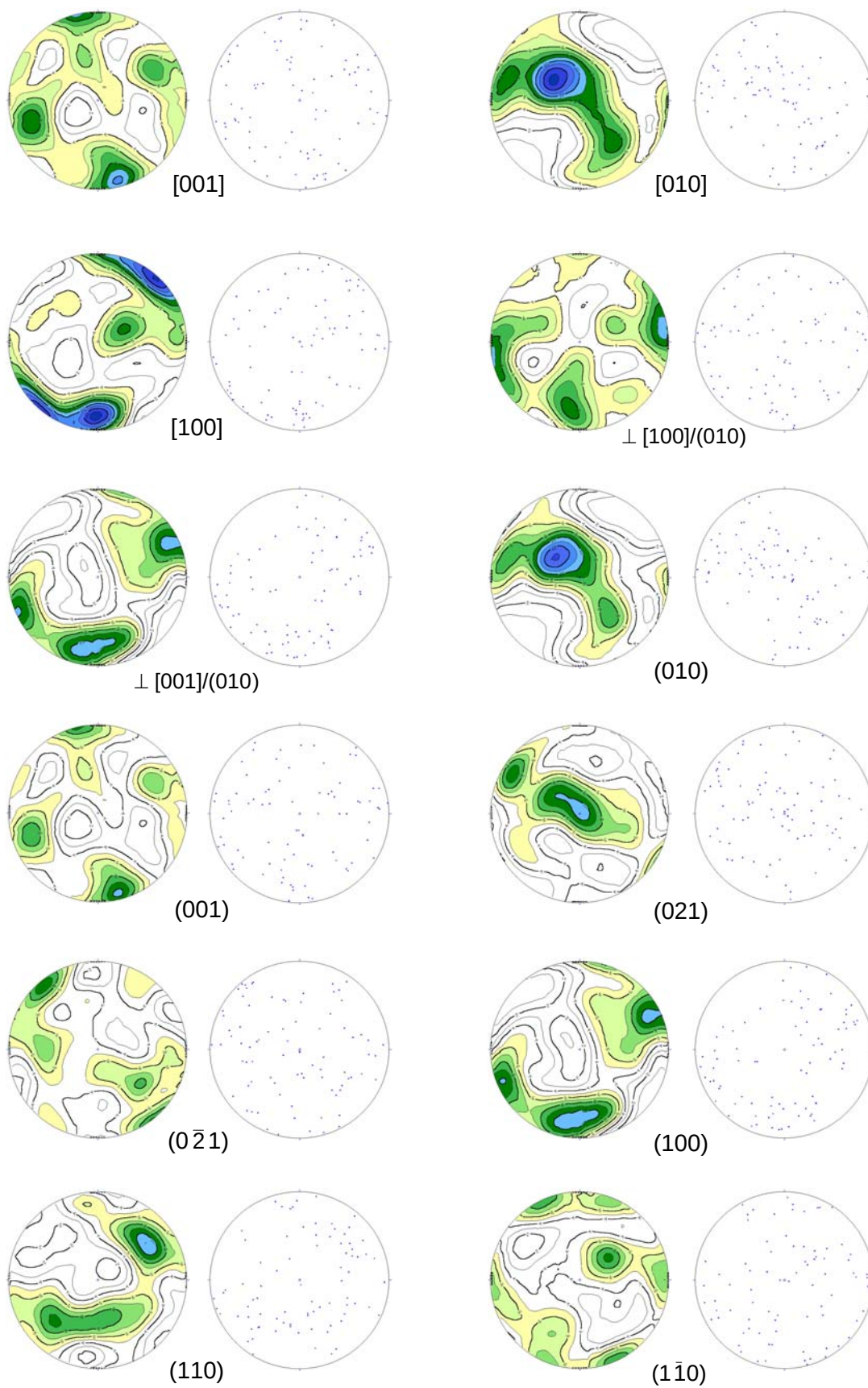


Fig.4.34 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 1 (B.0602-3). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 295 medidas. Área de contaje: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 4 (B.0602-4, fig.4.35)

- [001]. Resulta complicado, en este caso, atribuir una forma a la distribución. Parece, sin embargo, que se asemeja más a una corona incompleta en anillo tipo A_1 en la que se ven un grupo de máximos muy bien desarrollados: el principal de ellos, normal a la foliación y a la lineación y próximo a $\bar{t}_1$ ($1.3^\circ \rightarrow 190.8^\circ$), y los otros dos localizados subparalelos a la foliación y a bajo ángulo de la lineación ($<20^\circ$). Alternativamente, podría describirse como una corona de tipo I_2 , bastante abierta, con eje situado sobre el primitivo.
- [010]. Corona intermedia entre los tipos I_1 e I_2 , con un máximo muy estirado y cuya concentración mayor de polos se encuentra próxima a $\bar{t}_1$ ($59.8^\circ \rightarrow 310.2^\circ$). En cualquier caso, la corona es oblicua con respecto al plano de foliación, desviándose en sentido horario.
- [100]. Máximo muy concentrado y también muy estirado sobre el primitivo de la proyección, con la mayor concentración de polos a alto ángulo de la foliación y lineación, cercana a $\bar{t}_1$ ($4.3^\circ \rightarrow 30.6^\circ$). Se observa un segundo máximo bastante menos desarrollado, próximo a E_2 y a bajo ángulo de la foliación y a alto de la lineación.
- $\perp[100]/(010)$. Se parece a [001]. Se trata de una corona incompleta en anillo de tipo A_1 o bien una corona I_2 . Se distinguen dos máximos: el mejor desarrollado paralelo a la lineación; el otro a 90° del anterior, perpendicular a la foliación y a la lineación.

- $\perp[001]/(010)$. Distribución en dos máximos muy bien diferenciados y estirados sobre el primitivo. Uno de ellos se sitúa próximo a $\bar{t}_1$ ($0.3^\circ \rightarrow 45^\circ$). El otro se localiza a 90° de la foliación.
- (010). Igual que [010].
- (001). Igual a $\perp[100]/(010)$.
- (021). Se parece a [010] y (010), pero con el máximo principal menos estirado. También se localiza cercano a $\bar{t}_1$ ($69.5^\circ \rightarrow 303^\circ$).
- $(0\bar{2}1)$. Corona incompleta de tipo I_1 oblicua con respecto al plano de foliación, del que se desvía en sentido horario. El máximo principal está situado sobre el primitivo, próximo a $\bar{t}_1$ ($0.4^\circ \rightarrow 303.0^\circ$), y aparece otro par de máximos menos importantes y subparalelos a la foliación.
- (100). Igual a $\perp[001]/(010)$.
- (110). Corona incompleta en forma de anillo tipo A_2 , con dos máximos. El principal, más concentrado, se sitúa a bajo ángulo de la foliación y lineación, y el otro se dispone alargado en las cercanías de la traza de la foliación.
- $(1\bar{1}0)$. Corona incompleta en anillo de tipo A_1 . Se distinguen varios máximos: los dos principales se disponen subperpendiculares a la lineación, uno de ellos a muy bajo ángulo de la foliación y el otro a casi 90° y, finalmente, un máximo secundario paralelo a la lineación.
- $(\bar{2}01)$. Igual a [100].
- Ejes X. Es un clarísimo ejemplo de distribución en un máximo intenso, con una altísima concentración de polos situada en el plano de foliación y paralelamente a la lineación, alrededor de $\bar{t}_1$ ($11.0^\circ \rightarrow 273.2^\circ$), y con un segundo máximo de mucha menos importancia y subparalelo al eje E_1 .
- Ejes Y. Es una distribución como la de los ejes X. También se trata de un único máximo contenido en el plano de foliación, pero a diferencia del caso anterior, esta vez se sitúa a 90° de la lineación y no paralelo a ella.
- Ejes Z. Corona incompleta de tipo I_1 según el plano E_1 - E_2 . La mayor concentración de polos se localiza a 90° de la foliación y lineación, cercana a $\bar{t}_1$ ($2.3^\circ \rightarrow 176.9^\circ$), y una concentración algo menor está contenida en la foliación y es normal a la lineación. Aunque de manera menos marcada, también se define un anillo de tipo A_1 incompleto.



(continúa)

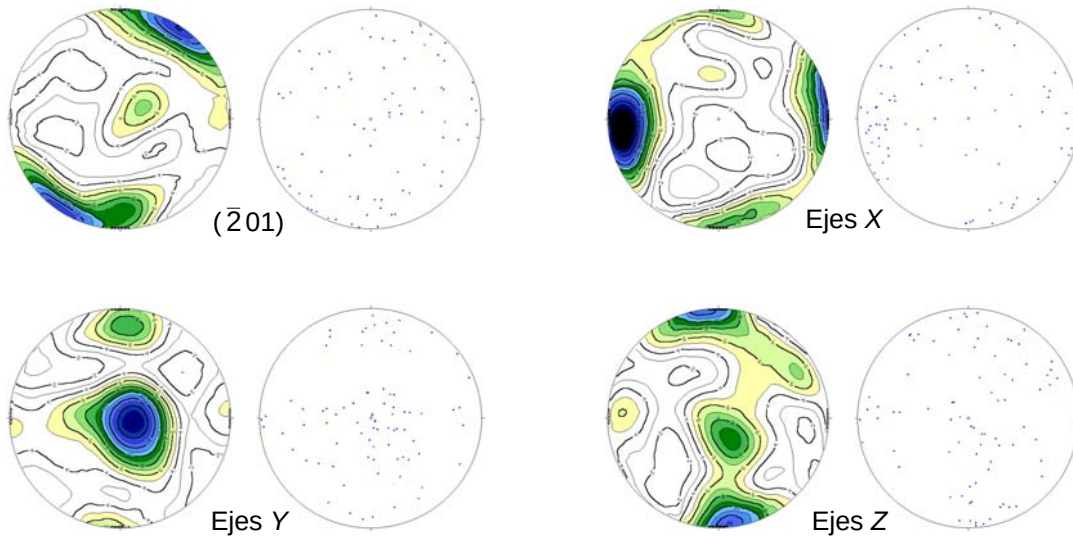
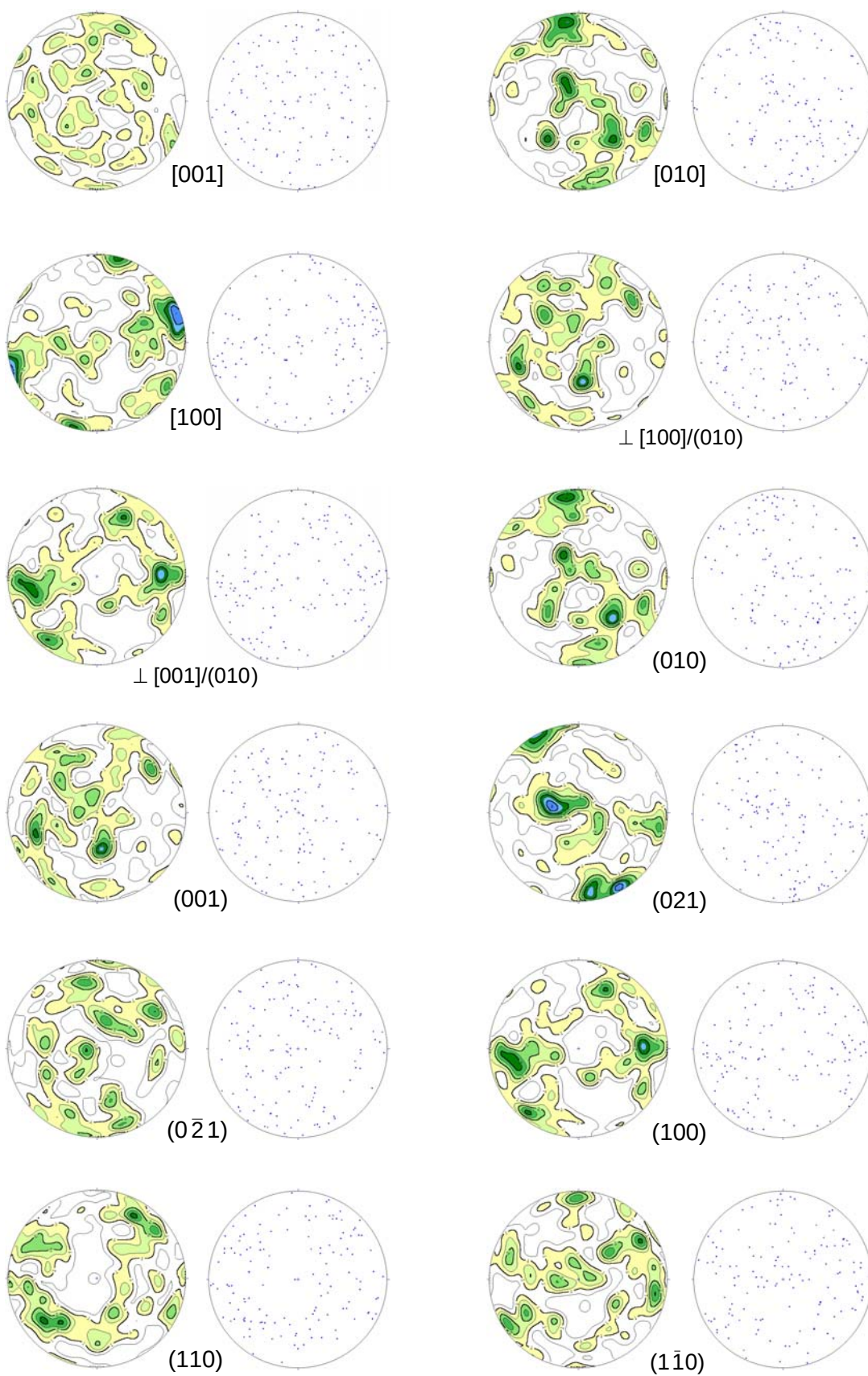


Fig.4.35 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 1 (B.0603-4). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el SE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 81 medidas. Área de contaje: 1% del área del hemisferio. Contornos: 0.5, 1, 1.5%... hasta un máximo de 7%, según cada caso.

Muestra 5 (B.0602-5, fig.4.36)

- [001]. Se trata de una distribución totalmente uniforme.
- [010]. Distribución según una corona incompleta en anillo de tipo A_2 compuesta por tres máximos principales a bajo ángulo de la foliación y a alto de la lineación. Uno de los máximos coincide con $\bar{t}_2$ ($10^\circ \rightarrow 24.9^\circ$). El anillo se encuentra con su centro ligeramente desplazado respecto a E_2 y se complementa con una doble corona incompleta de tipo I_2 cuyo eje se sitúa inclinado en sentido antihorario respecto a la foliación. Se observa una alta concentración de polos casi coincidente con E_1 .
- [100]. Corona incompleta de tipo I_1 casi paralela a E_2 - E_3 , y con un máximo muy bien desarrollados, a muy bajo ángulo de la lineación, casi coincidente con E_3 y cercano a $\bar{t}_1$ ($8.7^\circ \rightarrow 72.4^\circ$). Se complementa con una corona incompleta de tipo I_2 con dos máximos sobre el primitivo y perpendiculares a la lineación.
- $\perp[100]/(010)$. Distribución que combina varios tipos de coronas: dos en anillo de tipo I_2 , uno con eje en la parte superior izquierda de la proyección y el otro en la parte inferior izquierda. Ambos anillos se complementan con otra corona incompleta de tipo I_2 y eje inclinado en sentido antihorario respecto al plano de foliación. La mayor concentración de polos se sitúa según dos máximos en la parte inferior de la proyección y a ángulos intermedios de la foliación y de la lineación.

- $\perp[001]/(010)$. Anillo de tipo A_2 y que se completa con otros dos anillos de tipo I_2 con centros inclinados en la parte superior derecha de la proyección y en la inferior izquierda de la misma, respectivamente. La mayor concentración de polos se sitúa según dos máximos sobre el plano de foliación y a bajo ángulo de la lineación, uno de ellos coincidente con E_3 y el otro cercano a $\bar{t}_1$ ($3.3^\circ \rightarrow 247.5^\circ$).
- (010). Igual a [010].
- (001). Igual a $\perp[100]/(010)$.
- (021). Se parece a [010] y (010), pero las coronas de tipo A_2 e I_2 se encuentran mejor desarrolladas. En este caso, el anillo A_2 casi coincide con el centro de la proyección, con un máximo muy bien desarrollado sobre el plano de la foliación y a alto ángulo de la lineación, próximo a $\bar{t}_2$ ($68.9^\circ \rightarrow 301.8^\circ$). Los otros dos máximos son subperpendiculares a la foliación y a la lineación.
- ($0\bar{2}1$). Distribución bastante uniforme que parece describir varios anillos de tipo I_2 con sus ejes inclinados en la parte superior derecha e inferior izquierda de la proyección. Los máximos se sitúan a muy diferentes orientaciones de la foliación y la lineación.
- (100). Igual que $\perp[001]/(010)$.
- (110). Corona incompleta de tipo A_2 muy abierta, con dos máximos principales próximos al primitivo de la proyección y desviados en sentido antihorario respecto al plano de foliación, uno de ellos cercano a $\bar{t}_1$ ($7.7^\circ \rightarrow 245.7^\circ$).
- ($1\bar{1}0$). Distribución bastante uniforme que parece describir una corona incompleta de tipo I_1 paralela a la foliación y con los máximos a muy diferentes orientaciones respecto a la lineación. A ambos extremos de la citada corona se deja entrever el desarrollo de coronas de tipo I_2 .
- ($\bar{2}01$). Igual a [100].
- Ejes X. Corona incompleta de tipo I_1 según E_2 - E_3 , con una elevadísima concentración de polos paralela a la lineación y cercana a $\bar{t}_1$ ($4.4^\circ \rightarrow 96.9^\circ$). Se observa otro máximo, no tan bien desarrollado, coincidente con E_2 y próximo a $\bar{t}_2$ ($80^\circ \rightarrow 212.7^\circ$). Esta distribución, junto con las de los ejes Y y Z, la mejor definida de toda la muestra.
- Ejes Y. Distribución en cruz según dos coronas incompletas de tipo I_1 . Una de ellas, la principal, se dispone según E_1 - E_2 , con la máxima concentración de polos coincidente con E_2 y próxima a $\bar{t}_1$ ($66.3^\circ \rightarrow 331.9^\circ$). La otra corona, peor desarrollada, se sitúa a 90° de la anterior (según E_2 - E_3) y con los máximos paralelos a la lineación y ligeramente inclinados en sentido horario respecto al plano de foliación.



(continúa)

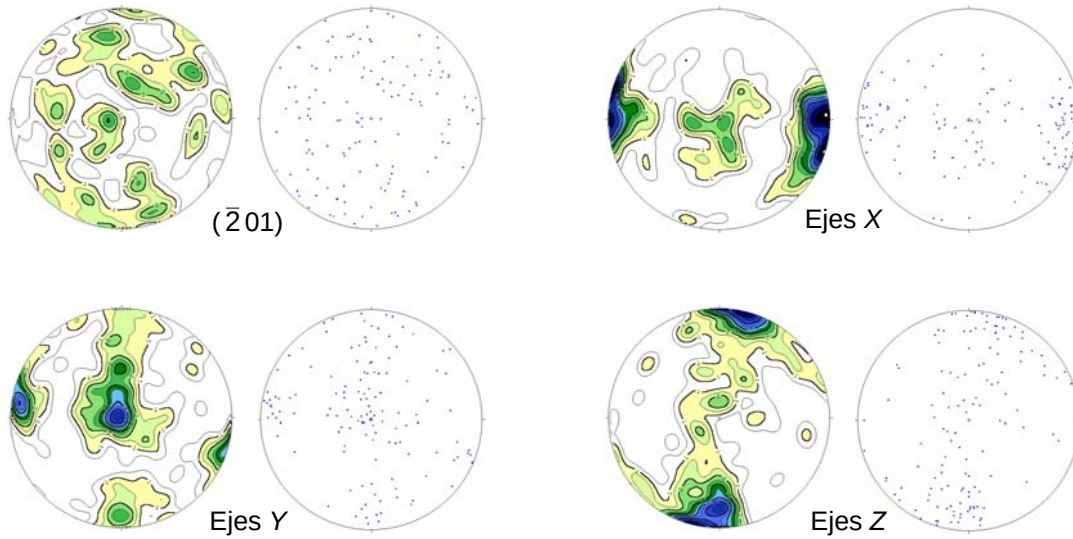


Fig.4.36 (continuación). Orientación cristalográfica preferente (OCP) de la muestra 1 (B.0602-1). El plano XY (foliación) se sitúa en la dirección E-W, perpendicular a la página, y la dirección X (lineación) en E-W sobre el primitivo de la proyección. El techo se sitúa en el norte de la proyección y el NE geográfico en el E. Proyección equiareal, hemisferio inferior, 136 medidas. Área de conteo: 1% del área del hemisferio. Contornos: 4, 4.5, 5%... hasta un máximo de 16%, según cada caso.

- Ejes Z. Corona incompleta tipo I_1 perpendicular a la foliación y, por lo tanto, según E_1 - E_2 . La mayor concentración de polos queda representada por dos máximos muy bien desarrollados (casi como en el caso de los ejes X) sobre el primitivo de la proyección y perpendiculares a la foliación y la lineación, uno de ellos próximo a $\bar{t}_1$ ($2.6^\circ \rightarrow 194.2^\circ$). Se observa una concentración de polos, mucho menor, coincidente con E_2 y próxima a $\bar{t}_2$ ($87.4^\circ \rightarrow 7.5^\circ$)

4.3.3. Resultados del Test de Bondad de Ajuste de Watson

Como ya se comentó en el apartado 4.2.3 de los resultados obtenidos para Almonaster la Real sobre la bondad de ajuste a Watson, este test de uniformidad consiste en dos test a su vez: el de colatitud y el de longitud, tanto para la distribución bipolar como para la distribución en corona. En el apéndice C1 se pueden ver los resultados del procedimiento matemático y en el apéndice C2 los gráficos del test de colatitud, el cual se aplicó por las mismas razones ya explicadas en el apartado de mencionado de Almonaster la Real y también en el de metodología (apartado 3.6, *Descripción general de los principales tipos de test utilizados*).

Al igual que ocurrió en las muestras de Almonaster la Real, y por la mismas razones ya expuestas, ninguna de los 16 elementos cristalográficos de las muestras del corte de Veredas ajustaron al test de colatitud, ni para el caso de la distribución en corona ni tampoco para el caso de la bipolar. El valor del estadístico de colatitud para la distribución bipolar (MB, valor crítico = 1.094) varía entre

16 y 17 para las muestras 1, 2 y 3 (aquellas en las que mayor número de granos se han medido), y disminuye drástica y repentinamente a valores entre 8 y 11 para las muestras 4 y 5 (precisamente aquellas en las que midieron el menor número de granos). Los resultados pueden verse en el apéndice C1, y con ello nos hacemos una clara idea de que el número de granos medidos en cada muestra influye directa y proporcionalmente en el valor del estadístico, aunque esto no debiera suceder ya que se supone normalizado (ver para una mayor explicación los apartados 3.6 y 4.2.3 sobre la descripción general de los principales tipos de test utilizados y los resultados del test de bondad de ajuste de Watson para Almonaster la Real, respectivamente).

De igual manera, el test de longitud de la distribución en corona tampoco se cumple para ninguno de los casos posibles. Siempre se supera el valor de su estadístico (MG), cuyo valor crítico es 5.99. Podemos ver en el apéndice C2 que los valores de MG son muy variables y que, a diferencia de los de MB, no se encuentran afectados por el número de granos medidos en cada muestra, al menos a priori; aunque se llega a observar una muy ligera influencia en las muestras 4 y 5 en las que MB adquiere los valores más bajos, siendo ambas muestras precisamente aquellas en las que se han medido el menor número de granos. MG adopta valores entre 3 y 8, aunque hay algunas excepciones en donde disminuye por debajo de 3 (por ejemplo: muestra 4, elementos $[010]$, $\perp[001]/(010)$, $\perp[100]/(010)$, (100) y ejes X), e incluso también llega a aumentar por encima de 10 (por ejemplo: muestra 2, elementos (110) y $[001]$).

Con todo lo visto, llegamos a las mismas conclusiones que en Almonaster la Real. Manteniendo al margen los problemas del test de colatitud para ambos tipos de distribuciones, podríamos considerar que existe ajuste a Watson cuando se cumple el test de longitud para una sola de las distribuciones (por ejemplo, $[001]$ y (010) para las muestras 1 y 2, etc.). Sin embargo, deberíamos tomar con cierta cautela aquellos casos en los que se cumple el mencionado test para las dos distribuciones a la vez, en cuyo caso podríamos estar tratando con un tipo de distribución intermedia entre bipolar y corona (por ejemplo, $\perp[100]/(010)$, (001) y (100) para la muestra 1; $\perp[100]/(010)$, (001) , $(0\bar{2}1)$, (110) y ejes Z para la muestra 2; $\perp[100]/(010)$, (001) , $(0\bar{2}1)$ y $(1\bar{1}0)$ para la muestra 3, etc.). Finalmente, tendríamos aquellos casos en los que no se cumple el test de colatitud para ninguna de las dos distribuciones, en cuyo caso se rechazaría cual posible ajuste a Watson (por ejemplo, $[010]$, $[100]$, (010) de la muestra 2; ejes X de las muestras 2, 4 y 5, etc.).

4.3.4. Resultados del test de uniformidad de Ajne

Al igual que ocurrió en Almonaster la Real, los valores del estadístico calculados por el programa informático *PLAG-9* son siempre muy elevados, excepto para las muestras 4 y 5 en las que son bastante menores debido a que son aquellas en las que se han medido un menor número de granos (81 y 136, respectivamente), con lo cual resulta claramente evidente que el valor del estadístico de Ajne depende fuertemente del número de granos medidos (ver apéndice C3).

El valor de An para las muestras 1, 2 y 3, en las que el número de granos medidos es casi 300, oscila entre 26.99 [(110), muestra 3] y 36.57 [(010), muestra 2]. En el caso de las muestras 4 y 5 los valores oscilan entre 7.50 [(0 $\bar{2}$ 1), muestra 4] y 14.62 (ejes Z, muestra 5) (ver apéndice C3). Como se puede observar en Veredas, este es un ejemplo clarísimo, más que en el caso de Almonaster la Real si cabe, de que la diferencia del número de granos medidos en las muestras de la parte alta y baja de la serie de las metabasitas tiene una clara influencia en el resultado del test, razón por la cual fue necesario normalizar los datos obtenidos por el programa como ya se explicó en el capítulo de metodología (apartado 3.6.3). Los resultados concretos de este test y de otras pruebas similares se representan gráficamente en el siguiente apartado.

4.3.5. Gráficos BDA (Bingham – Distancia - Ajne)

Al igual que se hizo para Almonaster la Real, y por la mismas razones, aquí en Veredas también se describirán los diagramas BDA agrupándolos de la misma manera, es decir, según la similitud de ciertos elementos cristalográficos (fig.4.37).

Conviene señalar, al igual que se hizo en este mismo apartado en Almonaster la Real, que el hecho de que una muestra no presente ajuste a la distribución de Watson no significa que no sea aplicable o fiable el estadístico Su de uniformidad. Esto es debido a que la distribución de Watson es un caso especial de la de Bingham. Una muestra puede no ajustar a la distribución de Watson y, sin embargo, sí a la de Bingham, en cuyo caso el estadístico Su sería representativo de la muestra. Ver apéndice C4 para los valores del estadístico, los autovalores y autovectores.

- $\perp$ [100]/(010) y (001)

Las curvas de uniformidad de Bingham y Ajne son iguales para ambos elementos cristalográficos. Sin embargo, se observan muy claras discrepancias entre los estadísticos Su y An/n para todas las muestras. De hecho, las trayectorias son totalmente opuestas, es decir, cuando en una muestra aumenta el valor del estadístico de Bingham, disminuye sin embargo el valor del test de Ajne. Así, por ejemplo, mientras que el estadístico Su aumenta para las muestras 2 y 5, ocurre lo contrario según An/n . Debido a estas contradicciones, no se puede llegar a una conclusión sobre la tendencia general en cuanto a la intensidad de la fábrica.

- [010], (010) y (021)

Los gráficos que más se parecen entre sí son [010] y (010), igual que ocurre con los gráficos de Woodcock y los diagramas de densidad. En relación a estos dos elementos, la muestra 2 representa una evolución opuesta según se considere el caso del test de Bingham o el de Ajne (conviene aclarar que en el ajuste a la distribución de Watson se trata de una muestra no fiable ya que no ajusta ni a la distribución en corona ni tampoco a la bipolar). Al contrario que en el caso (a), existe congruencia en los resultados de ambos test de uniformidad para todas las muestras, con una tendencia a aumentar la

uniformidad hacia la parte baja de la serie (muestras 4 y 5) y alejarse de ella en las muestras situadas a techo (al contrario de lo que sucedía en la mitad inferior de Almonaster la Real. Sin embargo, esta tendencia es similar a la mostrada en la parte superior de este último corte). En el caso de (021) hay una variación en la muestra 1, en donde los valores de ambos estadísticos disminuyen, de modo que la orientación cristalográfica preferente es menos marcada que en la muestra 2.

- $[100]$ y $(\bar{2} 01)$

La evolución de ambas trayectorias es la misma para ambos elementos. La variación espacial mostrada por ambos estadísticos difiere en algunas muestras. A pesar de ello, se observa un patrón general hacia una mayor uniformidad de techo a muro de la serie de las metabasitas. Ello indica una tendencia hacia una fábrica con una orientación preferente menos marcada hacia la parte baja de la serie (de nuevo al contrario de lo que ocurría en la mitad inferior del corte de Almonaster la Real). Hay que tener en cuenta que el resultado del test de Watson para las muestras mencionadas es fiable, proporcionando una distribución en corona.

- $\perp [001]/(010)$ y (100)

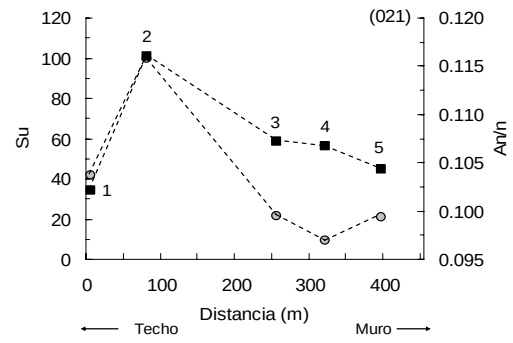
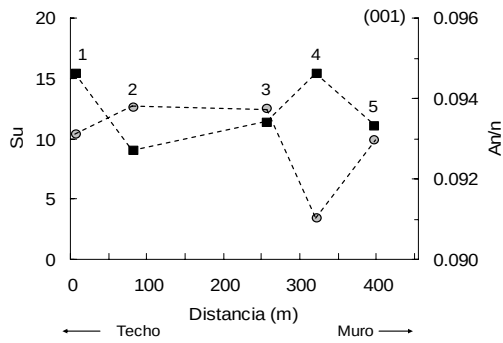
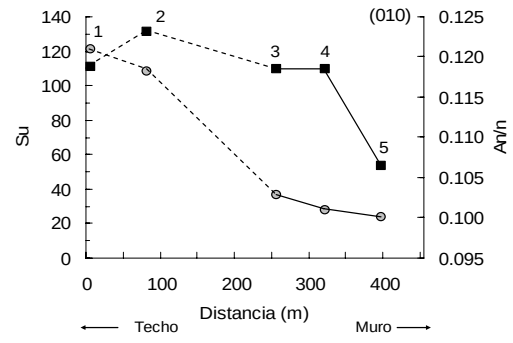
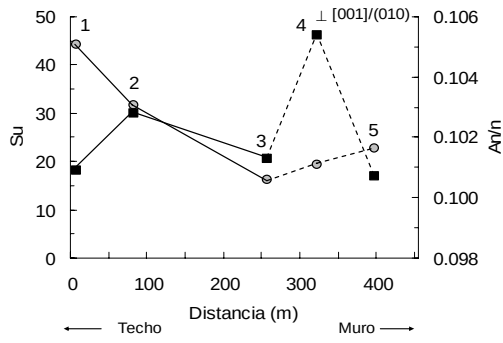
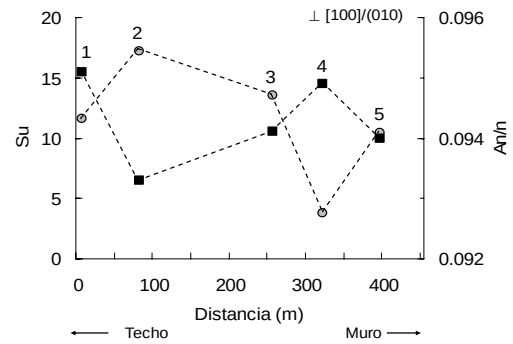
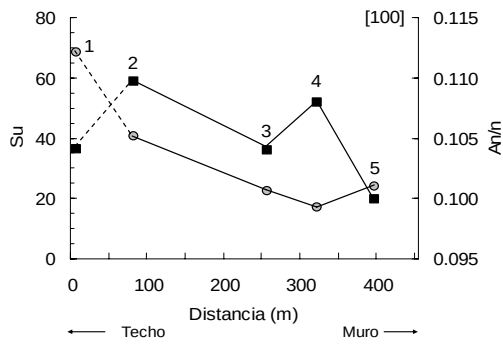
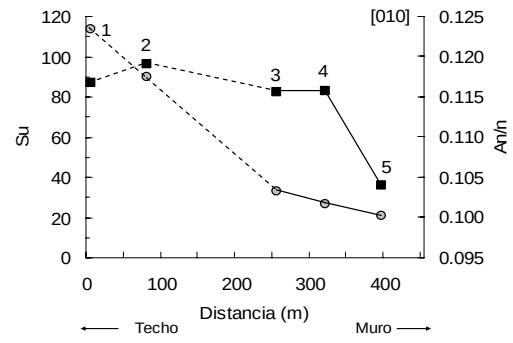
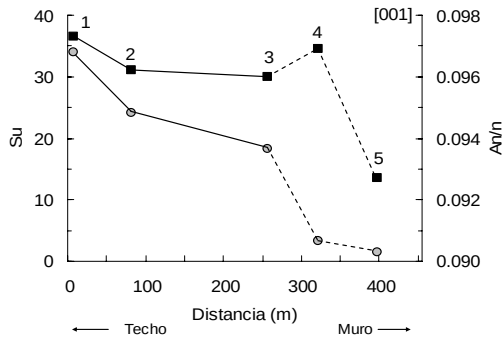
Mientras que en el caso de Almonaster la Real las tendencias de los estadísticos de Bingham y Ajne para estos dos elementos cristalográficos se parecían bastante a $[100]$ y $(\bar{2} 01)$, no ocurre lo mismo en Veredas. Las trayectorias de ambos test difieren en las muestras 2 y 5 principalmente, en donde se hacen contrarias. Para la muestra 4 aumentan ambos estadísticos, pero en el caso del estadístico de Ajne, el incremento es más brusco, alejándose fuertemente de la uniformidad.

- $[001]$

Ambas curvas siguen unas trayectorias muy similares. Sólo se produce un cambio significativo en la evolución de la muestra 4, en la que el valor del estadístico de Ajne aumenta y el de Bingham, sin embargo, disminuye. La tendencia general, en cualquier caso, es hacia un claro aumento de la uniformidad de techo a muro. Es decir, en Veredas desciende la intensidad de la orientación cristalográfica de la fábrica hacia muro de las metabasitas. Cabe destacar que para el test de Watson la muestra 4 presenta un ajuste no fiable.

- $(0\bar{2} 1)$

Las trayectorias de ambas curvas es similar, a excepción de lo que se ve en la muestra 4. Para ésta, mientras aumenta la uniformidad según el estadístico de Bingham, según el de Ajne ocurre justamente lo contrario. Algo similar también ocurre en la evolución de las muestra 1-2, aunque no tan acusadamente como en la muestra 4. No se puede aclarar la tendencia general en cuanto a la uniformidad de este elemento debido a las contradicciones en las tendencias de las curvas de ambos test. Aunque según los resultados del test de Bingham, las muestras 3, 4 y 5 se ajustan a la uniformidad, en cuyo caso, si hiciéramos caso a la tendencia del estadístico S_u se podría llegar a la conclusión de que la uniformidad aumenta hacia muro de la serie de las anfífolitas.



(continúa)

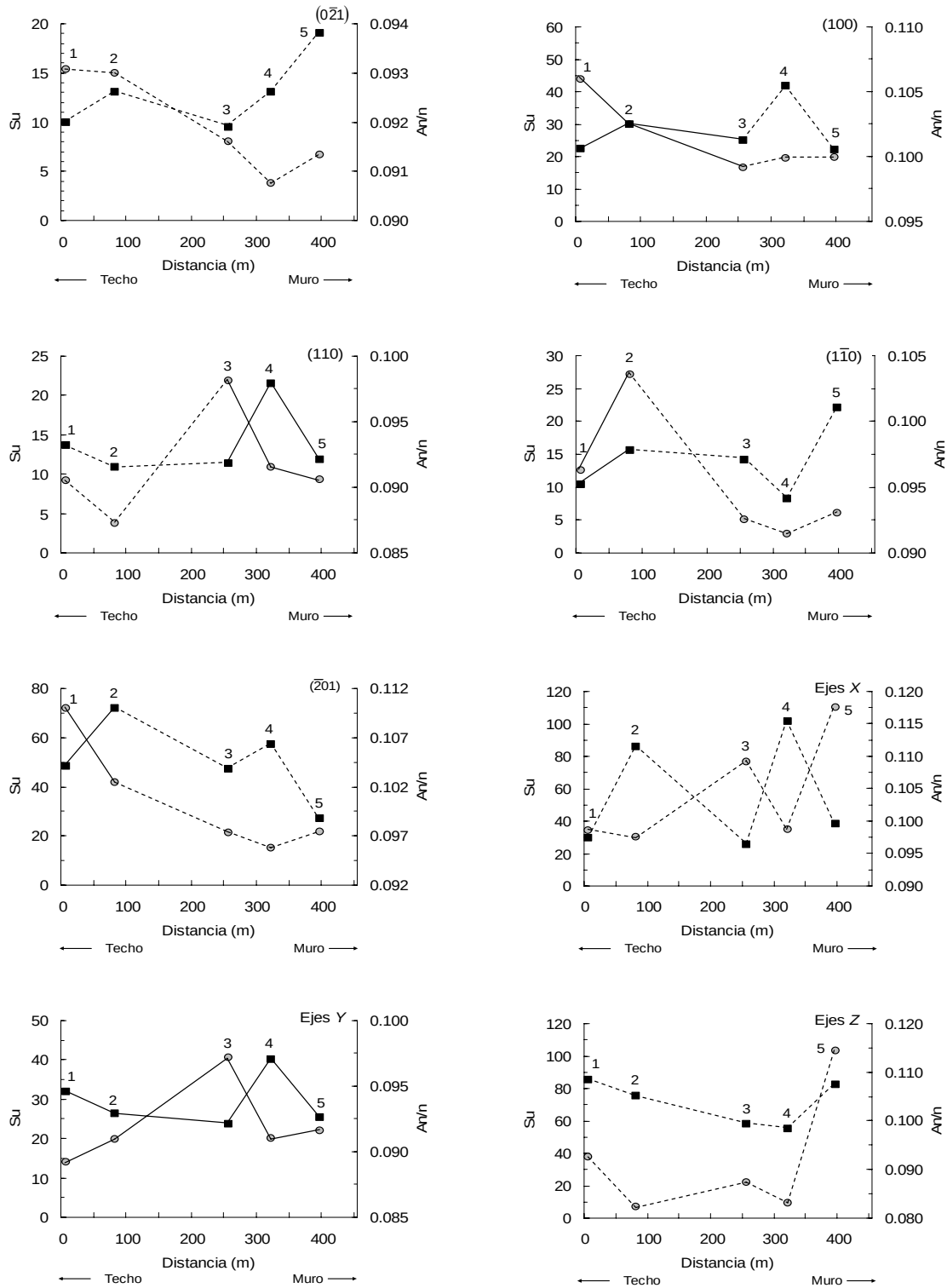


Fig. 4.37 (continuación). Gráficos BDA: distancia frente a los estadísticos de los test de uniformidad de Bingham (S_u , círculos) y Ajne normalizado (An/n , cuadrados). Se comparan los resultados de la uniformidad en ambos casos para comprobar si existe congruencia en sus patrones de evolución para cada elemento cristalográfico en cuestión. Las trayectorias de evolución son bastante semejantes en los dos casos excepto para las muestras 1-2 y 3-4. La línea discontinua representa una evolución dudosa de unas muestras a otras ya

que se rechaza la uniformidad de ambos test (los resultados han de considerarse con precaución). La línea continua representa la evolución de las muestras en las que, al menos, se acepta la uniformidad para uno de los test.

- (110)

Las curvas son similares excepto para el caso de las muestras 3 y 4. Para la primera de ellas, el valor del test de Ajne se mantiene prácticamente igual que el de la muestra que se encuentra inmediatamente por encima, mientras que para el test de Bingham aumenta drásticamente el valor de su estadístico, lo que indica claramente que se aleja de la uniformidad y presenta, por lo tanto, una orientación cristalográfica más marcada que el resto de las muestras. En cuanto a la muestra 4 ocurre, sin embargo, justamente lo contrario que en la 3.

- ($1\bar{1}0$)

Las curvas son parecidas. Se produce un aumento del grado de orientación cristalográfica preferente para las muestras 2 y 5, mientras que para el resto de muestras disminuye y se aproximan más a la uniformidad. Lo que sí queda patente es que la uniformidad aumenta hacia la parte media-baja de la serie, concretamente para las muestras 3 y 4.

- Ejes X

Para este elemento resulta tremendamente curioso que las trayectorias de las curvas de ambos estadísticos de uniformidad sigan una evolución totalmente contraria y opuesta para todas las muestras del corte. Ocurre, en este caso, algo parecido a lo que ya vimos para el elemento ($1\bar{1}0$) de Almonaster la Real. Son éstos los dos únicos casos en ambos cortes en lo que se produce un fenómeno semejante. Para los ejes X de Veredas, las muestras 2, 3 y 4 no son fiables desde el punto de vista del test de Watson. Según el estadístico de Ajne la uniformidad aumenta para las muestras 1, 3 y 5, mientras que para el caso del de Bingham aumenta para las muestras 2 y 4. Es por ello que, en este caso, el gráfico BDA no es resolutivo.

- Ejes Y

Se parece bastante al gráfico del elemento (110), con la única diferencia del aumento de la uniformidad en la muestra 1 para el caso de la curva del estadístico de Bingham.

- Ejes Z

Las trayectorias de ambos estadísticos se parecen bastante a las de este mismo elemento para el caso de Almonaster la Real. A diferencia de los ejes Y y Z de este mismo corte, aumenta la uniformidad de techo a muro de la serie, excepto para la muestra 5 en donde se aleja considerablemente de ésta y llega a presentar un mayor grado de la orientación preferente de la fábrica.

Los patrones de variación de los estadísticos de los test de uniformidad de Bingham y de Ajne a lo largo del corte de Veredas, y para cada uno de los elementos cristalográficos medidos, son similares. Salvando pequeñas diferencias, y algunas irregularidades poco notables, se aprecia un descenso en el valor de ambos estadísticos desde el techo de la lámina anfibólica hacia su parte

media, al igual que ocurría en Almonaster la Real. En líneas generales, las muestras 1 y 3, situadas a techo y en la parte media de la lámina anfibolítica, respectivamente, muestran mayores valores de S_u y menores valores de An/n que las inmediatamente subyacentes (muestras 2 y 4). Esto también queda reflejado al proyectar los valores de S_u y An/n frente a la temperatura de deformación (fig.4.38). En el primer caso (fig.4.38a), se observa que con el descenso de la temperatura de deformación disminuye el valor del estadístico S_u , excepto para los ejes X e Y, en los que aumenta significativamente (igual que ocurre en Almonaster la Real) y también, pero en menor medida, para los ejes Z. En el segundo (fig.4.38b), los valores se mantienen bastante constantes para todos los elementos a lo largo del perfil de temperaturas. Sólo se observa un ligero aumento del estadístico de $Ajne$ para los ejes Z con el aumento de temperatura, y lo contrario para (021).

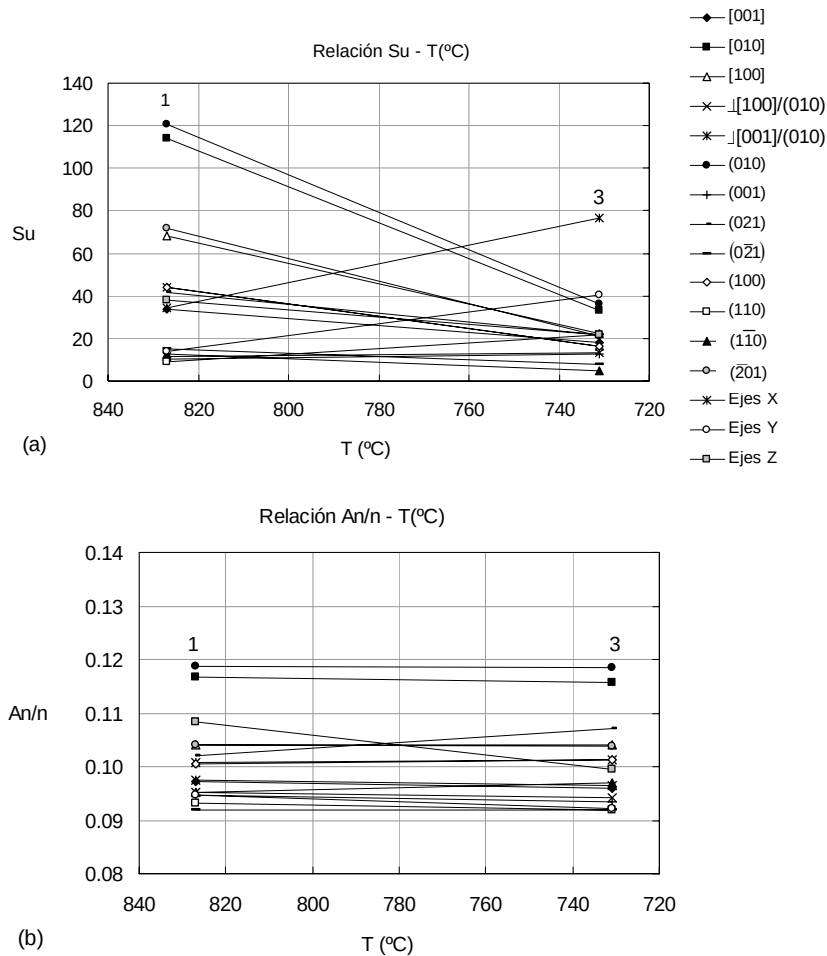


Fig 4.38. Estadísticos de uniformidad frente a la temperatura de deformación de las muestras 1 y 3. (a) Bingham (S_u). (b) Ajne normalizado (An/n). En el caso de S_u todos los elementos se alejan de la uniformidad con el incremento de temperatura, sobre todo [010] y (010), excepto dos casos muy claros en los que sucede lo contrario, los ejes X e Y. En el caso de An/n todos los elementos se mantienen prácticamente invariables con los cambios de temperatura, sólo en el caso de (021) se produce un ligero aumento con el descenso de temperatura, mientras que en el caso de los ejes Z ocurre lo contrario. En cualquier caso, los cambios son casi inapreciables.

Todo lo comentado para los gráficos de arriba, de Su y An/n frente a la temperatura, se aprecia también muy bien frente a la distancia (fig.4.39). En el caso de Su frente a la distancia, este parámetro descende para todos los elementos cristalográficos desde la muestra 1 a la 4. Se observa, sin embargo, un importante incremento para (021) de la muestra 2 y ejes X de la muestra 3, especialmente. De la muestra 4 a la 5, es decir, hacia muro de la serie de las metabasitas, se produce un fuerte aumento de Su . En cuanto a An/n frente a la distancia, las variaciones son bastante menores que para Su , solo en el caso de los ejes X para las muestras 3 y 4 se produce un cambio significativo hacia un notable incremento de An/n .

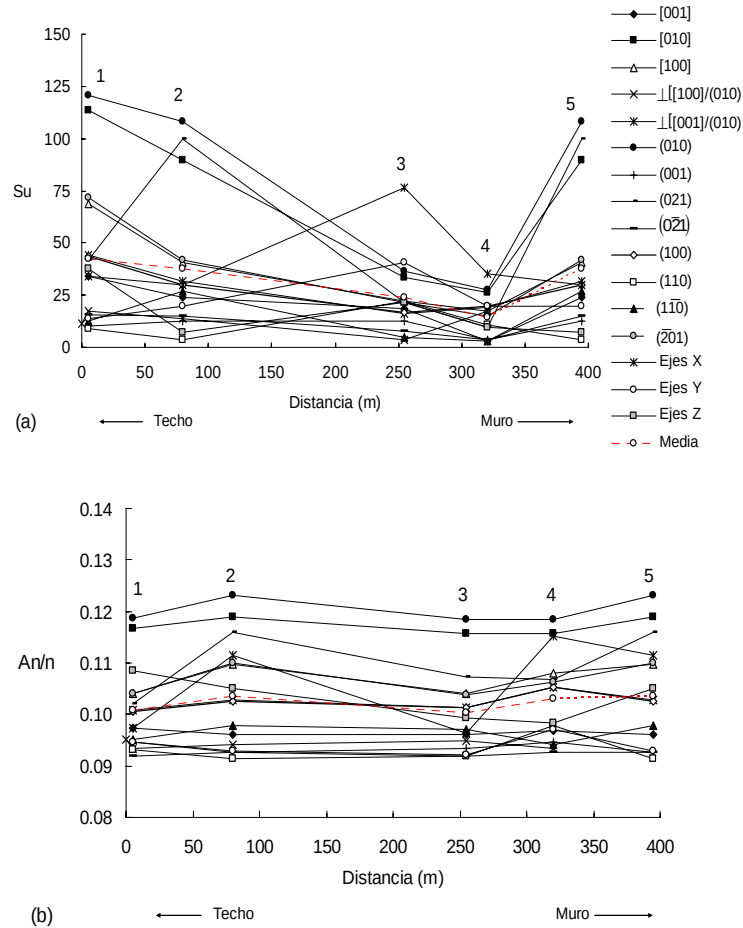


Fig.4.39. (a) Su frente a la distancia. Las trayectorias siguen un patrón según el cual Su descende para todos los elementos cristalográficos desde la muestra 1 a la 4 (excepto, sobre todo, para (021) de la muestra 2 y ejes X de la muestra 3). De la muestra 4 a la 5 se produce, sin embargo, un aumento muy claro de Su . (b) An/n frente a la distancia. Las variaciones son bastante menores que en (a), solo en el caso de los ejes X para las muestras 3 y 4 se produce un cambio significativo. La línea discontinua en (a) y (b) representa la media aritmética.

4.3.6. Gráficos de Woodcock

La descripción que a continuación sigue, atiende a los mismos criterios que se siguieron para el corte de Almonaster la Real, es decir, se describe lo que se observa en los diagramas de Woodcock desde un punto de vista cualitativo e independientemente de los resultados que se hayan obtenido en los test de bondad de ajuste a la distribución de Watson. Al igual que en Almonaster la Real, en los diagramas se señalan con diferente traza las trayectorias de las curvas que unen aquellos elementos para los que se han obtenido distintos niveles de ajuste a la distribución de Watson.

Se seguirá la misma forma de describir los diagramas, agrupándolos por elementos cristalográficos que se asemejan entre sí (fig.4.40). Los autovalores y la relación logarítmica entre ellos para cada elemento cristalográfico, y su representación en los diagramas de Woodcock, quedan reflejados en el apéndice C4.

- $\perp [100]/(010)$ y (001)

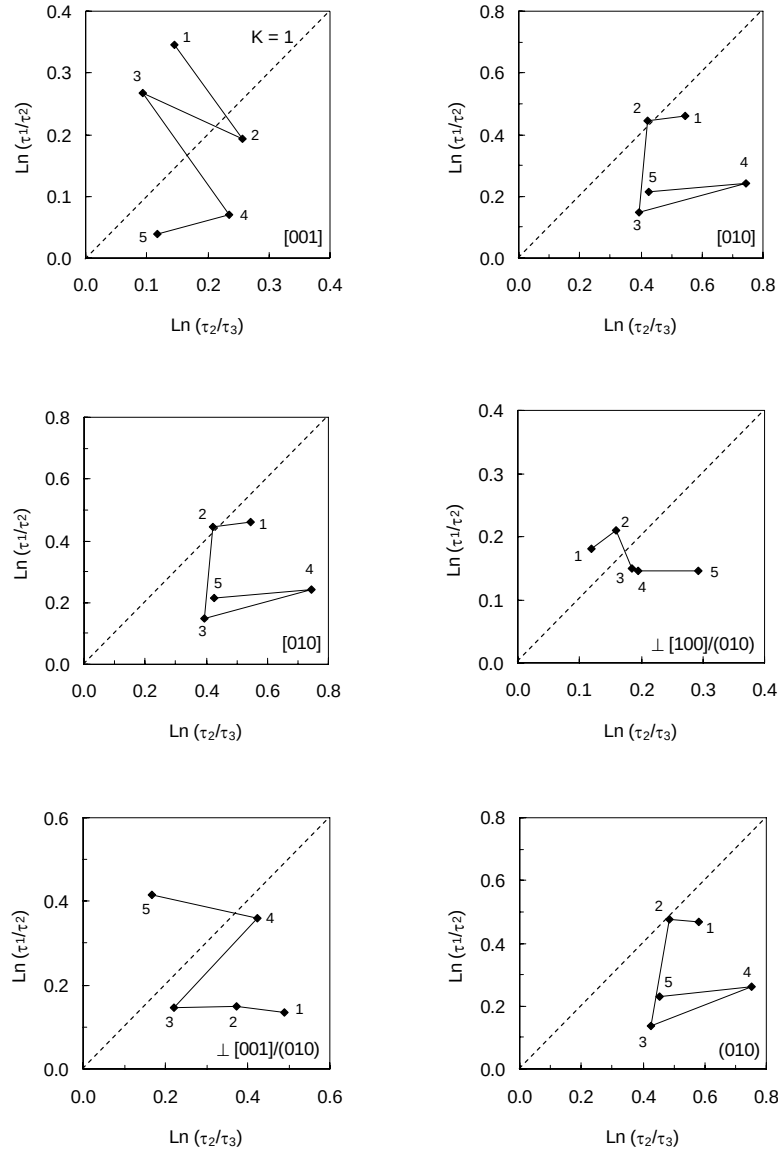
Todas las muestras, excepto la 1 y 2, se sitúan en el campo de las coronas. En líneas generales, todas ellas, excepto la muestra 5, se localizan muy cerca de la línea divisoria de campos, sobre todo las muestras 2 y 3. Esto significa que presentan un patrón de distribución en el que apenas cambia la forma de la distribución. De hecho, la muestra 1 evoluciona a la 2 paralelamente a $K=1$, lo que indica igual patrón de distribución en máximos, pero mayor intensidad de la fábrica para la muestra 2. Esta última atraviesa al campo de las coronas (muestras 3 y 4) perpendicularmente a la divisoria de campos, lo que indica un cambio en el patrón de distribución pero no en la intensidad del grado de orientación preferente de la fábrica. Y finalmente, la muestra 5 se adentra más en el campo de las coronas, y lo hace paralelamente al eje de abscisas.

- $[010]$, (010) y (021)

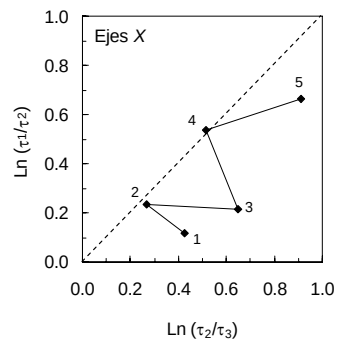
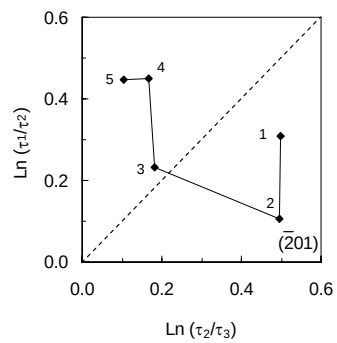
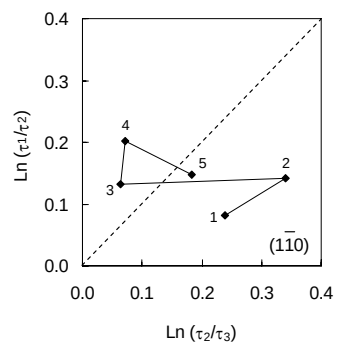
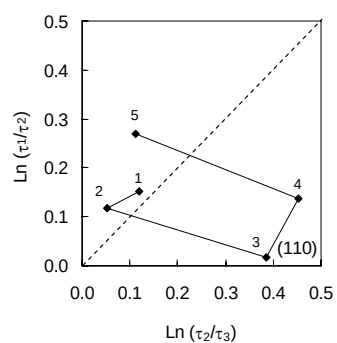
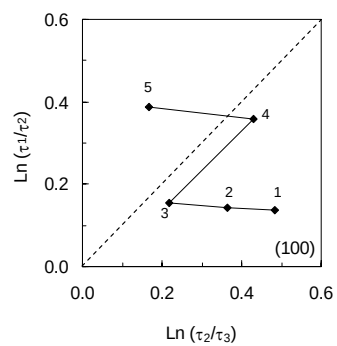
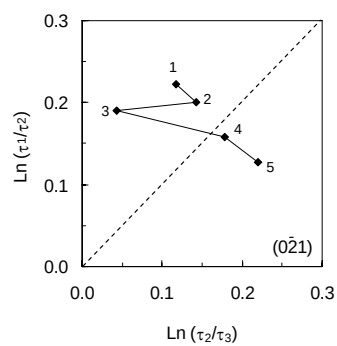
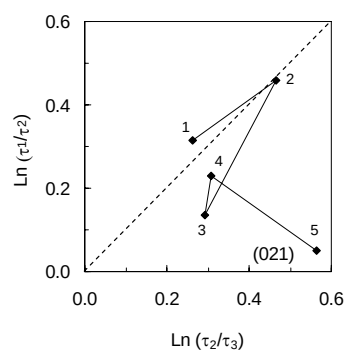
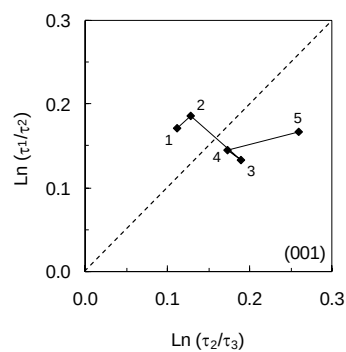
Mientras que en Almonaster la Real los tres gráficos se parecerían bastante, aunque más los de los elementos $[010]$ y (010) que el de (021) , aquí en Veredas, sin embargo, el plano (021) difiere enormemente de los otros dos elementos cristalográficos. De hecho, se tratará como un caso independiente que nada tiene que ver con los otros dos.

Los diagramas de $[010]$ y (010) son idénticos. Todas las muestras se sitúan en el campo de las coronas, excepto la muestra 2 que lo hace sobre la propia línea divisoria de campos. Las trayectorias entre las muestras son bastante verticales, paralelas al eje de abscisas, excepto la evolución de la muestra 2 a la 3, que es subparalela al eje de ordenadas. La evolución que siguen las muestras es la siguiente: la muestra 1 evoluciona a la muestra 2 paralelamente al eje horizontal, desde el campo de las coronas al de los máximos, pero sin llegar a adentrarse en él. La muestra 3 supone, respecto a la 2, una evolución paralela al eje vertical, hacia una distribución claramente en corona más completa y disminuyendo, al mismo tiempo, el grado de orientación preferente de la fábrica. La muestra 4

representa una distribución similar a la de la muestra 3, pero con una OCP mejor desarrollada. Finalmente, la muestra 5, situada a muro, retrocede paralelamente al eje de abscisas acercándose a la divisoria de campos y disminuyendo muy claramente la intensidad de su fábrica.



(continúa)



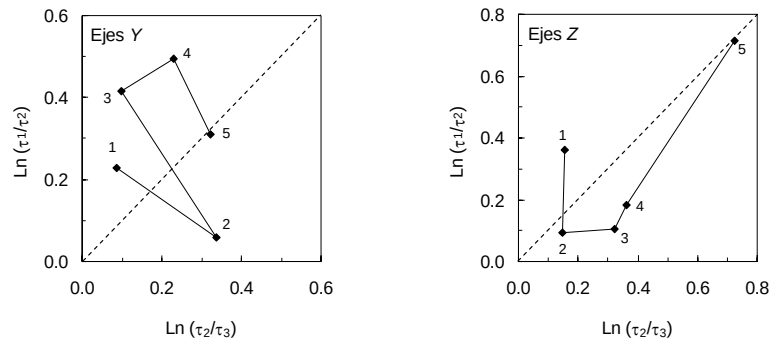


Fig 4.40 (continuación). Gráficos de Woodcock. Igual que en los diagramas de densidad de polos, podemos distinguir cuatro grupos de elementos cristalográficos que presentan un gran similitud: $\perp[100]/(010)$ y (001) ; $[010]$, (010) y (021) ; $[100]$ y $(\bar{2}01)$; y $\perp[001]/(010)$ y (100) . La línea discontinua representa la divisoria de campos ($K=1$) de la distribución en corona ($K<1$) y de la distribución en máximos ($K>1$). La muestra, cuanto más se aleja del origen de ordenadas, aumenta su intensidad de fábrica (su orientación cristalográfica preferente, OCP). Los valores de abscisas y ordenadas para cada punto se resumen en el apéndice C4.

En cuanto a (021) , todas las muestras se sitúan en el campo de las coronas, excepto la muestra 2, que se sitúa sobre la divisoria de campos, y la muestra 1, que se adentra ligeramente hacia el campo de los máximos. La muestra 3 representa, respecto a la suprayacente, una evolución hacia el campo de la coronas y, sobre todo, un descenso muy importante en la intensidad de la fábrica. Vuelve a aumentar ligeramente la OCP en la muestra 4 aunque se sitúa en una zona de coronas más incompletas que la muestra 3. Por último, la muestra 5 evoluciona perpendicularmente a $K=1$ y lo hace hacia una corona mucho mejor definida y hacia una intensidad de fábrica mayor también.

- $[100]$ y $(\bar{2}01)$

La trayectoria de ambos elementos es la misma, en forma de *artesa*. Las muestras 1 y 2 se sitúan en el campo de la coronas, representando el primer caso una corona más incompleta pero con una mayor intensidad de fábrica que en el caso de la muestra 2. Esta última evoluciona casi perpendicularmente a $K=1$ hacia la muestra 3, la cual se sitúa sobre la divisoria de campos. De aquí se adentra paralelamente al eje de ordenadas, hacia las distribuciones en máximos, aumentando también el grado de orientación preferente (muestra 4). Y finalmente, la muestra 4 pasa a muro (muestra 5) hacia una distribución también en máximos, pero más completos.

- $\perp[001]/(010)$ y (100)

Los gráficos de estos dos elementos son exactamente iguales, con las trayectorias en forma de “Z”. Todas las muestras, excepto la 5, se sitúan en el campo de las coronas. Las tres primeras muestras evolucionan paralelamente al eje de abscisas, acercándose a la divisoria de campos, es decir, disminuyendo progresivamente el grado de orientación preferente de la fábrica y definiendo coronas peor desarrolladas desde la muestra 1 a la 3. La muestra 3 evoluciona hacia la 4 alejándose del origen de coordenadas paralelamente a la divisoria de campos, y aumentado muy notablemente el grado de

orientación preferente de la fábrica. En último lugar, la muestra 4 cambia hacia muro (muestra 5) hacia una distribución en máximos, y lo hace paralelamente al eje de abscisas.

- [001]

Las muestras 1 y 3 se sitúan en el campo de los máximos, mientras que las muestras 2, 4 y 5 lo hacen en el de las coronas. La evolución que se observa en las muestras es en forma de zig-zag, con las trayectorias casi perpendiculares a la línea divisoria de campos. De techo a muro, las muestras van cambiando de un campo de distribución a otro, al tiempo que los patrones se van a cercando progresivamente al origen de ordenadas, sobre todo en el caso de la muestra 5. Esto implica que la intensidad de la orientación preferente de la fábrica disminuye de techo a muro de la serie.

- $(0\bar{2}1)$

Hacia techo (muestras 1, 2 y 3) se localizan en el campo de las distribuciones en máximos y hacia muro (muestras 4 y 5) en el de las coronas. Las muestras 2 y 4 se sitúan muy próximas a la divisoria de campos. La evolución de las muestras es perpendicular a $K=1$, excepto en la trayectoria de las muestras 2-3 que es casi paralela al eje de abscisas. En líneas generales, y de techo a muro de la serie, las muestras van pasando del campo de los máximos al de las coronas de forma progresiva y casi lineal, con una pequeña excepción en la muestra 3. Aunque la forma de la distribución cambia, el parámetro S (*strength*) del grado de orientación cristalográfica preferente se mantiene casi igual, sobre todo para la parte media-baja de la serie.

- (110)

Las muestras 1, 2 y 5 se sitúan en el campo de las distribuciones en máximos, aunque la 1 y 2, sobre todo la primera de ellas, se aproximan mucho a la línea divisoria de campos. Las muestras 3 y 4 se adentran bastante en el campo de las coronas, y en el caso de la 3 se localiza muy cercana al eje de abscisas, describiendo una corona mejor definida y más completa que en el caso de la muestra 4. La evolución general, de techo a muro, es de un cambio de distribuciones en máximos a coronas hacia la parte media de la serie y un retroceso nuevamente hacia el campo de los máximos cuando se alcanza la parte baja o muro de la base (muestra 5), y lo hacen describiendo trayectorias casi perpendiculares a $K=1$, es el caso de la evolución de las muestras 2-3 y de 4-5. Hacia la parte media-baja de la serie aumenta muy notablemente la intensidad del grado de orientación de la fábrica.

- $(1\bar{1}0)$

Las muestras 3 y 4 se localizan en el campo de los máximos y el resto en el de las coronas, acercándose la muestra 5 a $K=1$. Hacia techo de la serie (muestras 1 y 2) el patrón de forma de la distribución se mantiene prácticamente constante, pero en el caso de la muestra 2 la corona es más incompleta y aumenta significativamente la intensidad de la fábrica respecto a la muestra situada inmediatamente por encima de ella. La tendencia de la muestra 2 hacia la 3 evoluciona paralelamente al eje de abscisas adentrándose en el campo de las distribuciones en máximos (muestra 3) y

disminuyendo notablemente el grado de intensidad de la OCP. Ésta cambia a la muestra 4 paralelamente al eje vertical, alejándose del origen de coordenadas. Finalmente, la muestra 4 pasa a la 5 perpendicularmente a la divisoria de campos e introduciéndose en el campo de las coronas.

- Ejes X

Este caso de trayectorias en *zig-zag* recuerda al de [001], pero en este caso la intensidad de la fábrica aumenta de techo a muro y no al revés, como sucedía en [001]. Otra diferencia es que en el caso de los ejes X todas las muestras se sitúan en el campo de las distribuciones en corona. Las muestras 2 y 4 se localizan muy cercanas a la línea $K=1$ y el resto de las muestras (1, 3 y 5) representan coronas que se van haciendo más completas y mejores definidas de muro a techo de la serie.

- Ejes Y

Sólo la muestra 2 se sitúa en el campo de las coronas, mientras que el resto lo hace en el de los máximos, y la muestra 5 sobre la divisoria de campos. Todas las trayectorias, excepto la de la muestra 3-4, son aproximadamente perpendiculares a $K=1$; por ejemplo, la muestra 1, que se sitúa en el campo de los máximos, pasa a la 2, que se localiza en el de las coronas. Y la muestra 2, nuevamente, vuelve al campo de los máximos (muestra 3). La tendencia general es hacia un aumento de la intensidad de la fábrica de techo a muro, salvo para la muestra 5 en donde disminuye y además se acerca, sin llegar a adentrarse, al campo de las distribuciones en corona.

- Ejes Z

El gráfico describe un patrón en *artesa* muy acusado. Sólo la muestra 1 se sitúa en el campo de las distribuciones en máximos y el resto en el de las coronas. La muestra 1 pasa a la 2 paralelamente al eje Y, cambiando del campo de los máximo al de las coronas, y aproximándose al origen de ordenadas, con lo que esto indica que desciende la intensidad de la orientación preferente de la fábrica. La muestra 2 pasa a la 3 paralelamente al eje de abscisas y adentrándose un poco más en el campo de las coronas hacia una corona mejor definida. A partir de la muestra 3, y hacia muro de la serie, las muestras 4 y 5 evolucionan casi en paralelo a $K=1$, alejándose del origen linealmente, hacia coronas más incompletas, sobre todo para la muestra 5. En líneas generales, la intensidad de la fábrica aumenta hacia muro, desde las muestras 2 a la 5. La muestra 1 supone una excepción en la que aumenta también respecto a la muestra situada inmediatamente por debajo de ella (muestra 2).

En resumen, y por comparación con los resultados del corte de Almonaster la Real, en el corte de Veredas predominan los patrones de tipo 2 de proyección de las muestras en el diagrama de Woodcock. Las medidas de tipo q sólo se encuentran como parte de una tendencia más general de tipo 2, como se observa, por ejemplo, en el diagrama correspondiente a los ejes Z. Se puede concluir, por tanto, que las transiciones de fábrica en Veredas se manifiestan por cambios muy acusados en la

geometría o diseño de la fábrica cristalográfica, siendo las variaciones en intensidad de menor importancia.

4.3.7. Gráficos SD (*Strength* frente a Distancia)

Cabe esperar que en estos gráficos (fig.4.41) se observen las mismas similitudes entre diferentes elementos cristalográficos, al igual que sucedió en los diagramas de densidad y de Woodcock. Es el caso, una vez más, de los siguientes grupos: $\perp [100]/(010)$ y (001); [010], (010) y (021); [100] y ($\bar{2}01$); $\perp [001]/(010)$ y (100).

En cuanto a los diagramas *S* (*Strength*) frente a la distancia con respecto al techo de la lámina de metabasitas, en unos casos son similares a los de *Su* frente a la distancia (fig.4.37a), como también ocurría en Almonaster la Real, y en otros casos se parecen más, sin embargo, a los de *An/n* frente a distancia (fig.4.37b). La muestra 4 representa un punto de inflexión importante en las trayectorias de la evolución de todos y cada uno de los elementos cristalográficos del corte de Veredas.

- $\perp [100]/(010)$ y (001)

Se observa un aumento muy suave y progresivo, casi lineal, en el grado de orientación preferente de la fábrica de techo a muro de la serie, especialmente en la muestra 5.

- [010], (010) y (021)

La semejanza se produce entre los gráficos de los elementos [010] y (010), mientras que en el caso de (021) las diferencias respecto a los dos anteriores son notables. Para los dos primeros casos, la intensidad de la fábrica disminuye significativamente y casi de forma linear, desde las muestras 1 a la 3, aumenta bruscamente para el caso de la muestra 4 y vuelve a descender hacia muro de la serie (muestra 5). Sin embargo, para (021), el grado de orientación preferente aumenta notablemente para la muestra 2 y no para la 4. Para (021), la tendencia es hacia un aumento de la OCP hacia muro de la serie, observándose un incremento lineal en las muestras 3, 4 y 5, es decir, hacia muro.

- [100] y ($\bar{2}01$)

Para ambos elementos se observa lo mismo. Disminuye el grado de orientación de la fábrica desde el techo hacia la parte media de la serie (muestras 1 a 3), vuelve a aumentar para la muestra 4 y disminuye ligeramente hacia muro nuevamente (muestra 5).

- $\perp [001]/(010)$ y (100)

Se observa un patrón muy similar, casi idéntico, a lo que se veía en (c), pero en este caso la muestra 4 presenta un aumento de la OCP ligeramente mayor respecto a las muestras que se encuentran por encima en la serie, es decir, las muestras 1, 2 y 3.

- [001]

Se aprecia un descenso progresivo, de techo a muro, del grado de orientación preferente de la fábrica, sobre todo para la muestra 5.

- $(0\bar{2}1)$

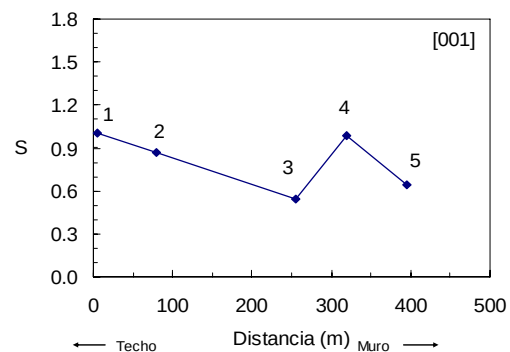
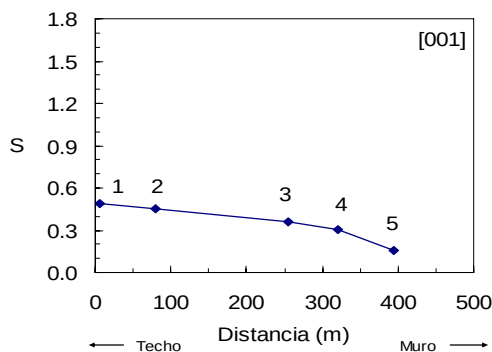
La intensidad de la fábrica se mantiene prácticamente constante para todas las muestras del corte, excepto para la muestra 3 en la que disminuye. Es por ello que puede decirse que la OCP se hace menor, en el caso de este elemento, para la parte media de la serie.

- (110)

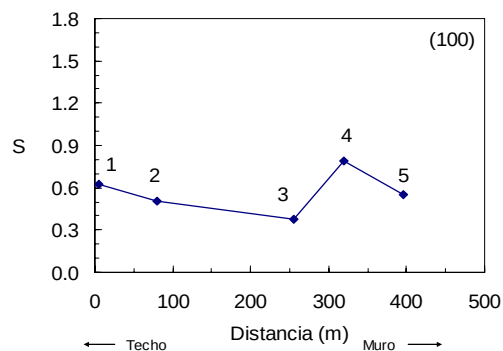
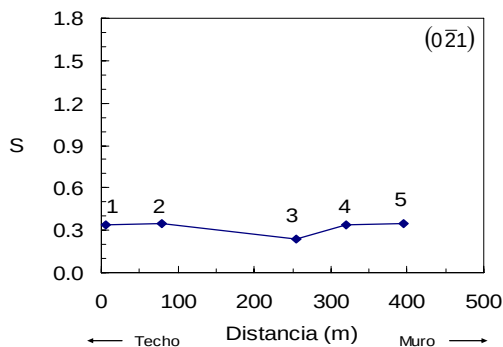
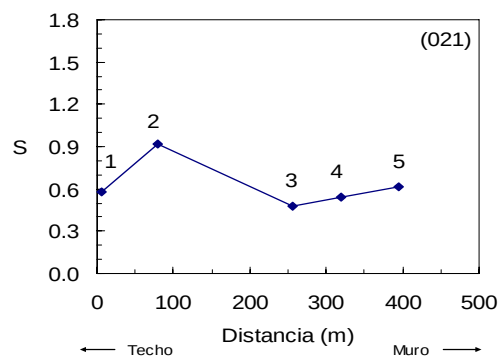
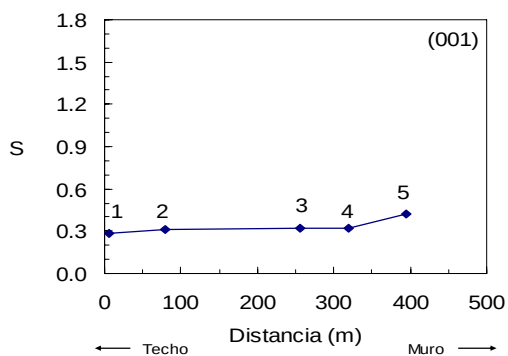
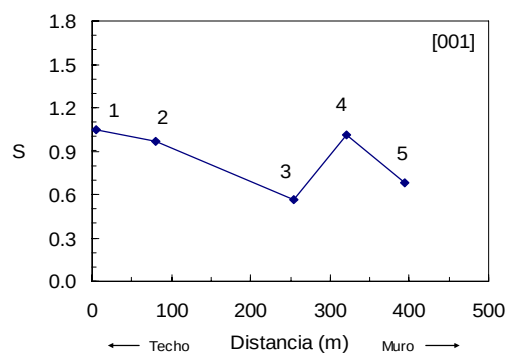
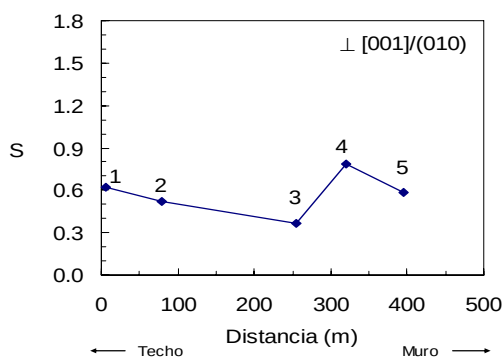
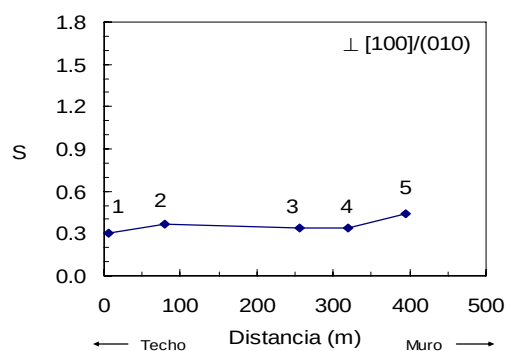
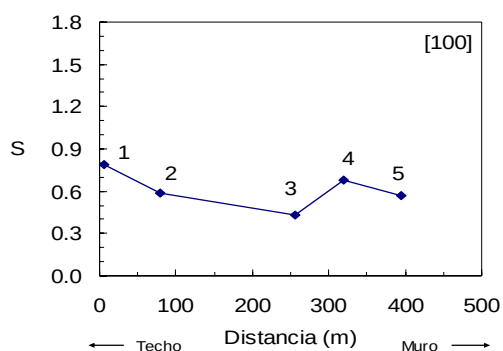
Se parece bastante a los gráficos de los casos (c) y (d), salvo en la tendencia de la muestra 3. Dicha muestra representa un aumento, y no un descenso, en el grado de la orientación de la fábrica. Y al igual que ocurría en (d), la muestra 4 representa un aumento significativo de la OCP en comparación a las muestras situadas inmediatamente por encima y por debajo de la serie.

- $(1\bar{1}0)$

La evolución que se observa en este elemento se parece enormemente a (021), a pesar de que: (1) en Almonaster la Real esto nunca sucedió, ni en los diagramas de densidad ni en los de Woodcock, (2) los diagramas de densidad de polos de (021) en Veredas se parecen muchísimo a los de los elementos [010] y (010) y no al de $(0\bar{1}0)$, y (3) el diagrama de Woodcock de (021) para el caso de Veredas no se parece en nada al de [010] y (010), aunque tampoco se parece al de $(1\bar{1}0)$. A pesar de todo esto, las trayectorias de los gráficos S frente a la distancia para (021) y $(1\bar{1}0)$ son iguales, aunque en el caso de este último elemento la intensidad de la fábrica es, en líneas generales, menor que para el primero. Es de destacar el aumento significativo de la OCP para la muestra 2 y un descenso, también notable, para la muestra 3, a partir de la cual vuelve a aumentar la intensidad de la orientación preferente hacia muro de la serie, y lo hace de modo lineal.



(continúa)



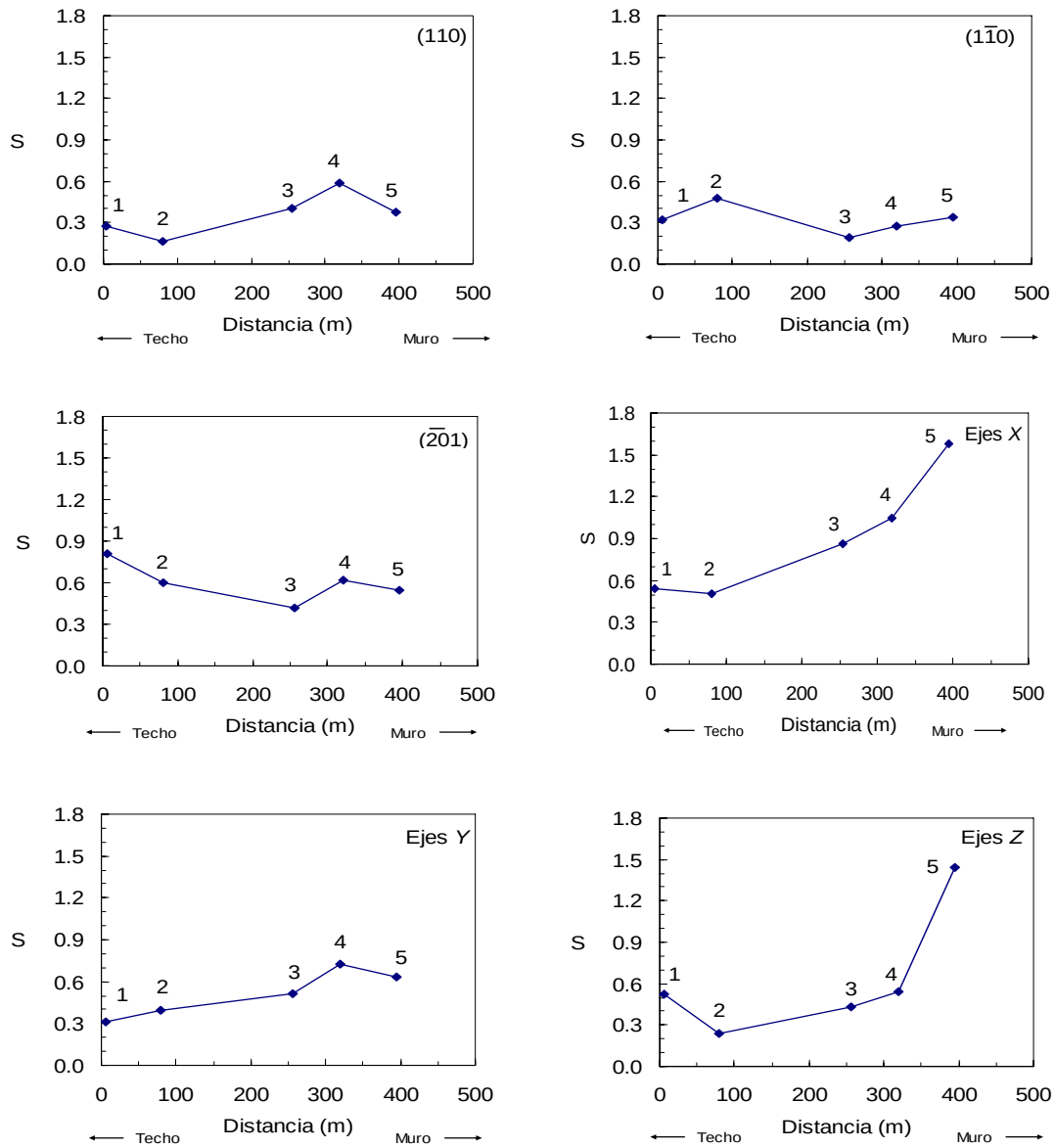


Fig. 4.41 (continuación). Gráficos S (Strength) frente a la distancia, con la misma escala vertical para una mejor comparativa. En estos gráficos se observan las mismas similitudes que el los diagramas de densidad y los de Woodcock. Es el caso de los siguientes cuatro grupos: (a) $\perp[100]$ y (001) , (b) $[010]$, (010) y (021) , (c) $[100]$ y $(\bar{2}01)$, y (d) $\perp[001]$ y (100) . Estos gráficos son muy similares, prácticamente iguales, a los de Su frente a la distancia (fig.4.39a). Ver texto para más detalle.

- Ejes X

En las trayectorias se observa una tendencia ascendente y progresiva de techo a muro de la serie, lo cual indica un claro aumento de la OCP hacia muro de la misma. Éstas dibujan una tendencia

ligeramente cóncava hacia arriba, en forma de *artesa*. La tendencia general de las fábricas de ejes X es justamente la contraria, por poner un ejemplo, a lo que sucedía para [001].

- Ejes Y

La trayectoria es semejante a la del elemento [110], aunque con una única diferencia en la tendencia de las muestras 1-2. En líneas generales, la intensidad de la OCP es ligeramente mayor en los ejes Y que en [110].

- Ejes Z

Se parece al gráfico de los ejes X, aunque en este caso la trayectoria describe un patrón en *artesa* más acusado. La intensidad de la fábrica disminuye hacia la parte media de la serie y aumenta hacia techo y especialmente hacia muro.

Como resumen, podemos decir que las muestras 1 y 4 suelen ser las que presentan mayores diferencias en cuanto a su posicionamiento en los diagramas de los diferentes elementos cristalográficos. En cuanto a la muestra 1, sólo para los elementos $\perp [100]/(010)$, (001), (021), $(1\bar{1}0)$ y los ejes Y, dicha muestra presenta una intensidad de fábrica menor a la muestra situada inmediatamente por debajo de ella (la muestra 2). En cuanto a la muestra 4, es importante destacar que supone un punto de inflexión destacado en la evolución de los elementos [010], [001], $\perp [001]/(010)$, (100), (110), $(\bar{2}01)$ y ejes Y, hacia un aumento de la intensidad de la OCP respecto a las muestras situadas por encima y por debajo (muestras 3 y 5, respectivamente).

En cuanto al gráfico de *S* frente a la distancia (fig.4.39) es muy similar (por no decir que prácticamente igual) al de *Su* frente a la distancia. Resulta claro que *S* desciende para todos los elementos cristalográficos hacia la parte media de la lámina de metabasitas (muestra 3), aunque luego aumenta ligeramente (muestra 4) para volver a descender en la base de la lámina (muestra 5). A esta tendencia general escapan las fábricas de los ejes X y Z y algunas más, aunque con menor intensidad. Si consideramos el valor medio de *S* como fábrica general representativa de cada muestra, el patrón final (fig.4.42b) presenta forma en *artesa* y es semejante al observado en Almonaster la Real.

Haciendo referencia al gráfico *S* frente a la temperatura (fig.4.42a), en el que sólo se representan las muestras para las que se tienen datos de esta variable (muestras 1 y 3), se observa también un patrón exactamente igual al de *Su*. Para estas dos muestras, la intensidad de la fábrica desciende con el descenso de la temperatura, desde los 827°C de la muestra 1 hasta los 731°C de la muestra 3. Esto ocurre para todos los elementos excepto para los ejes X e Y.

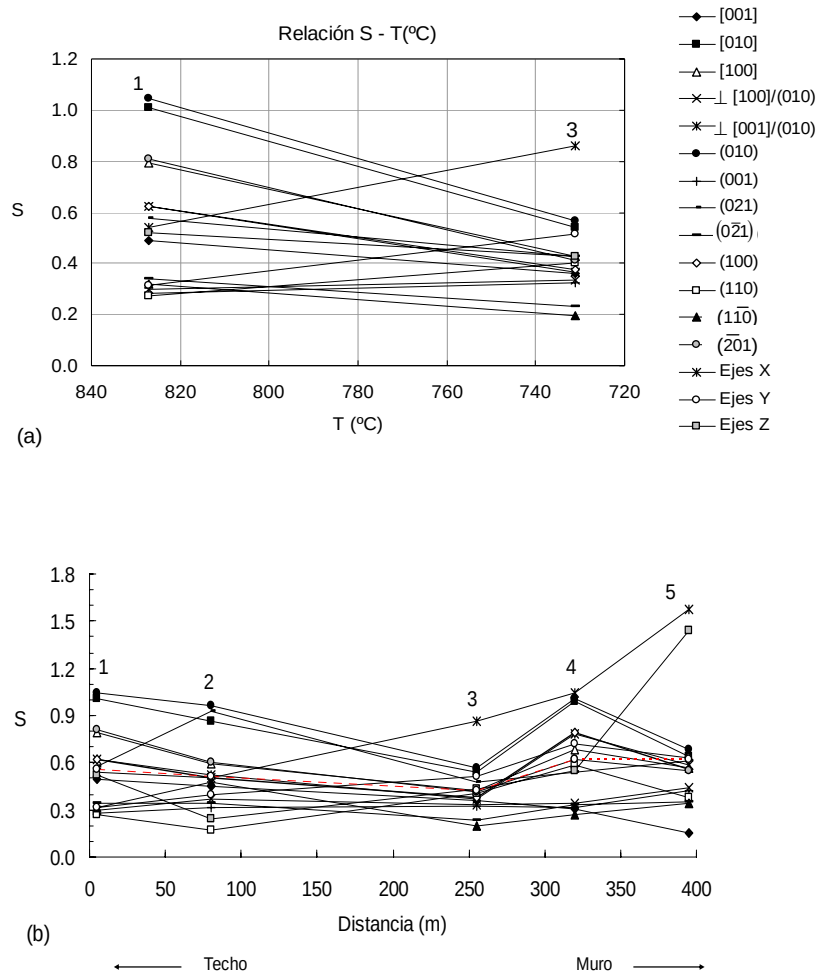


Fig.4.42. (a) S (Strength) frente a la temperatura de deformación para las muestras 1 y 3. Es prácticamente igual al de Su frete a la temperatura (fig.4.38a). La intensidad de la fábrica descende con el descenso de temperatura, excepto para los ejes X e Y en donde ocurre lo contrario y aumenta el parámetro S. (b) S (Strength) frente a las distancia. La leyenda es la misma que en (a) y se incluye, además, la media aritmética (línea discontinua). Las trayectorias de los distintos elementos son muy similares, disminuyendo de las muestra 1 a la 3 para aumentar hacia la muestra 4. De esta última hacia el muro (muestra 5) S vuelve a disminuir su valor excepto para los ejes X y Z, en los que se observa un aumento muy brusco en la intensidad de la fábrica. La trayectoria de los ejes X es la que más difiere del resto, presentando un patrón lineal ascendente.

4.3.8. Gráficos S_u , An/n y S (valores medios y desviación estándar) frente a la distancia

En este apartado se procede a explicar, al igual que se hizo en el caso de Almonaster la Real, los valores promedios de los estadísticos según la media aritmética y la desviación estándar obtenidas para cada uno de las muestras (ver apartado 3.6.7). La media aritmética se representa con círculos huecos incluidos dentro del área sombreada, que recoge la dispersión de valores de todos los elementos cristalográficos para cada estadístico. La desviación estándar se marca según unas barras de error verticales. Las líneas continuas unen los valores medios de cada muestra.

Estadístico de Bingham (S_u)

Los valores medios del estadístico S_u descienden de techo a muro, excepto para la muestra 5 en donde vuelve a aumentar alejándose de la uniformidad al igual que en la muestra 1 (fig.4.43). La muestra 4 es la que se aproxima más a la uniformidad, con un valor medio de S_u de 14.18. Además, esta muestra presenta el valor de desviación estándar más pequeño (10.03) y coincide con un pico clarísimamente descendente, o en forma de *valle*, en la zona sombreada. Los valores de desviación estándar mayores corresponden a las muestras 1, 2 y 5 (35.11, 32.63 y 32.00, respectivamente). En líneas generales, la curva de la media aritmética presenta forma de *artesa*. Observando la zona sombreada también se aprecia esa misma forma si no fuera por el pico ascendente que aparece sobre la vertical de la muestra 3.

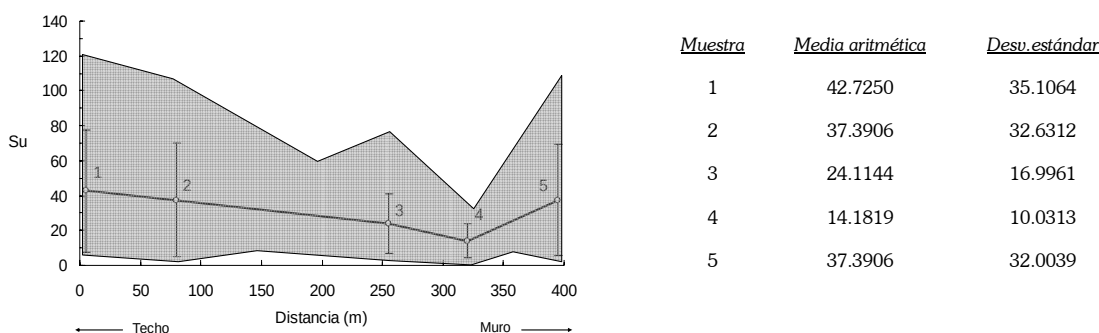


Fig.4.43. Gráfico de valores medios (media aritmética) y desviación estándar de S_u frente a la distancia. La media aritmética se representa por la línea continua que une las muestras (círculos huecos). Las líneas verticales representan la magnitud de la desviación estándar en cada una de ellas. La zona sombreada recoge la dispersión en el diagrama de todos los elementos cristalográficos estudiados. A la derecha, una tabla con los valores representados. Ver texto

Estadístico de Ajne normalizado (An/n)

La uniformidad según el estadístico de Ajne se mantiene bastante constante a lo largo de todo el corte, algo que también se observó en Almonaster la Real. De hecho, los valores promedios de An/n oscilan entre 0.1002 (muestra 3) y 0.1035 (muestras 2 y 5). Los valores de la desviación estándar son también muy similares, sin grandes diferencias como se puede apreciar en la magnitud de las barras de error en cada muestra (fig.4.44). Sólo la muestra 5 presenta una desviación menor, en torno a 0.0052. La región sombreada se parece también a la de Almonaster la Real, pero en este caso no describe una forma en *artesa* tan bien definida, sino más bien una forma muy ligeramente convexa, en general bastante uniforme, sin formas de *picos* ni *valles* destacables.

Mientras que en el caso de Almonaster la Real en la tendencia de uniformidad de Ajne se parecía bastante a la de Bingham (figs.4.24 y 4.25), aquí no ocurre lo mismo, ni en la forma de la zona sombreada ni tampoco en la evolución de la curva de la media aritmética.

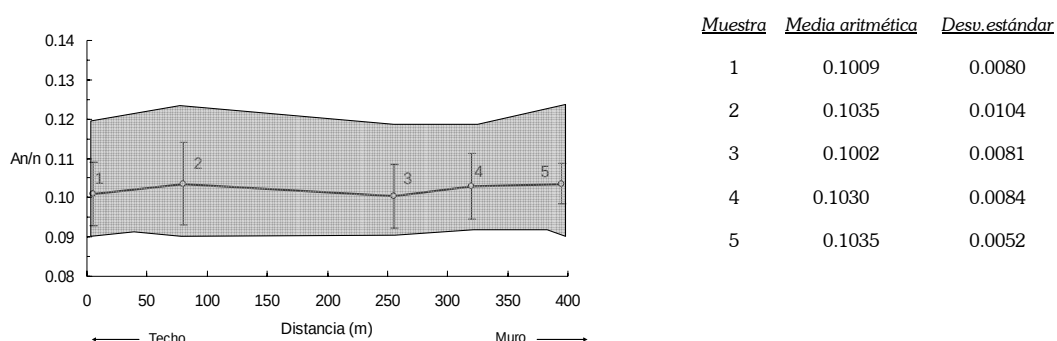


Fig. 4.44. Gráfico de valores medios (media aritmética) y desviación estándar de An/n frente a la distancia. La media aritmética se representa por la línea continua que une las muestras (círculos huecos). Las líneas verticales representan la magnitud de la desviación estándar en cada una de ellas. La zona sombreada recoge la dispersión en el diagrama de todos los elementos cristalográficos estudiados. A la derecha, una tabla con los valores representados. Ver texto.

Intensidad de fábrica o *Strenght* (S)

La curva de la media aritmética es intermedia entre la de An/n y la de Su (fig.4.45). Sin embargo, las regiones sombreadas de S y An/n en Veredas difieren entre sí. En el caso del estadístico S presenta una forma no tan uniforme como en el caso de An/n , sino que describe un patrón en forma de *artesa* bastante claro.

Para el caso de Veredas, la intensidad de la fábrica, o grado de orientación preferente, desciende ligeramente para las tres primeras muestras, desde el techo de la serie hacia la parte media (0.55 para la muestra 1 y 0.43 para la 3), y vuelve a aumentar hacia muro (0.62 para las muestras 4 y

5). En cuanto a la desviación estándar, el valor menor (0.15) se da para la muestra 3 y el mayor (0.37) para la muestra 5.

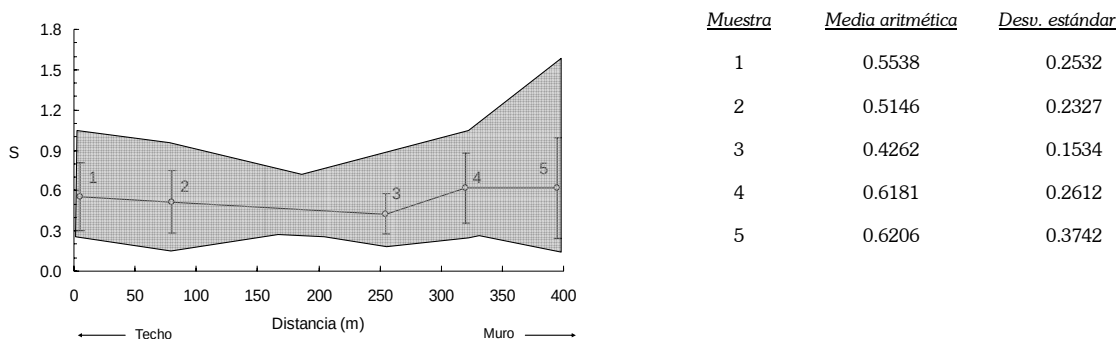


Fig.4.45. Gráfico de los valores medios (media aritmética) y la desviación estándar de S frente a la distancia. La media aritmética se representa por la línea continua que une las muestras (círculos huecos). Las líneas verticales representan la magnitud de la desviación estándar en cada una de ellas. La zona sombreada recoge la dispersión en el diagrama de todos los elementos cristalográficos estudiados. A la derecha, una tabla con los valores representados. Ver texto.

Al igual que en Almonaster la Real, las áreas sombreadas de los tres estadísticos se parecen bastante. La única que varía algo más es la de An/n . En cualquiera de los tres casos, la evolución de las curvas de las medias aritméticas presentan sistemáticamente el mismo patrón, a excepción de la muestra 4, que mientras aumenta el valor del estadístico An/n y el del parámetro S, ocurre lo contrario para el estadístico Su. En general, hacia la parte media de la de las metabasitas serie (muestra 3) se produce un incremento de la uniformidad y, por lo tanto, un descenso en el grado de orientación cristalográfica preferente de la fábrica de las muestras. Sin embargo, hacia techo aumenta la uniformidad según el estadístico An/n y disminuye, por el contrario, según el de Su. Hacia muro (muestra 5, la más fuertemente deformada por la ZCS), sin embargo, se observa una claro alejamiento de la uniformidad y, por tanto, una marcada orientación preferente para el caso del estadístico Su, mientras que para el caso de An/n se mantiene casi igual que la muestra suprayacente (muestra 4).

En líneas generales, y como ya se ha repetido en varias ocasiones, la forma típica de las zonas sombreadas es en *artesa*. Teniendo presente que hacia techo aumenta la temperatura y la deformación de la primera fase que afectó a la pila de metabasitas, y hacia muro aumenta la deformación de la segunda fase (ZCS), podemos concluir que el aumento en el grado de orientación preferente de las plagioclasas en el corte de Veredas responde a un incremento en la temperatura y/o en la intensidad de la deformación (al igual que concluimos para Almonaster la Real).

Capítulo 5

DISCUSIÓN

4.4. VARIACIÓN ESPACIAL DE TECHO A MURO ESTRUCTURAL DE LA SERIE: FÁBRICAS CRISTALOGRÁFICAS DE PLAGIOCLASAS EN LAS METABASITAS DE ACEBUCHES

En este apartado comentaremos la evolución que siguen, de techo a muro estructural de las metabasitas de Acebuches, las fábricas de los principales elementos cristalográficos de las muestras estudiadas en los cortes de Almonaster la Real y Veredas. Hemos limitado este análisis a 9 de los 16 elementos que hemos estudiado en este trabajo, concretamente a los planos (100), (010) y (001) y a las direcciones de los ejes cristalográficos ([100], [010], [001]) y de los ejes ópticos (X , Y , Z)¹ (figs.4.46 y 4.47). La razón para omitir la evolución del resto de elementos cristalográficos ha sido que en la mayoría de los trabajos sobre OCP en plagioclasas de los que se dispone a fecha de hoy, los autores sólo se centran, como mucho, en el estudio de estos 9 elementos, y no siempre en todos ellos. Seguiremos la clasificación que propusimos en la fig.4.8 sobre los tipos de distribuciones más comúnmente observadas en los diagramas de densidad, es decir, los tipos I_1 , I_2 , A_1 y A_2 .

4.4.1. Almonaster la Real

Recordemos que en este corte estudiamos un total de 7 muestras. B.0601-2, B.0601-4, B.0601-7, B.0601-11, B.0601-14, B.0601-15 y B.0601-16. A continuación veremos la evolución de las fábricas (o diagramas de densidad) para los distintos elementos cristalográficos considerados. En la fig.4.46 se muestran los diagramas para todo el corte, ordenados de acuerdo con los elementos cristalográficos que se comentan.

- (100)

La distribución a lo largo de todo el corte, de techo a muro, consiste principalmente en una distribución de tipo I_1 para todas las muestras. En algunos casos se complementa con un anillo A_1 , es el caso de las muestras 2, 11 y 14. La intensidad de la fábrica de este elemento se mantiene muy parecida a lo largo de todo el perfil, aumentado muy ligeramente de techo a muro, a excepción de la muestra 16 en la que aún siendo del tipo I_1 como el resto de muestras, aumenta drásticamente el grado de orientación preferente.

- (010)

A diferencia del caso anterior, para este elemento encontramos 4 tipos de distribuciones posibles, excepto la muestra 4 que representa una distribución en máximos. De techo a muro los diagramas de fábrica pasan indistintamente por tener una u otra, o incluso la combinación de dos diferentes. La muestra 2, junto con la 11 y la 15, tienen distribución del tipo $I_1 + I_2$. La muestra 7 presenta un patrón de tipo $A_1 + A_2$, las muestras 14 y 16 presentan patrones en I_2 . Como vemos, no existe una evolución bien definida, sino que los patrones se alternan constantemente. Lo que sí se observa es un descenso en el grado de orientación preferente de la fábrica de techo a muro, excepto para las muestras 2 y 16 que son las que se sitúan hacia los extremos de la serie.

¹ En otros trabajos y publicaciones, a los ejes de la indicatriz óptica también se les llama: α , β y γ (X , Y y Z , respectivamente, en este trabajo).

- (001)

Se trata de una fábrica no demasiado bien definida en cuanto al tipo de distribución. En general presenta bastante uniformidad, aunque en algunos casos se deja intuir una distribución de tipo I_2 , como en las muestras 2, 14 y 16. La intensidad de las fábricas aumenta hacia techo y muro, y desciende hacia la parte media de la serie (muestras 7 y 11).

- [100]

Los tipos de distribución tampoco siguen en este caso un patrón concreto, sino que es bastante aleatorio. Las muestras 2, 4, 7 y 16 presentan distribuciones del tipo I_1 , aunque sólo la muestra 2 la combina con una de tipo A_1 . Las muestras 11 y 14 presentan el caso de distribución $I_2 + A_1$. La intensidad de las fábricas aumenta de techo a muro, sin que se vea relación alguna entre esto y el tipo de distribución en anillo o corona.

- [010]

A diferencia de los elementos cristalográficos anteriores, en este caso todas las muestras tienen en común la distribución I_2 , a excepción de la 2 y la 4. En el caso de las muestras 11 y 15, se combina con otro tipo, concretamente I_1 . Sin embargo, para la muestra 7 lo hace con A_1 . La orientación cristalográfica de las fábricas aumenta de techo a muro, pero tampoco en este caso se observa una relación directa en este incremento y el tipo de distribución que desarrolla la muestra.

- [001]

En este caso los tipos de distribución son más sencillos que en los elementos vistos hasta ahora. En todos los casos se trata de un solo tipo de distribución para cada muestra y no existe el caso combinado de dos tipos como habíamos visto en casos anteriores. Las muestras 4, 15 y 16 presentan distribución I_1 . Las muestras 11 y 14 son en anillo, es decir, del tipo A; para la primera es A_1 y para la segunda es A_2 . En el caso de la muestra 7 la distribución es, sin embargo, en máximos. La intensidad de la orientación de las fábricas aumenta hacia la parte media-alta de la serie, desde la muestra 11 a la 16, mientras que para la parte alta de la serie, desde la muestra 2 a la 7, se produce todo lo contrario.

- Ejes X

Este es el único caso, hasta ahora, donde no interviene en ninguna muestra una distribución del tipo A. O bien consisten en I_1 (muestras 2, 4, 14 y 15) o en I_2 (resto de muestras, 7, 11 y 16). Es normal ver que en las muestras suelen prevalecer varios casos combinados del mismo tipo de distribución. Es común a todas las muestras encontrar una corona paralela al plano de foliación, en unos casos más completas que en otros. En general son más incompletas hacia muro de la serie. En cuanto al grado de orientación preferente, aumenta para las muestra 11, 14 y 16, mientras que para el resto disminuye.

- Ejes Y

El tipo de distribución o es en máximos (muestras 4 y 16) o es del tipo I_1 , a veces combinado, como en el caso de las muestras 7, 14 y 15 con anillos de tipo A_1 . Las OCP mejor definidas

corresponden a las muestras 2, 14 y 16. En el caso de las muestras 2 y 16 fue precisamente lo que se observó tanto en los diagramas de densidad como en los gráficos de Woodcock.

- Ejes Z

En este último caso, las muestras presentan distribuciones del tipo I_1 o A_1 . En algunos sólo prevalece la primera (muestras 2 y 11) y en otros caso se trata de una combinación conjunta con A_1 (muestras 7, 14 y 15). Las distribuciones que presentan un mayor grado de orientación preferente corresponden a las muestras 2, 15 y 16. Esta son, al igual que ocurría en los ejes Y, las que presentan según los diagramas de densidad y de Woodcock las OCP más marcadas.

En líneas generales, y para finalizar, podemos decir que el tipo de patrón de distribución que se desarrolla en cada muestra no tiene relación directa ver con el grado de concentración de polos en los diagramas de densidad (es decir, con el grado de orientación cristalográfica preferente). No se observan tampoco variaciones claras en algunos elementos con la distancia a techo o a muro de la serie de las metabasitas, ni tampoco con las condiciones e intensidad de la deformación. A pesar de ello, hay algunas tendencias remarcables en las fábricas de elementos tan significativos como (010) (fig.4.46). En efecto, en el techo de las anfibolitas, la fábrica de (010) pasa de una corona similar a las coronas cruzadas de tipo I del cuarzo (muestra 2), aunque desviada en sentido horario con respecto a E_1 , a un máximo o coronas I_2 con la misma oblicuidad (muestras 4 y 7). En la zona con menores temperaturas y deformaciones de la primera fase (muestra 11), se vuelve a reconstruir una corona cruzada de tipo I, pero desviada en sentido contrario. A medida que descendemos en la serie y aumenta la intensidad de la deformación de la segunda fase (muestras 14 y 15), la corona se va desdibujando y convirtiéndose en una corona de tipo I_1 . Finalmente, las muestras más fuertemente afectadas por la zona de cizalla Suribérica presentan una transición brusca, con la aparición de un único máximo o corona de tipo I_2 desviado de nuevo en sentido horario con respecto a E_1 . Todas estas transiciones en las fábricas, tanto bruscas como progresivas, están sin duda condicionadas por las variaciones en la deformación y en la temperatura. Precisamente estas observaciones servirán de base para la interpretación de los mecanismos de deslizamiento activos bajo las distintas condiciones de deformación y temperatura, y que se presentarán en el capítulo de discusión. El hecho de que, en determinados elementos, las variaciones de las fábricas sigan patrones relativamente coherentes (como en el caso de (010)) y en otros resulte imposible encontrar una secuencia clara (como en el caso de (001)) está reflejando probablemente la mayor o menor importancia relativa de los distintos elementos como piezas de los sistemas de deslizamiento responsables de la OCP de las plagioclasas.

4.4.2. Veredas

En este corte estudiamos un total de 5 de las 6 muestras que tomamos en el campo. Estas son: B.0602-1, B.0602-2, B.0602-3, B.0602-4 y B.0602-5. Veamos, a continuación, la evolución que siguen cada uno de los elementos cristalográficos (fig.4.47).

En el caso de (001) la distribución varía de una muestra a otra sin seguir un patrón concreto, sino más bien aleatorio, y en cada una de las 5 muestras es diferente, pasando por los dos tipos de distribución I y los dos tipos A (fig.4.47). Para el resto de elementos cristalográficos: (010), (001), ejes cristalográficos ([100], [010] y [001]) y ejes de la indicatriz óptica (X , Y y Z), los tipos de distribución en círculos mayores o menores (tipos I_1 y I_2 , respectivamente) o en anillo (tipos A_1 y A_2) que siguen las muestras son similares a los de las muestras del corte de Almonaster la Real. Por tanto, no se comentarán aquí y se tomará como referencia lo descrito en el apartado anterior (4.4.1).

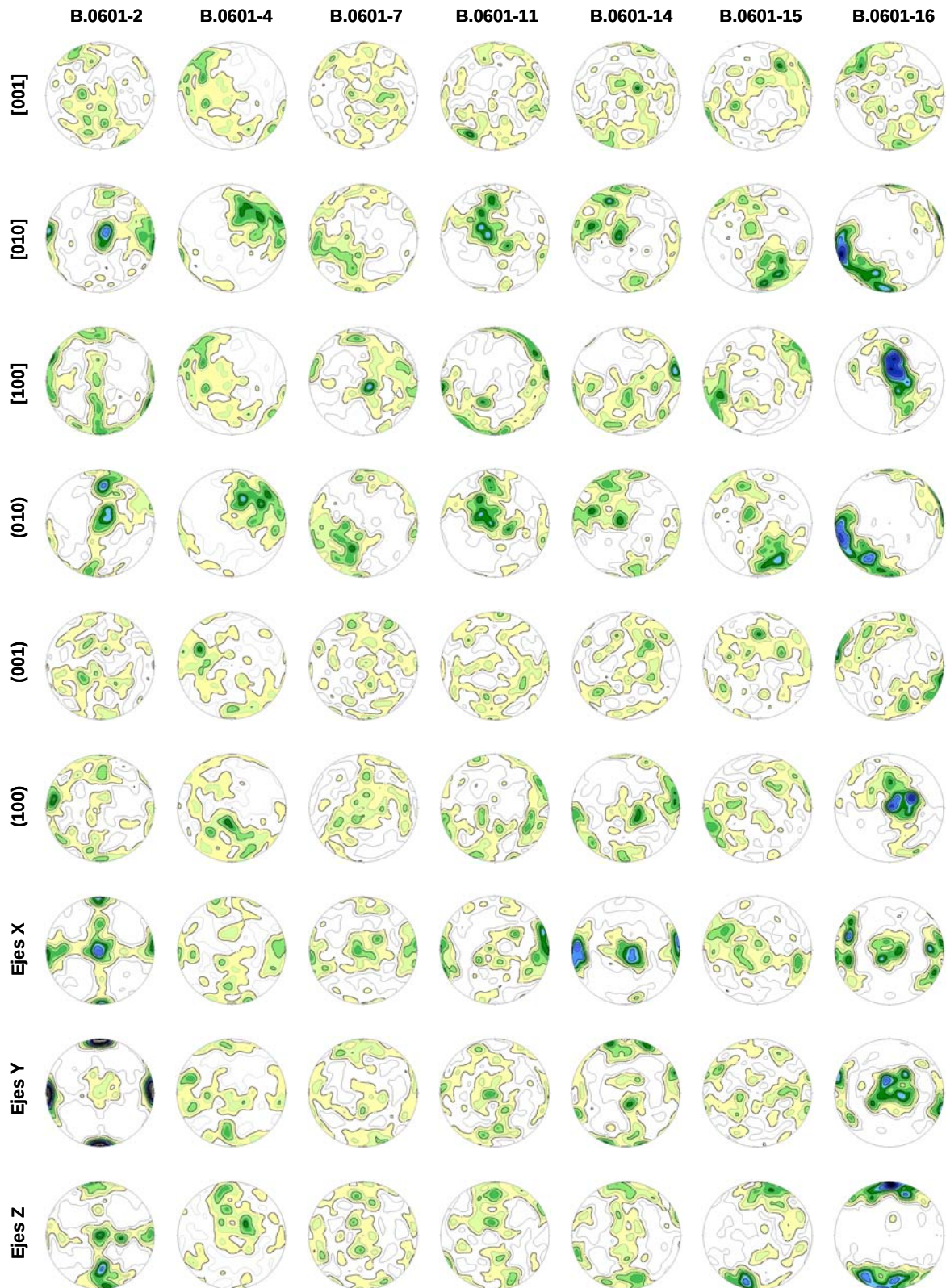


Fig.4.46. Variación espacial de las principales fábricas cristalográficas en las muestras de las metabasitas de Acebuches para el corte de Almonaster la Real. La orientación de los diagramas es la misma que en el resto de las figuras de OCP de este trabajo. La foliación está situada en la dirección E-O de la proyección y vertical. La lineación resulta de la intersección de la foliación con el primitivo. El techo se sitúa en el norte de la proyección y la dirección geográfica correspondiente al NE se sitúa a la derecha.

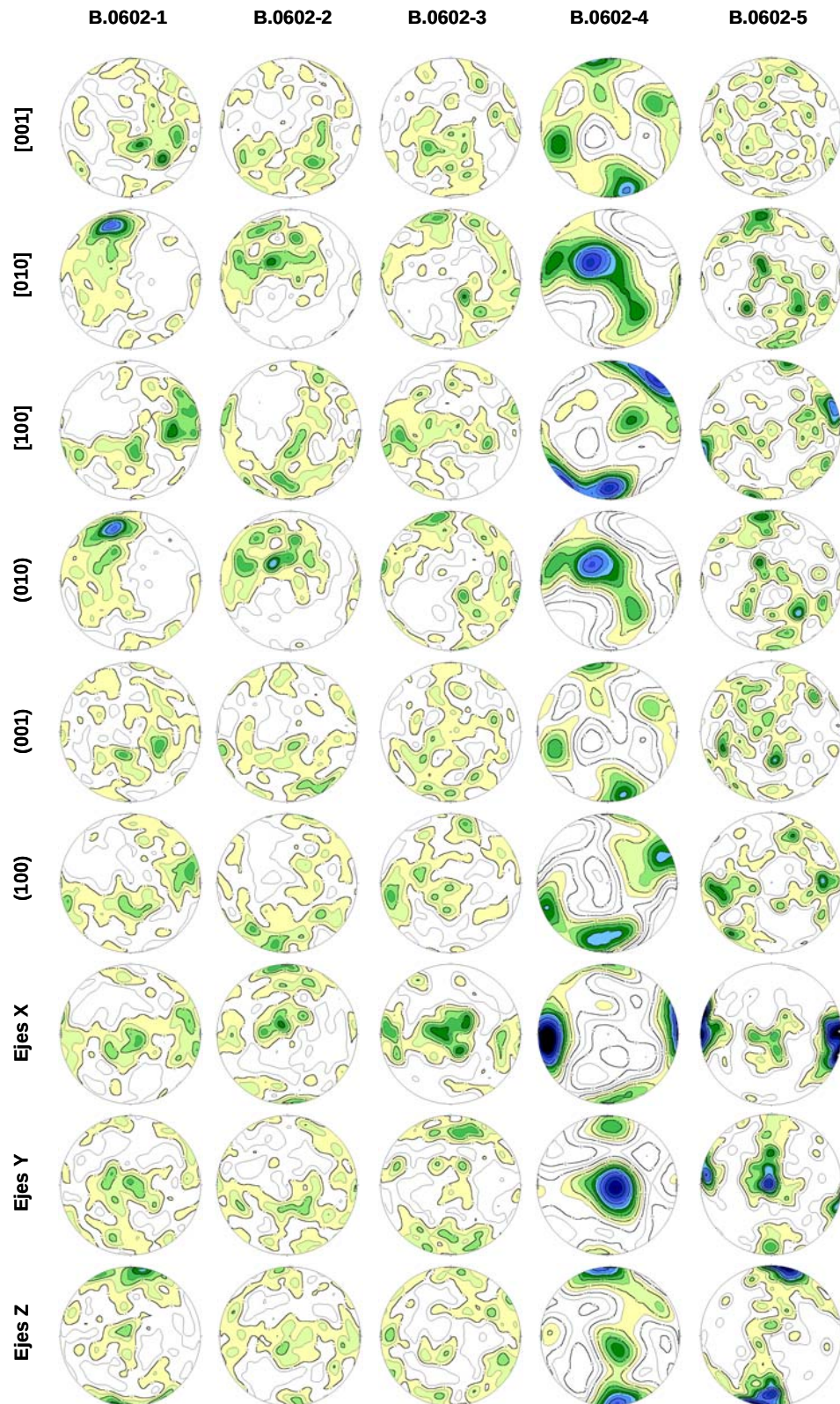


Fig.4.47. Variación espacial de las principales fábricas cristalográficas en las muestras de las metabasitas de Acebuches para el Veredas. La orientación de los diagramas es la misma que en el resto de las figuras de OCP de este trabajo. La foliación está situada en la dirección E-O de la proyección y vertical. La lineación resulta de la intersección de la foliación con el primitivo. El techo se sitúa en el norte de la proyección y la dirección geográfica correspondiente al NE se sitúa a la derecha.

5. DISCUSIÓN

Este capítulo de interpretación se divide en cuatro grandes apartados. En el primer de ellos establecemos las semejanzas y/o diferencias entre los diagramas de fábrica de los principales elementos cristalográficos con los obtenidos por otros autores. En el segundo proponemos una clasificación de los sistemas de deslizamiento más comúnmente observados en las metabasitas de Acebuches (en función de la temperatura y del efecto de la ZCS), tanto en el corte de Almonaster la Real como en el de Veredas, y las relaciones existentes entre ambos. En el tercer apartado comparamos y discutimos los sistemas de deslizamiento obtenidos a partir de los resultados de este trabajo y los sistemas propuestos por otros autores. En este sentido, conviene recordar lo expuesto en el apartado 2.5.4 sobre el conocimiento que se tiene hasta la actualidad sobre los sistemas de deslizamiento en plagioclasas. Este conocimiento será comparado con las observaciones e interpretaciones hechas por nosotros a tal respecto en este quinto capítulo. Finalmente comentamos, en una cuarta y última parte, las novedades que un estudio microestructural tan detallado como éste, sobre la orientación cristalográfica preferente (OCP) en plagioclasas, aporta al conocimiento general que ya se tiene del área de estudio. Para finalizar, se proponen unas posibles líneas de investigación a seguir a partir de los resultados y conclusiones obtenidos en este trabajo.

5.1. COMPARACIÓN ENTRE LAS FÁBRICAS CRISTALOGRÁFICAS DE LAS PLAGIOCLASA MEDIDAS EN ESTE TRABAJO Y LAS OBTENIDAS POR OTROS AUTORES

5.1.1. Introducción

En capítulos anteriores hemos hecho mención al gran desconocimiento que se tiene en la actualidad sobre la orientación cristalográfica preferente de las plagioclasas, a pesar de ser éste uno de los minerales más abundantes en las rocas que constituyen la corteza terrestre. El hecho de que existan muy pocos estudios sobre OCP en plagioclasas (en feldespatos en general), hace que conozcamos muy poco sobre la deformación plástica que éstos experimentan y, por lo tanto, sobre los tipos de diagramas de fábrica que llegan a desarrollar.

Antes de entrar a discutir los sistemas de deslizamiento en plagioclasas, previamente comentaremos las semejanzas más destacables entre los diagramas de densidad (o de fábrica) de los principales elementos cristalográficos estudiados en este trabajo y los de otros autores. Tal como se ve en la Tabla V.1, nos encontramos ante una limitación importante, con la que hemos contado desde un principio. Consiste en que la mayoría de autores que se dedican al estudio de la OCP en plagioclasas no llegan a realizar un examen tan minucioso como el desarrollado en este

trabajo. Se suelen centrar sólo y exclusivamente en el estudio de la orientación cristalográfica de los ejes ópticos (X, Y, Z), de los ejes cristalográficos a , b , c ([100], [010], [001]) y, con suerte, de tres planos [(100), (010) y (001)], dejando de lado una gran cantidad de planos que darían una idea de la fábrica mucho más valiosa de la que se obtiene con el estudio exclusivo de dichos elementos cristalográficos. En otras ocasiones, como Ji *et al.* (1994), estudian planos y direcciones que no coinciden con los estudiados en este trabajo, con lo cual no disponemos de elementos de comparación. El inconveniente, por ejemplo, de centrarse exclusivamente en el estudio de los ejes de la indicatriz óptica es que estas tres direcciones cristalográficas no son ilustrativas de la fábrica total de la roca y son, por lo que ya hemos visto en nuestro caso, bastante insensibles a la asimetría de la fábrica, la cual sí puede llegar a apreciarse en otros elementos. Por lo tanto, estudios como los de Olsen & Kohlstedt (1985), Rosenberg & Stünitz (2003), Schulmann *et al.* (1996) y Shelley (1979), no aportan demasiada información ya que sólo se centran en el estudio de los ejes ópticos (Tabla V.1). Otros autores como Ji *et al.* (1988), Jiang *et al.* (2000) y Olesen (1987), además de estudiar la orientación de los ejes ópticos también estudian las de los planos (010) de la macla de la Albita. Ague *et al.* (1990) y Lapworth *et al.* (2002) hacen lo mismo, pero en lugar de los ejes ópticos estudian los ejes cristalográficos a , b y c ([100], [010] y [001]). Egydio-Silva & Mainprice (1999), por ejemplo, prescinden de estudiar la orientación de los ejes ópticos y analizan los siguientes elementos: [100], (010), (001) y las direcciones de esfuerzo. Sin embargo, otros autores como Ji & Mainprice (1988, 1990), Kruse *et al.* (2001) y Siegesmund *et al.* (1994) se centran en los ejes ópticos y los planos (010) y (001).

Ji *et al.* (1994) estudian con la platina universal un gran número de elementos cristalográficos de la plagioclasa (con composición An_{50}) de una milonita anortosítica de la zona de cizalla de Morin (Québec, Canadá). Éstos son las direcciones [100], [001], [110], [011], [101], $[10\bar{1}]$, [111], [012] y $[11\bar{2}]$, y los planos (010), (100), (001), (110), (101), $(10\bar{1})$, (111), (120), $(01\bar{1})$, $(02\bar{1})$, $(1\bar{2}1)$ y $(03\bar{1})$.

Por todas las razones expuestas, llegamos a las siguientes conclusiones: (1) sólo podemos comparar, como mucho, los diagramas de fábrica de 9 de los 16 elementos cristalográficos estudiados en este trabajo, es decir, los de los ejes ópticos y cristalográficos y los planos (100), (010) y (001), teniendo que prescindir de otros planos que hemos estudiado pero de los cuales no disponemos de referencias bibliográficas en trabajos previos al no haber sido objeto de estudio por parte de ningún autor, y (2) en algunas ocasiones tendremos que establecer comparaciones entre elementos cristalográficos estudiados con la platina universal (nuestro caso) y los mismos elementos estudiados por otros autores mediante otras técnicas (difracción de rayos-X, TEM, etc.). En la Tabla V.2 se resumen, autor por autor, la existencia o no de similitud (especificando la muestra y el corte) entre las fábricas de los elementos cristalográficos que ellos han estudiado y los nuestros.

TABLA V.1. Selección de trabajos en los que se investiga la OCP en plagioclasas, elementos cristalográficos en los que han centrado sus estudios, la composición de la plagioclasea y el tipo de roca y ambiente geológico.

AUTORES	ELEMENTOS	COMPOSICIÓN	AMBIENTE GEOLÓGICO
Ague <i>et al.</i> (1990)	$a, b, c, (010)$	An ₄₈₋₆₂	Gabros y diques gabroicos. Facies granulitas
Egydio-Silva & Mainprice (1999)	[100], (010), (001), $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	An ₂₅₋₅₇ , An ₃₈₋₄₀ , An ₅₅₋₅₇	Milonita AT (680°-750°C), 5-6 kbar
Heidelbach <i>et al.</i> (2000)	$a, b, c, (100), (010), (001)$	Ab ₂	Experimentos en agregados de albita pura (900°C, 15 kbar)
Ji <i>et al.</i> (1988)	$\alpha, \beta, \gamma, (010), (001)$	An ₂₅₋₄₅	Gneis de Zabargad (Mar Rojo). Facies granulitas (750°-950°C, 1GPa)
Ji <i>et al.</i> (1994)	$a, c, [110], [011], [101], [10\bar{1}], [111], [012], [112], (010), (100), (001), (110), (101), (10\bar{1}), (111), (120), (01\bar{1}), (02\bar{1}), (1\bar{2}1), (03\bar{1})$	An ₄₅₋₅₅	Anortositas miloníticas de zona de cizalla. Facies granulitas
Ji & Mainprice (1988)	$\alpha, \beta, \gamma, a, b, c, (010), (001)$	An ₀₋₈₀	Amplia variedad de ambientes (Tabla II.1)
Ji & Mainprice (1990)	$\alpha, \beta, \gamma, (010), (001)$	An ₄₀₋₅₀	Gneises de la corteza inferior. Facies anfibolitas-granulitas
Jiang <i>et al.</i> (2000)	$a, b, c, (010)$	Ab ₀	Metagabro (300°-450°C, <9 kbar). Facies esquistos verdes
Kruhl (1987)	$a, (010), (001), (111), (021), (0\bar{2}1)$	An ₁₀ , An ₂₄₋₃₇ , An ₃₅₋₅₆	Rocas máficas y ultramáficas con paragneises. Facies esquistos verdes –anfibolitas
Kruse <i>et al.</i> (2001)	$a, b, c, (010), (001)$	An ₄₈₋₅₅	Gabro anortositico (700°C, 9 kbar). Facies granulitas
Lapworth <i>et al.</i> (2002)	$a, b, c, (010)$	An ₃₄₋₄₄	Metaanortosita deformada (zona de cizalla) bajo facies anfibolitas
Olesen (1987)	$\alpha, \beta, \gamma, (010)$	An ₃₅₋₆₀	Metaanortositas de alto grado deformadas en zona de cizalla. Facies anfibolitas – granulitas
Olsen & Kohlstedt (1985)	α, β, γ	An ₂₅₋₄₈	Tonalita a granodiorita deformada bajo facies granulitas (700°-800°C, 6-8 kbar). Abundantes rasgos de deformación intracrystalina
Rosenberg & Stünitz (2003)	α, β, γ	An ₀₋₇₀	Tonalita deformada bajo un gradiente P-T (580°-670°C, 6-8 kbar)
Schulmann <i>et al.</i> (1996)	α, β, γ	Oligoclasea	Granito AT cizallado. Facies anfibolitas (600°-550°C, 4-8 kbar)
Shelley (1979)	α, β, γ	Oligoclasea a Anortita	Metasedimentos volcánicos con deformación previa a la consolidación. Facies anfibolitas-granulitas
Siegesmund <i>et al.</i> (1994)	$a, b, c, (010), (001)$	An ₂₈₋₄₅	Anfibolita (620°-6850°C, 4.5 kbar)
Este trabajo (Duclos, 2004)	$a, b, c, \alpha, \beta, \gamma, \perp[100]/(010), \perp[001]/(010), (010), (001), (021), (0\bar{2}1), (100), (110), (1\bar{1}0), (\bar{2}01)$	An ₀₋₉₅	Anfibolita (550°-825°C, 4 kbar). Desde la transición anfibolitas-granulitas hasta la transición anfibolitas-esquistos verdes.

TABLA V.2. Semejanzas entre las fábricas de los ejes cristalográficos, los ejes ópticos y los planos (001), (010) y (100), según diferentes autores, y las fábricas de esos mismos elementos estudiados en este trabajo. Alm: Almonaster la Real, Ver: Veredas, x: el elemento no ha sido estudiado por el/los autor/es, (-): no se ha encontrado semejanza, (negrita): muestras con mayor semejanza, (recuadro): muestras casi idénticas. Superíndices: (CS) cizalla simple, (HO) “hard-orientation”, (SO) “soft-orientation”, (AT) alta temperatura, (MT) media temperatura, (BT) baja temperatura. Los números hacen referencia a las muestras estudiadas en este trabajo.

CORTE GEOLÓGICO	Ejes cristalográficos						Ejes ópticos						Planos					
	a [100]		b [010]		c [001]		X		Y		Z		(001)		(010)		(100)	
	Alm	Ver	Alm	Ver	Alm	Ver	Alm	Ver	Alm	Ver	Alm	Ver	Alm	Ver	Alm	Ver	Alm	Ver
Ague <i>et al.</i> (1990)	15	5	-	5	-	-	x		x		x		x		-	-	x	
Egydio-Silva & Mainprice (1999)	16	-	x		x		x		x		x		-	4	16	-	x	
Heidelbach <i>et al.</i> (2000)	15^{CS}	4^{CS} 5^{CS}	-	-	-	-	x		x		x		-	-	-	-	-	4^{CS}
Ji <i>et al.</i> (1988)	x		x		x		7 11 14 16	1 5	16	5	15 16	1 5	x		16	-	x	
Ji <i>et al.</i> (1994)	-	-	x		-	-	x		x		x		14	-	2	-	14	1
Ji & Mainprice (1988)	16	-	-	-	-	-	7 11 14 16	1 3 5	16	5	15 16	1 5	14	-	-	-	x	
Ji & Mainprice (1990)	x		x		x		-	3	-	-	15 16	5	16	-	-	-	x	
Jiang <i>et al.</i> (2000)	-	-	-	4	-	-	x		x		x		x		-	-	x	
Kruhl (1987)	16	1 5	x		x		x		x		x		16	4	-	-	x	
Kruse <i>et al.</i> (2001)	16^{HO}	-	-	5^{SO}	-	4	x		x		x		16^{HO}	-	11^{HO}	4^{HO}	x	
Olesen (1987)	x		x		x		14 16	1 3 5	-	-	15 16	5	x		-	-	x	
Olsen & Kohlstedt (1985)	x		x		x		14 16	3	-	-	15 16	5	x		x		x	
Rosenberg & Stünitz (2003)	x		x		x		11^{MT} 14^{MT} 16^{MT}	-	14^{MT}	-	15^{MT} 16^{MT}	1^{MT} 4^{AT} 5^{MT}	x		x		x	
Schulmann <i>et al.</i> (1996)	x		x		x		-	-	16	5	15 16	1 5	x		x		x	
Shelley (1979)	x		x		x		-	4 5	-	-	15 16	1 5	x		x		x	
Siegesmund <i>et al.</i> (1994)	15	1 5	2	4	-	-	x		x		x		-	-	-	-	x	

5.1.2. Los diferentes contextos geológicos estudiados

A continuación pasaremos a comentar, de manera más amplia, lo que se vio en la Tabla V.1, es decir, el contexto geológico y las condiciones de presión, temperatura, deformación, composición de la plagioclasa, etc. analizados por los autores y los trabajos a los que se hizo mención. Así mismo, esbozaremos las semejanzas más representativas expuestas en la Tabla V.2.

Shelley (1979) estudió los metasedimentos volcánicos del Grupo *Foreshore* de la Península de Bluff, en la costa meridional de South Island (Nueva Zelanda). Estos metasedimentos fueron deformados previamente a su litificación por efecto de la intrusión del Complejo ígneo de Bluff al tiempo que sufrían un metamorfismo de contacto de baja presión y alta temperatura. Las plagioclasas que estudiaron eran de composición oligoclasa-andesina fundamentalmente.

El trabajo de Shelley (*op.cit.*) consistió en la medición de las OCP de los ejes X, Y y Z de la indicatriz óptica en este tipo de muestras. El autor interpretó que las fábricas obtenidas resultaron de la rotación pasiva de los cristales alargados de plagioclasa como consecuencia de la deformación asociada al emplazamiento del complejo de Bluff, afectando a sedimentos no consolidados. En consecuencia, los ejes Z, que se disponen en las oligoclasas y andesinas cerca de la normal a (010), es decir, la cara mejor desarrollada de los cristales idiomorfos de estas composiciones, forman un máximo normal a la foliación. Por su parte, los ejes X que según Shelley (1979) se disponían paralelos al eje largo de los cristales de plagioclasa, se orientan en la cercanía de la lineación, con los ejes Y dispuestos en posiciones más erráticas. Estas fábricas son similares a las medidas en las metabasitas de Acebuches, donde han sido generadas por mecanismos de plasticidad intracristalina. Esta convergencia en las fábricas hace resaltar la importancia de un adecuado estudio geológico y microestructural de las muestras, previo a la interpretación de los mecanismos de deformación que las han generado.

Olsen & Kohlstedt (1985) estudiaron plagioclasas de composición intermedia ($An_{25}-An_{48}$) deformadas bajo condiciones de facies granulitas (700°-800°C y 6-8 kbar) en tonalitas y granodioritas de la zona de cizalla Nordre Strømfjord, en la parte occidental de Groenlandia. Esta zona, que está situada en la parte central del cinturón móvil de *Nagssugtoqidian*, es un importante miembro de un sistema de cizallas mayores que atraviesan el basamento Precámbrico de Groenlandia, y que representa el último evento deformacional importante en esta zona que tuvo lugar en condiciones sinmetamórficas. Las plagioclasas constituyen en torno a un 40-70% del volumen total de las rocas y sufrieron una intensa deformación dúctil por deslizamiento intracristalino y maclado. Estos autores se limitan también a la determinación de los ejes X, Y y Z de la indicatriz óptica. Sus resultados son equivalentes a los de Olesen (1987), y se comentarán con más detalle en la referencia a este último trabajo.

Kruhl (1987a) estudió con la platina universal la OCP de las plagioclasas deformadas bajo condiciones de facies de anfibolitas-esquistos verdes en metapegmatitas, gneises y metagabros cercanos a la Línea Insúbrica, en la Zona de Ivrea (Alpes Occidentales), que representan un

segmento de la corteza profunda. Los gneises estaban en facies de anfibolitas y la plagioclase tenía una composición An_{24-37} , llegando a constituir un 60% del volumen total de la roca. En cuanto a las características de la deformación, actuó tanto deformación plana como axial. Kruhl propuso también que la fábrica de la plagioclase era originalmente isótropa y que la roca no había experimentado pérdida de volumen durante la deformación. En las metapegmatitas, a diferencia de los gneises, la plagioclase era de composición An_{10} y constituía un 30% del volumen total de la roca. Además, estas rocas se deformaron bajo condiciones de la parte alta de las facies de los esquistos verdes. En el caso de Kruhl (*op.cit.*), los diagramas de fábrica que se parecen a nuestras muestras quedan restringidos a los de los elementos [100] y (001).

Olesen (1987) analizó el desarrollo de fábricas de plagioclasas (An_{35-60}) en una zona de cizalla de alto grado en Jotunheimen (Noruega). El tipo de rocas eran metaanortositas en las que la plagioclase constituía >60-70% de la roca y donde la deformación tuvo lugar bajo condiciones de facies de anfibolitas-granulitas. Este autor estudió la OCP de los ejes de la indicatriz óptica (X, Y y Z) obteniendo las típicas fábricas de coronas de ejes X e Y según el plano de foliación y de ejes Z formando máximos normales a dicho plano. Estas fábricas son similares a las encontradas dentro de la zona de cizalla Suribérica, cuyas condiciones de deformación fueron muy parecidas a las de las milonitas de Jotunheimen.

Ji *et al.* (1988) y Ji & Mainprice (1988) estudiaron, con la platina universal, los gneises de la Isla de Zabargad (Mar Rojo) entre otras rocas. Estos gneises se componían de plagioclasas de composición An_{35-45} en el caso de los gneises máficos y An_{25-35} en el caso de los peralcalinos. Estas rocas fueron deformadas naturalmente mediante deformación no coaxial y bajo condiciones de facies granulitas a 750°-950°C y 10-10.1 kbar. Se observaba en ellas un bandeo homogéneo bien desarrollado, deformación sinmetamórfica (consistente en una cizalla con sentido de movimiento difícil de evaluar), desarrollo de una foliación paralela al bandeo y una lineación mineral. La plagioclase resultó ser el mineral más abundante (>60%) y presentaba abundantes evidencias de deformación plástica (maclas, extinción ondulante, bandas de deformación, etc.). A diferencia de otros autores comentados anteriormente, la cantidad de elementos cristalográficos para los que encontramos un parecido más revelador es mayor, y también el número de muestras que se parecen a ellos. Estos autores hacen especial hincapié en las fábricas del elemento (010), cuyos polos se disponen casi normales a la foliación. Dada la importancia que los autores conceden al plano (010) como integrante del principal sistema de deslizamiento en las rocas estudiadas, la disposición de sus fábricas es congruente con una orientación de *easy slip*. En este sentido, el parecido de dichas fábricas con las correspondientes de las muestras 11 a 15 de Almonaster la Real y la 1, 2 y 5 de Veredas, nos lleva a sugerir que dicho sistema de deslizamiento puede ser determinante también en el desarrollo de estas fábricas en las anfibolitas de Acebuches, como más adelante se comentará. El mayor parecido lo encontramos entre (010) de la muestra 16 de Almonaster la Real y el propuesto por Ji *et al.* (1988) (fig.5.1a y f). Consisten en máximos muy concentrados y estirados sobre el primitivo de la proyección, orientados entre la lineación y el polo

del plano de foliación. Estos autores utilizan la asimetría de las fábricas de (010) con respecto a los ejes principales de la deformación finita para deducir el sentido de cizalla (fig.5.1a). Aplicando este criterio en las muestras de Acebuches (figs.4.46 y 4.47), se deduce un movimiento relativo del bloque de techo tanto hacia el SO como hacia el NE. Esta variación afectaría tanto a las muestras deformadas únicamente por D_1 como a las modificadas también por D_2 . Este resultado es sorprendente teniendo en cuenta el sentido de cizalla obtenido para ambas fases mediante el estudio de otros criterios cinemáticos (Díaz Azpiroz, 2001), que indica consistentemente movimiento del bloque de techo hacia el SO. Esta diferencia con los resultados de Ji *et al.* (1988) será explicada en el apartado 5.4 de este trabajo como consecuencia de las transiciones de fábrica en las plagioclasas. En este sentido, el criterio cinemático de Ji *et al.* (1988) no es de aplicación general, y debe ser precisado y analizado con cuidado.

Ague *et al.* (1990) estudiaron dos muestras de gabros deformados procedentes de la Cordillera Musgrave (Australia Central). Para determinar la OCP de las plagioclasas utilizaron la platina universal. Estudiaron plagioclasas de diques gabroicos, de composición An_{62} y deformadas dúctilmente. Estos diques intruyeron el basamento de metasedimentos y gneises granulíticos de la región y se deformaron bajo condiciones de las facies de las granulitas (Mirams, 1964). Dichos diques presentaban una intensa OCP y una escasa deformación intracrystalina. Cuando estudiaron muestras de gabros con plagioclasas de composición más sódica (An_{48}) que la de los diques gabroicos, vieron que presentaban una fuerte deformación intracrystalina y una débil OCP, al contrario que en el caso de los diques.

De todos los elementos cristalográficos que estudiaron, sólo encontramos un parecido importante en el caso de la fábrica de [100] con la de la muestra 15 de Almonaster la Real. Los autores interpretaron el resultado como debido a que, cuando los cristales muestran un hábito tabular bien desarrollado, el mecanismo fundamental de génesis de la OCP en plagioclasas es rotación pasiva de los cristales. Dado que, en las metabasitas de Acebuches, los cristales de plagioclasa nunca son idiomorfos ni tabulares, no es de extrañar el escaso parecido entre las fábricas de estos autores y las de nuestro trabajo. Este hecho refuerza la hipótesis de que las OCP en las metabasitas de Acebuches son debidas a los procesos de deformación intracrystalina.

Ji & Mainprice (1990) estudiaron gneises anfibolítico-granulíticos de la corteza inferior, procedentes del Manto Jottun (Noruega), Isla de Zabargad (Mar Rojo) y Finero (Alpes Italianos). La plagioclasa constituye en todos los casos en torno al 55-85% del volumen total, es de composición intermedia (An_{40-50}) y sufrió una intensa deformación dúctil por deformación intracrystalina y maclado. La medición mediante platina universal ha mostrado que las muestras presentan, en líneas generales, una intensa orientación cristalográfica preferente. Los patrones obtenidos son sólo comparables con algunas fábricas de la muestra 16 de Almonaster la Real, en concreto la de (010) y [100]. El escaso parecido general dificulta, no obstante, mayores interpretaciones.

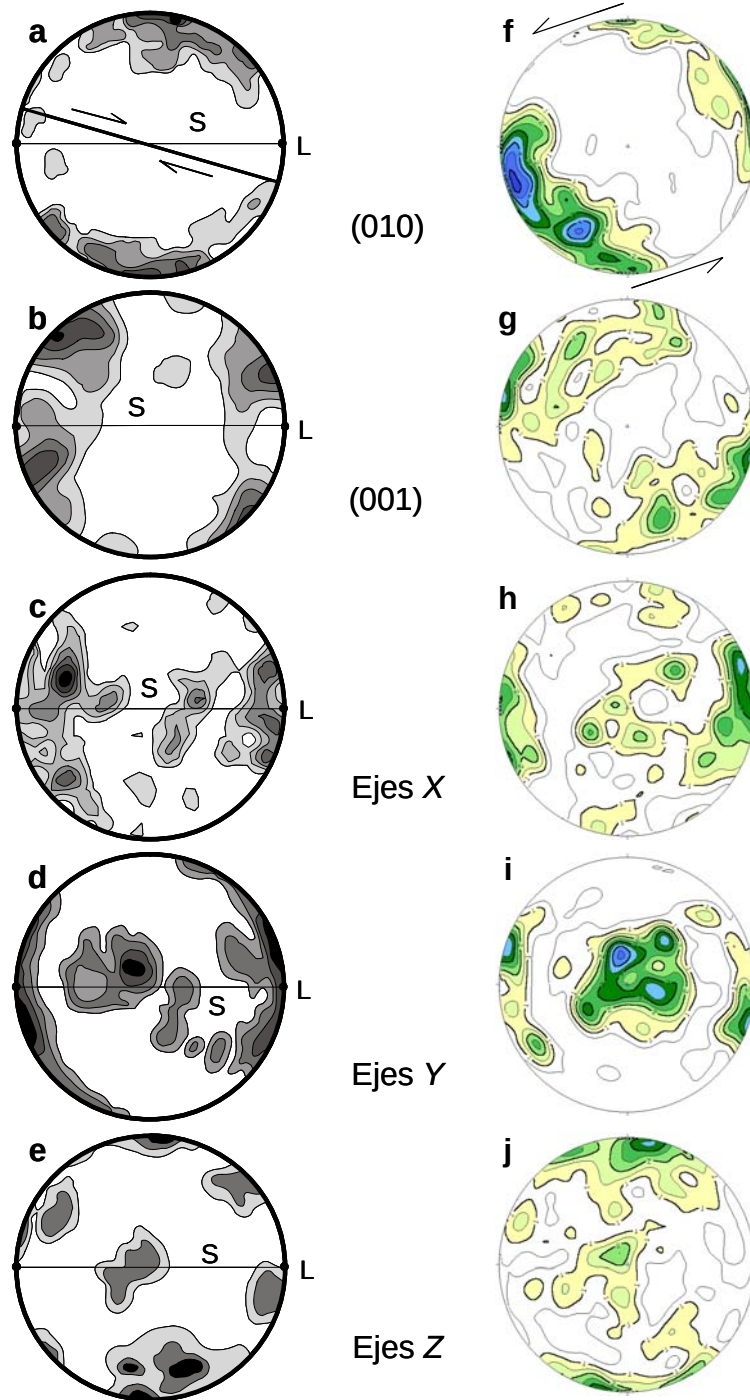


Fig.5.1. Ejemplos de fábricas cristalográficas de plagioclasas tomadas de la bibliografía (columna izquierda) que muestran gran similitud con algunas de las fábricas obtenidas en este trabajo (columna derecha). (a) polos de planos (010), modificado de Ji et al. (1988), (b) polos de planos (001), modificado de Kruse et al. (2001), (c) ejes X de la indicatriz óptica, modificado de Rosenberg & Stünitz (2003), (d) y (e) ejes Y y Z de la indicatriz óptica, modificado de Schulmann et al. (1996), (f) polos de planos (010) de la muestra 16 de Almonaster la Real, (g) polos de planos (001) de la muestra 16 de Almonaster la Real, (h) ejes X de la muestra 11 de Almonaster la Real, (i) ejes Y de la muestra 16 de Almonaster la Real, (j) ejes Z de la muestra 1 de Veredas. Con respecto a la incongruencia en el sentido de cizalla mostrado por las figuras (a) y (f), véase la explicación en el texto.

Ji *et al.* (1994) estudiaron, con la platina universal, las plagioclasas de una zona milonítica de escala kilométrica del Macizo Anortosítico de Morin (Grenville, Canadá). Este macizo es el núcleo de un complejo plutónico emplazado en rocas metamórficas de alto grado del cinturón alóctono de la Provincia de Grenville. Las rocas fueron afectadas por una cizalla dúctil, de tipo *strike-slip* y con sentido de movimiento dextral, que se desarrolló en la parte E del macizo, bajo condiciones de facies granulita, hace 1020 Ma. La plagioclase constituye casi el 95% del volumen total de las anortositas, y tiene una composición que varía entre An₄₅ y An₅₅. Aunque para estos autores hemos establecido algunas semejanzas como puede verse en la tabla correspondiente, realmente ninguna de nuestras muestras presenta un patrón de fábrica exactamente igual.

Siegesmund *et al.* (1994) estudiaron una muestra de la anfibolita bandeada de Alzenau deformada naturalmente (620°-650°C, 4.5 kbar) y procedente de las Montañas Spessart (Macizo Cristalino Germano). De acuerdo con los análisis de elementos mayores y trazas, el protolito de este espécimen era una toleíta subalcalina, sugiriendo un ambiente de arco-isla o cuenca-interarco, y la roca contenía un 40% de plagioclase de composición An₂₈₋₄₅. La metodología que emplearon consistió en la medida de la OCP mediante la platina universal de la plagioclase en tres secciones ortogonales, conjuntamente con el programa informático de Kruhl (1987a) y la difracción de neutrones (método TOF: *time-of-flight-detectors*, ver Ananiev *et al.* 1984).

El principal rasgo de la OCP medida por estos autores es la disposición de los polos de (001) paralelos al polo de la foliación. Esta es una fábrica muy peculiar que, combinada con la orientación de los ejes [100] en las cercanías de la lineación, les lleva a proponer la actividad del sistema de deslizamiento (001)[100]. La única muestra con una fábrica comparable, aunque no idéntica a ésta, es la número 4 de Veredas. No obstante, la actividad de este sistema de deslizamiento ha sido interpretada también en varias muestras del corte de Almonaster la Real. Con todo, el aspecto más interesante del trabajo de Siegesmund *et al.* (1994) es la comparación que establecen entre las fábricas cristalográficas de plagioclase y las de anfíbol. Teniendo en cuenta que el anfíbol constituye el 60% de la roca y que sus fábricas están mejor definidas que las de plagioclase, sugieren que la plagioclase actuó como fase blanda, acomodando las heterogeneidades de la deformación causadas por los anfíboles. Algo similar puede ser analizado en las metabasitas de Acebuches, y será discutido en el apartado 5.1.3.

Schulmann *et al.* (1996) estudiaron granitoides porfíricos cizallados naturalmente bajo condiciones de facies anfibolitas y procedentes de la parte central de las montañas Erzgebirge (Macizo Oeste de Bohemia). Estos granitoides intruyeron durante el Proterozoico superior en los metasedimentos del basamento Saxoturingio del cinturón Varisco, y presentan una deformación bastante heterogénea (600°C y 8 kbar, 550°C y 4 kbar). El volumen de la plagioclase decrece con el incremento de la deformación, oscilando entre un 35% y un 10%, y es de composición oligoclase. Si atendemos a los ejes Y, es la muestra 16 de Almonaster la Real la que más se asemeja al patrón de fábrica de Schulmann *et al.* (1996) (fig.5.1d e i). Consisten en una corona incompleta paralela al plano de foliación con dos máximos muy intensos, uno de ellos coincidente

con el centro de la proyección, perpendicular a la lineación, y otro máximo alargado sobre el primitivo y a muy bajo ángulo, casi coincidente, con la lineación. La fábrica de la indicatriz óptica que presentan estos autores es la típica OCP que se desarrolla en las facies de las anfibolitas, y ya fue comentada anteriormente.

Egydio-Silva & Mainprice (1999) estudiaron la orientación de plagioclasas macladas en una zona de cizalla de alta temperatura, Além Paraíba, del cinturón Neoproterozoico de Ribeira (SE de Brasil), deformadas bajo condiciones de la facies de las granulitas. Analizaron 5 muestras procedentes de dos ambientes tectónicos diferentes. Tres de ellas se correspondían con una granodiorita milonítica donde la plagioclasa constituía en torno al 55-60% de la roca y era de composición An_{25-57} . Otra de las muestras procedía de un gneis donde el modelo de deformación, bajo facies granulita, cambiaba de transpresión a compresión. Se compone de ~60% de plagioclasa de composición An_{38-40} . La última de las muestras correspondía a un gneis norítico compuesto predominantemente por plagioclasa (80%) de composición An_{55-57} .

Todas las fábricas estudiadas por estos autores son similares. Los ejes [001] forman un máximo según el eje Y del elipsoide de la deformación finita. Una fábrica muy similar a esta es la obtenida para los ejes [001] en la muestra 16 del corte de Almonaster la Real. La fábrica de (010) de estos autores consiste en un máximo perpendicular a la foliación y otro menor paralelo a la lineación. Esta configuración coincide también con la de la fábrica de (010) de la muestra 16 de Almonaster la Real. Finalmente, los ejes [001] y los planos (001) no forman fábricas de patrones regulares aunque tienden a aparecer círculos mayores según los planos XZ e YZ y máximos oblicuos respecto a los ejes X. Esto mismo se observa en la muestra 16 del corte citado. Los autores del trabajo atribuyen esta OCP a *creep* de dislocaciones asistido por recristalización en milonitas de alta temperatura. Esta interpretación coincide, por tanto, con las características deformativas y la situación geológica de la muestra 16.

En trabajos más recientes, como el de Heidelberg *et al.* (2000) en agregados de albita pura deformada experimentalmente a 900°C, 10-15 kbar y una tasa de deformación de 10^{-4} - 10^{-6} s⁻¹, estos autores aplicaron dos tipos de deformación: compresión axial y cizalla simple, e incluso llegaron a comparar sus resultados con los de muestras deformadas naturalmente. Las plagioclasas eran anortíticas, no constituían la única fase mineral de la roca, habían sido sometidas a temperaturas más bajas que las de Kruhl (1987a) y eran equivalentes a las condiciones de la parte alta de las facies de los esquistos verdes y parte media de las facies de las anfibolitas.

Los resultados de estos autores muestran que el mecanismo de presión-disolución no es capaz de producir OCP intensas en plagioclasas. Las muestras que desarrollaron OCP mostraban microestructuras típicas de la actuación del *creep* de dislocaciones. Las fábricas obtenidas para historias de deformación coaxiales no guardan parecido con las observadas en las metabasitas de Acebuches. En lo que respecta a las fábricas de cizalla simple, hay similitudes entre las fábricas de [010] para alto valor de la cizalla medidas por estos autores y las de las muestras 7 a 15 de

Almonaster la Real y la 2, 3 y 4 de Veredas. Sin embargo, aparte de parecidos menores en las fábricas de (100), no hay otras equivalencias entre las OCP del artículo citado y las medidas en las metabasitas de Acebuches. La explicación debe radicar en la combinación de los sistemas de deslizamiento activos en los experimentos que simulaban grados metamórficos bajos a medios. Al exceder las condiciones metamórficas sufridas por las metabasitas de Acebuches las establecidas para los experimentos, sólo algunos de los sistemas de deslizamiento identificados por Heidelberg *et al.* (2000) actuaron en Acebuches, de modo que las OCP resultantes son parcialmente diferentes. Estos autores remarcan que las OCP generadas bajo historias de deformación no coaxiales muestran una clara asimetría con respecto a los ejes principales de la deformación finita. Esta es exactamente la situación de las OCP medidas en las anfíbolitas de Acebuches, lo que corrobora la presencia de un componente rotacional para las dos fases de deformación que las han afectado.

Jiang *et al.* (2000) estudiaron, mediante difracción de electrones retrodispersados, la orientación cristalográfica de dominios de albita pura en un metagabro de bajo grado cizallado y procedente de la zona de Combin, en los Alpes Italianos occidentales. La deformación tuvo lugar bajo facies esquistos verdes a temperaturas en torno a 300°-400°C y presiones inferiores a 9 kbar.

En el caso de estos autores, cualquier parecido entre las fábricas descritas por ellos y las medidas en las metabasitas de Acebuches, es engañoso. Los diagramas de OCP de Jiang *et al.* (2000) se originaron por la desestabilización de una fuerte fábrica previa, precisamente como consecuencia de una deformación de bajo grado metamórfico por flujo granular. Esto provoca que las fábricas medidas en la misma muestra sean radicalmente distintas debido a que proceden de cristales huésped diferentes. No es comparable, por tanto, con la situación de las metabasitas de Acebuches.

Kruse *et al.* (2001) estudiaron gabros anortosíticos del Complejo de Jotun (Noruega), donde la deformación tuvo lugar a aproximadamente a 700°C y a presiones inferiores a 9 kbar. La orientación de los porfiroclastos de plagioclasa fue medida con la platina universal. El Complejo o Manto de Jotun forma parte de la unidad autóctona media del Caledónico en el S de Noruega y consiste en rocas metamórficas en facies de granulitas que fueron afectadas por el último metamorfismo regional que alcanzó las condiciones de facies anfíbolita a unos 9 kbar (Schärer, 1980; Milnes & Koestler, 1985). Durante la última colisión *scandian* (hace 420 Ma) el Manto de Jotun cabalgó unos 300 km hacia el SE sobre el Escudo Báltico. Durante este evento, la deformación quedó restringida a una zona milonítica de la base del Manto de Jotun y tuvo lugar bajo condiciones de las facies de los esquistos verdes y la parte más baja de las facies de las anfíbolitas. La mayor parte de este manto permaneció sin afectar por el cabalgamiento y consistió en una importante intrusión de un gabro anortosítico caracterizado por una asociación mineral típica de facies granulita y con plagioclasas de composición An₄₈-An₅₅. Estos autores estudian la OCP tanto para granos con orientación favorable (*soft-orientation*) como desfavorable

(*hard-orientation*) al movimiento senestro de una cizalla simple previa al cabalgamiento del manto de Jotun.

En el trabajo de Kruse *et al.* (2001) se identifican dos tipos de OCP de plagioclasas distintas, generadas bajo las mismas condiciones de presión y temperatura y en la misma zona de cizalla. Uno de los tipos corresponde a las fábricas adquiridas por los porfiroclastos favorablemente orientados para la deformación (*easy slip*, porfiroclastos tipo 1), mientras que el otro se ha desarrollado en porfiroclastos desfavorablemente orientados (porfiroclastos tipo 2). Resulta remarcable el parecido entre las fábricas de los elementos (001), (010), [100], [010] y [001] de los porfiroclastos de tipo 1 y las fábricas correspondientes de las muestras 15 de Almonaster la Real y 1 de Veredas. La semejanza es especialmente intensa para las fábricas de los elementos (010) y [001]. En menor medida, es posible también identificar algunas semejanzas entre este tipo de OCP y las fábricas de las muestras 11 y 14 de Almonaster la Real, y la 2 y 3 de Veredas. El hecho de que no se observen porfiroclastos que no destaquen de la matriz en tales muestras de Acebuches, sugiere que todos los cristales medidos se encontraban en situación de *easy glide*. La temperatura de deformación para las muestras de Kruse *et al.* (2001) es muy similar (700°C) a la que sufrieron las muestras equivalentes de las metabasitas de Acebuches. Por otra parte, la actuación de un componente de cizalla simple en ambos casos explica finalmente la oblicuidad de todas estas fábricas con respecto a los ejes de deformación finita. El tipo de fábrica del plano (001) que presentan Kruse *et al.* (2001) para granos de plagioclasa con "*hard-orientation*" es claramente comparable, por su alto grado de semejanza, con el de la muestra 16 de Almonaster la Real (fig.5.1b y g). En ambos casos consisten en máximos inclinados aproximadamente 30° respecto a la lineación y situados sobre el primitivo de la proyección. La fábrica de la muestra 16 marca el tránsito hacia las ultramilonitas de la zona de cizalla Suribérica, en las que se encuentran abundantes porfiroclastos de plagioclasa. No es de extrañar, por tanto, que esta muestra presente mayores parecidos con la de los porfiroclastos de tipo 2.

Rosenberg & Stünitz (2003) estudiaron la tonalita de Bergell. Esta forma parte del Cinturón milonítico Insúbrico y fue deformada en condiciones de facies anfíbolita bajo un gradiente de temperatura de 580°-670°C y una presión que varía entre 6 kbar (Este) y 8.5 kbar (Oeste). La deformación, que aumenta gradualmente de N a S, se produjo mediante un cizallamiento dúctil en un régimen dextral transpresivo. El método utilizado por estos autores para la medida de la OCP fue la platina universal, y estudiaron la OCP de los ejes ópticos en granos recrystalizados a alta, media y baja temperatura.

El tipo de OCP de los ejes de la indicatriz óptica medido por estos autores es el característico de la deformación de plagioclasas en las facies de las anfíbolitas: ejes X e Y en una corona paralela a la foliación, con los ejes X más cercanos a la lineación y los ejes Y próximos a la normal de la foliación, y los ejes Z paralelos al polo de la foliación. En concreto, la OCP de los ejes X de los granos de plagioclasa recrystalizados en condiciones de alta tasa de deformación y temperatura intermedia, se asemeja muchísimo al diagrama de fábrica de los ejes X de la muestra 11 de Almonaster la Real (fig.5.1c y h). En ambos casos, la orientación cristalográfica preferente

consiste en una corona incompleta contenida en el plano de foliación, con varios máximos principales en torno a la lineación y máximos secundarios casi coincidentes con el centro de la proyección. Si tenemos en cuenta los ejes Z , hay 4 muestras de este trabajo nuestras cuyos ejes Z son prácticamente idénticos a los estudiados por Rosenberg & Stünitz (2003) para temperatura intermedia (muestra 15 de Almonaster la Real y la 1 de Veredas) o por Schulmann *et al.* 1996 (muestra 1 de Veredas) (fig.5.1e y j). Consisten en dos máximos principales perpendiculares al plano de foliación y a la lineación. También se observan otros máximos de menos importancia y casi coincidente, o a muy bajo ángulo, con el centro de la proyección. Este es el tipo de fábricas que descubrieron también Olsen & Kohlstedt (1985) y Olesen (1987). Pero la singularidad del trabajo de Rosenberg & Stünitz (2003) es que describen un debilitamiento del grado de orientación preferente para las muestras deformadas a temperaturas altas (cercasas a los 700°C). Estos autores atribuyen el hecho al efecto del deslizamiento de bordes de grano acomodado por difusión, que llegaría a predominar sobre el *creep* de dislocaciones. El interés de esta interpretación es que podría explicar la asimetría encontrada en la variación del grado de orientación preferente, de techo a muro, en las metabasitas de Acebuches. En efecto, los típicos diagramas en *artesa* que se han descrito en el capítulo de resultados, muestran sistemáticamente una pendiente más acusada en la base de las anfíbolitas que en el techo. Teniendo en cuenta que la base fue afectada por la zona de cizalla Suribérica, bajo condiciones de temperatura moderada, mientras que el techo sufrió la deformación más intensa durante la primera fase de deformación, de alta temperatura, puede sugerirse que el deslizamiento de bordes de grano fue un mecanismo eficiente durante esta primera fase de deformación. De este modo, la mayor intensidad de la deformación en el techo de las anfíbolitas, se ve parcialmente compensada por el efecto destructivo de las OCP que tiene el deslizamiento de bordes de grano.

5.1.3. Fábricas de anfíbol en las metabasitas de Acebuches. Posible influencia en la OCP de las plagioclasas

Dado que las metabasitas de Acebuches están compuestas, en una alta proporción, por anfíboles, resulta interesante analizar los patrones de orientación cristalográfica preferente de este mineral y compararlos con los obtenidos para la plagioclasa. La fig.5.2, correspondiente a los resultados de la medición de la OCP de anfíboles en el corte de Almonaster la Real por Monteagudo y Fernández (inédito), muestra que las fábricas obtenidas son muy homogéneas.

Los ejes [001], así como los ejes Z de la indicatriz óptica, se disponen formando una corona sencilla paralela al plano de foliación. Se distingue un máximo paralelo a la foliación y otro normal a ella. Por su parte, los ejes X de la indicatriz óptica se orientan según la normal al plano de foliación. Los ejes Y presentan mayores dispersiones en unos casos (muestra 1) o patrones similares a los de los ejes [001] (muestras 12 y 13). Prácticamente, no se observan variaciones significativas de techo (muestra 1) a muro (muestra 13) de la serie. Estas fábricas de anfíbolitas son similares a las descritas en la bibliografía (Ji *et al.* 1993; Shelley, 1994 y Siegesmund *et al.* 1994). En concreto, la disposición de [100] según el polo de la foliación es una constante en la mayor parte de las fábricas de anfíbol publicadas. Por su parte, [010] (o, en este caso, el eje Y de

la indicatriz óptica) tiende a colocarse según un máximo prominente sobre la foliación y normal a la lineación, que puede alargarse según el plano de foliación (Ji *et al.* 1993) o según el plano normal a la lineación (Ji *et al.* 1993, Siegesmund *et al.* 1994). Típicamente, [001] se orienta con la lineación, aunque se han descrito también fábricas con máximos a alto ángulo de la lineación y sobre el plano de foliación (Ji *et al.* 1993).

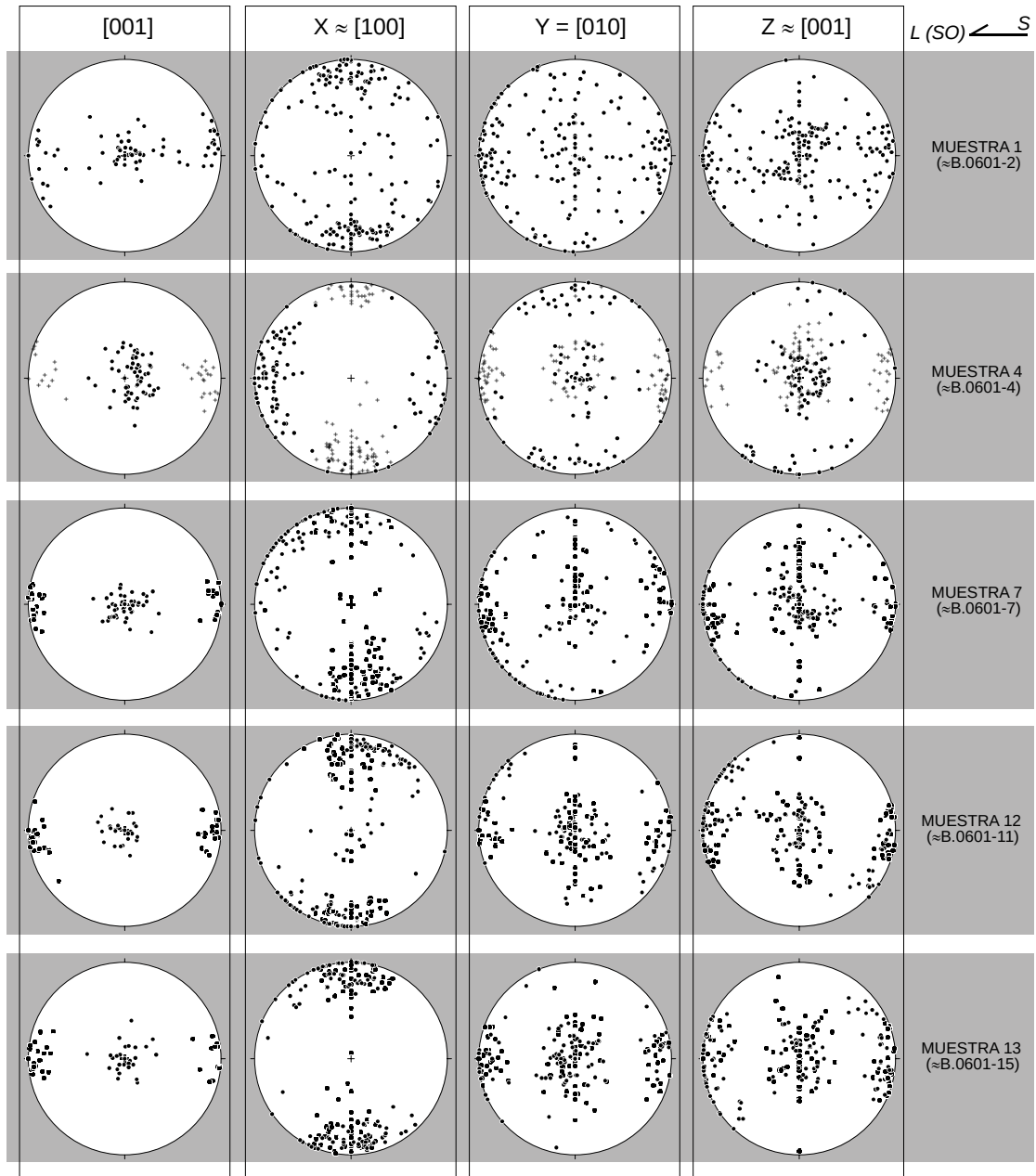


Fig.5.2. Diagramas de OCP de anfíboles medidos en las metabasitas de Acebuches por Monteagudo & Fernández (inédito). Proyección equiareal, hemisferio inferior. Los distintos símbolos empleados en algunas muestras corresponden a datos medidos en secciones de diferente orientación. La posición de la foliación, la lineación, el techo de la serie y las coordenadas geográficas, es la misma que para los diagramas de OCP de las plagioclasas presentados en este trabajo. A la derecha se indica la equivalencia entre cada una de las muestras medidas y las estudiadas en este trabajo. X, Y y Z representan los ejes de la indicatriz óptica del anfíbol.

A menudo se ha citado el sistema de deslizamiento (100)[001] como uno de los más activos en anfíboles. Los patrones de orientación cristalográfica preferente de la fig.5.2 podrían resultar de la actividad de dicho mecanismo. No obstante, los procesos por los que un agregado de anfíbol adquiere una OCP, son muy debatidos. Se han propuesto tres mecanismos (Shelley, 1994): plasticidad intracrystalina (fábricas de tipo P), rotación mecánica (fábricas de tipo M) y crecimiento anisótropo (fábricas de tipo G). La mayor parte de los autores coinciden en que, en ausencia de microestructuras que prueben la deformación intracrystalina del anfíbol, como maclas de deformación, extinción ondulante, subgranos y nuevos granos de recristalización dinámica, o altas densidades de dislocaciones, debe descartarse que la OCP sea de tipo P. Este es mayoritariamente el caso en las metabasitas de Acebuches.

Uno de los rasgos más llamativos de la fig. 5.2 es el carácter ortorrómbico de todas las fábricas, incluyendo las de los ejes [001]. Esto contrasta con las asimetrías descritas en este trabajo en las OCP de las plagioclasas. Desde el punto de vista microestructural, resulta evidente que las plagioclasas constituyeron la fase menos resistente de la roca, acomodando la mayor parte de la deformación plástica. Los anfíboles, por su parte, debieron adquirir su OCP mediante una combinación de los mecanismos de rotación rígida en una matriz más blanda y crecimiento condicionado por el campo de esfuerzos durante el metamorfismo (Brodie & Rutter, 1985; Shelley, 1994). De este modo, el eje largo de los cristales de anfíbol que coincide con la dirección [001] se alinearía con las direcciones principales del elipsoide de la deformación finita. Por su parte, el plano (100) o, en general, los planos ($hk0$), tenderán al paralelismo con la foliación dado que forman las caras más desarrolladas de los cristales de anfíbol.

La alineación de los ejes cristalográficos y los ejes ópticos del anfíbol con los planos y ejes principales del elipsoide de la deformación finita mediante la actuación de los mecanismos de tipo M y G, explicaría la alta simetría de las OCP de anfíboles. La posible influencia que ha podido tener la presencia de los cristales rígidos de anfíbol en las fábricas cristalográficas de plagioclasas en las metabasitas de Acebuches está por evaluar, y será una línea de trabajo futuro. Si, como sugieren Siegesmund *et al.* (1994), la plagioclase acomoda las incompatibilidades de la deformación en las cercanías de los cristales de anfíbol, esto ha de tener un reflejo en la fábrica final. No obstante, en este trabajo se han planteado unos objetivos más generales, de desbroce de los patrones más generales que muestran las OCP de las plagioclasas. Resulta evidente, por otra parte, que la asimetría de las OCP de las plagioclasas indica que éstas son más sensibles al componente rotacional de la deformación, como es propio de un mecanismo de deformación basado en el movimiento de dislocaciones. En este sentido, la presencia de los anfíboles puede haber aumentado o disminuido localmente la intensidad de la orientación cristalográfica preferente de las plagioclasas, pero no debe haber influido sustancialmente ni en su forma ni en su asimetría.

5.2. INTERPRETACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DESLIZAMIENTO ACTIVOS EN LAS PLAGIOCLASAS DE LAS METABASITAS DE ACEBUCHES

5.2.1. Introducción

Los resultados presentados en el capítulo anterior nos permiten discutir en profundidad los diferentes tipos de sistemas activos de deslizamiento que se pueden encontrar en plagioclasas bajo condiciones muy diversas de metamorfismo e intensidad de deformación. Algunos de los resultados obtenidos coinciden con observaciones experimentales de trabajos publicados, tanto clásicos como modernos, y que ya fueron citados en el capítulo de antecedentes (apartado 2.5.4), mientras que otros resultados obtenidos en esta tesis suponen un avance novedoso en este campo tan controvertido y del que se conoce tan poco.

En este capítulo tomamos en cuenta los resultados de las microfábricas (diagramas de densidad de polos) del capítulo de resultados y, de acuerdo con ellos, proponemos una clasificación de los posibles sistemas de deslizamiento que podrían llegar a activarse en las plagioclasas de las metabasitas de Acebuches. Para ello tenemos que tener en cuenta que para la identificación de un sistema de deslizamiento concreto, a partir de diagramas de OCP, es necesario que se den dos condiciones: una máxima concentración de polos en torno al plano de foliación (que indicaría el plano de deslizamiento) y otra máxima concentración de polos en torno a la lineación (que indicaría la dirección de deslizamiento). Sólo en virtud a estos dos requisitos podemos plantear, desde un punto de vista cualitativo, la actividad de los sistemas de deslizamiento más probables. Los sistemas de deslizamiento pueden ser observados mediante el estudio de dislocaciones a través del TEM y otras técnicas, como difracción de rayos-X, etc. No obstante, la mayor parte de los trabajos utilizan los diagramas de OCP para obtener los posibles sistemas de deslizamiento responsables de la fábrica, o combinaciones entre esta técnica y la observación directa mediante TEM u otros instrumentos. Así, por ejemplo, Siegesmund *et al.* (1994) estudiaron la textura de la plagioclasea en una anfibolita deformada y compararon los resultados de los análisis texturales utilizando la difracción TOF y la técnica tradicional de la platina universal para la determinación de la orientación preferente. Observaron que para plagioclasas en rocas de facies anfibolita, los planos (010) eran subparalelos a la foliación y las direcciones [100] eran subparalelas a la lineación, deduciendo a partir de ello el sistema de deslizamiento (010)[100]. Otro caso es el de Ji *et al.* (1994), quienes identificaron que los planos (010), (01 $\bar{1}$), (02 $\bar{1}$), (1 $\bar{2}$ 1) y (03 $\bar{1}$) se alineaban paralelos o subparalelos al plano de foliación, con lo que dedujeron que todos ellos eran posibles planos de deslizamiento. Así mismo, las direcciones [001], [111] y [012] presentaban una alta concentración a bajo ángulo de la lineación mineral, con lo que constituían posibles direcciones de deslizamiento. Del mismo modo, Heidelberg *et al.* (2000), combinaron las medidas de la OCP mediante el uso de la platina universal en plagioclasas deformadas experimentalmente, con observaciones hechas con el TEM para determinar los sistemas de deslizamiento, y llegaron a las mismas conclusiones en ambos casos. En el caso de Kruse *et al.* (2001), determinaron mediante el TEM las densidades de

dislocaciones y los sistemas de deslizamiento, y llegaron a la conclusión de que los planos y direcciones de deslizamiento se encontraban a muy bajo ángulo respecto a la foliación y lineación, respectivamente. Como dicen Ji *et al.* (1988), la dirección de deslizamiento más sencilla será la que tenga el vector de Burgers más corto ya que las dislocaciones con la menor energía son las más estables.

En consecuencia, se han utilizado diagramas de OCP de plagioclasas medidos en este trabajo para interpretar los sistemas de deslizamiento que deben haber actuado en las muestras estudiadas en ambos cortes, Almonaster la Real y Veredas. Finalmente, hemos propuesto dos clasificaciones de los sistemas de deslizamiento: la primera de ellas ordena los tipos de fábricas que se pueden llegar a diferenciar teniendo en cuenta el gradiente de temperatura y la influencia de la ZCS (independientemente del corte geológico), la segunda clasificación ordena los sistemas de deslizamiento según el corte en cuestión.

5.2.2. Sistemas de deslizamiento en las metabasitas no afectadas por la zona de cizalla Suribérica (ZCS)

Tanto en el corte de Almonaster la Real como en el de Veredas, se identifica un conjunto de muestras que no han sido afectadas por la zona de cizalla Suribérica (ZCS) pero sí, en todo caso, por la deformación de la fase D₁, la cual afecta especialmente a la mitad superior de la serie de las metabasitas de Acebuches, en contacto con el dominio continental. Dichas rocas son las muestras número 2, 4 y 7 de Almonaster la Real (Tabla V.3), y la 1, 2 y 4 de Veredas (Tabla V.4). Todas ellas tienen en común que son anfibolitas bandeadas (temperatura $\geq 725^{\circ}\text{C}$) y presentan una lineación metamórfica de alto grado, aunque en los casos de las muestras 1 y 4 de Veredas esta lineación no se ha llegado a observar ni en el afloramiento ni tampoco en los cortes realizados en el laboratorio.

El resto de muestras de ambos cortes, es decir, las muestras 11, 14, 15 y 16 de Almonaster la Real, así como la 3 y 5 de Veredas, se encuentran afectadas por la ZCS, por lo que se tratarán en el siguiente apartado. Además, las muestras 2 y 4 de Almonaster la Real y la 1 de Veredas presentan clinopiroxeno, lo cual es típico de la parte alta de la serie de las metabasitas de Acebuches. El resto, sin embargo, no lo presentan, lo que indica un claro descenso de la temperatura en la serie hacia su parte media, ya que la aparición de clinopiroxeno se relaciona estrechamente con la influencia del metamorfismo de alto grado de la primera fase tectono-metamórfica que afectó a estas rocas.

TABLA V.3. Sistemas de deslizamiento observados en las anfibolitas bandeadas del corte de Almonaster la Real ($T > 725^{\circ}\text{C}$) fuera de la influencia de la zona de cizalla Suribérica (ZCS). Se presentan los posibles planos y direcciones de deslizamiento en cada muestra (? : plano o dirección dudoso)¹ y a partir de ellos, los sistemas que podrían llegar a activarse en cada muestra.

MUESTRA	PLANOS	DIRECCIONES	SIST. DESLIZAMIENTO
Almonaster (4) (826°C)	(010)		(010) [001]
	(001) ?	[010]	(001) [010]
	$(0\bar{2}1)$?	[001]	$(1\bar{1}0)$ [001]
	$(1\bar{1}0)$		
Almonaster (2) (790°C)	(010)	[100] ?	(010) [100]
	(001) ?	[010]	(001) [100]
		$\perp[001]/(010)$	(001) [010]
			(010) $\{\perp[001]/(010)\}$
Almonaster (7) (727°C)	(001)		(001) [100]
	(021) ?	[100] ?	(001) [010]
	$(1\bar{1}0)$	[010]	(021) [100]
	$(\bar{2}01)$?	$\perp[001]/(010)$	$(\bar{2}01)$ [010]

Los tipos de sistemas de deslizamiento² quedan resumidos en:

- Principal (observado en las tres muestras): (001)[010]
- Secundario (observado en dos de las muestras): (001)[100]^{2,7}, (010) $\{\perp[001]/(010)\}$ ^{2,7}
- Terciario (observados en una sola muestra): (010)[001]⁴, $(1\bar{1}0)$ [001]⁴, (010) $\{\perp[001]/(010)\}$ ², (010)[100]², $(\bar{2}01)$ [010]⁷, (021)[100]⁷

Esta clasificación de los sistemas de deslizamiento según su importancia estadística en principal, secundario y terciario, es semejante a la utilizada por Kruse *et al.* (2001).

¹ Los símbolos de interrogación se emplean para hacer referencia a aquellas direcciones y/o planos sobre los cuales se tienen ciertas dudas de que pudieran ser posibles direcciones y planos de deslizamiento. Es por ello que los sistemas de deslizamiento obtenidos como combinación de las direcciones y planos dudosos deban tratarse con cierta precaución.

² Los superíndices indican el número de muestra donde se han observado los sistemas de deslizamiento.

TABLA V.4. Sistemas de deslizamiento en las anfíbolitas bandeadas del corte de Veredas ($T > 750^{\circ}\text{C}$) fuera de la influencia de la ZCS. Se presentan los posibles planos y direcciones de deslizamiento en cada muestra (? : plano o dirección dudoso) y según éstos los sistemas que podrían llegar a activarse en cada muestra.

MUESTRAS	PLANOS	DIRECCIONES	SIST. DESLIZAMIENTO
Veredas (1) (827°C)	(010) (021)	[100] ? [010] ?	(010) [100] (021) [100]
Veredas (2) (725°-825°C)	(100) (010) (0 $\bar{2}$ 1)	[100] [010] [001] ? $\perp$ [001]/(010)	(100) [010] (100) [001] (010) [100] (010) [001] (0 $\bar{2}$ 1) [100] (010) { $\perp$ [001]/(010)}
Veredas (4) (725°-825°C)	(100) (010) ? (001) ? (0 $\bar{2}$ 1) (1 $\bar{1}$ 0) ? ($\bar{2}$ 01)	[100] ? [010] [001] $\perp$ [001]/(010)	(100) [010] (100) [001] (010) [001] (001) [010] (001) [010] (010) [100] (0 $\bar{2}$ 1) [100] (1 $\bar{1}$ 0) [001] ($\bar{2}$ 01) [010] (010) { $\perp$ [001]/(010)}

Tipos de sistemas de deslizamiento:

- Principal (observado en las tres muestras): (010)[100]
- Secundario (observado en dos de las muestras, indicadas con los superíndices): (100)[010]^{2, 4}, (100)[001]^{2, 4}, (010)[001]^{2, 4}, (0 $\bar{2}$ 1)[100]^{2, 4}, (010){ $\perp$ [001]/(010)}^{2, 4}
- Terciario (observados en una sola muestra): (001)[010]⁴, (001)[100]⁴, (021)[100]¹, ($\bar{2}$ 01)[010]⁴, (1 $\bar{1}$ 0)[001]⁴

Comparando las Tablas V.3 y V.4, se observa una mayor multiplicidad de sistemas de deslizamiento en las muestras del corte de Veredas (Tabla V.4), sobre todo en el caso de la muestra 4, en la que parecen operar hasta un total de 9 sistemas de deslizamiento diferentes. El sistema de deslizamiento principal, que es el más importante de todos, es diferente para cada corte. En Almonaster la Real se trata de (001)[010] y en Veredas es (010)[100]. Otras diferencias importantes son:

- El sistema de deslizamiento principal en Almonaster la Real es, sin embargo, un sistema de tipo terciario en Veredas. Y el sistema principal en Veredas lo es de tipo secundario en Almonaster.
- Se observan dos sistemas secundarios en Almonaster la Real frente a los cinco de Veredas.
- Se observan dos sistemas terciarios comunes a ambos cortes: ($\bar{2}$ 01)[010] y (1 $\bar{1}$ 0)[001].

5.2.3. Sistemas de deslizamiento en las metabasitas afectadas por la zona de cizalla Suribérica (ZCS)

En este apartado se exponen los sistemas de deslizamiento que se interpretan en las anfíbolitas cizalladas del corte de Almonaster la Real y Veredas (Tabla V.5) y los esquistos verdes del corte de Almonaster la Real (Tabla V.6). Todas las muestras se encuentran afectadas por la zona de cizalla Suribérica (ZCS). En el caso de la Tabla V.5, las muestras 11, 14 y 15 de Almonaster la Real, y la 3 y 5 de Veredas, son anfíbolitas cizalladas que tienen en común la temperatura (700°-750°C) y la intensidad de la deformación de la ZCS. De igual modo, las asimetrías de las fábricas, especialmente las de (010), son congruentes con el sentido de movimiento observado en cada corte del bloque de techo hacia el SO (véase, no obstante, el apartado 5.4). En el caso de la muestra 16 de Almonaster la Real (Tabla V.6), se trata de un esquistos verde, y aunque no se tienen datos sobre su temperatura de deformación, se estima que debe ser inferior a 550°C ya que es bajo estas condiciones donde se estabiliza la asociación de clorita, epidota y actinolita.

TABLA V.5. *Sistemas de deslizamiento en las anfíbolitas cizalladas de los cortes de Almonaster la Real y Veredas afectadas por la ZCS ($T \approx 550^\circ\text{-}725^\circ\text{C}$). Se presentan los posibles planos y direcciones de deslizamiento en cada muestra (? : plano o dirección dudoso) y según éstos los sistemas de deslizamiento que pueden llegar a activarse en cada una de ellas.*

MUESTRA	PLANOS	DIRECCIONES	SIST. DESLIZAMIENTO
Almonaster (11)	(010) (0 $\bar{2}$ 1)	[100] [001] $\perp[001]/(010)$	(010) [100] (010) [001] (0 $\bar{2}$ 1) [100] (010) { $\perp[001]/(010)$ }
Almonaster (14)	(010) (021) (0 $\bar{2}$ 1)	[100]	(010) [100] (021) [100] (0 $\bar{2}$ 1) [100]
Almonaster (15) (699°C)	(010) (001) ? (021) (110) (0 $\bar{2}$ 1)	[100] [001]	(010) [100] (010) [001] (001) [100] (021) [100] (110) [001] (0 $\bar{2}$ 1) [100]
Veredas (3) (731°C)	(010) ? (001) (021) (0 $\bar{2}$ 1) (1 $\bar{1}$ 0) ?	[100]	(010) [100] (001) [100] (021) [100] (0 $\bar{2}$ 1) [100]
Veredas (5)	(100) ? (010) ? (1 $\bar{1}$ 0) ? ($\bar{2}$ 01)	[100] [001] $\perp[001]/(010)$	(100) [001] (010) [100] (010) [001] (1 $\bar{1}$ 0) [001] (010) { $\perp[001]/(010)$ }

Tipos de sistemas de deslizamiento:

- Principal (observado en las 5 muestras): $(010)[100]$
- Secundario (observados en 3 ó 4 de las muestras): $(010)[001]^{11, 15, 5}$, $(001)[100]^{15, 3, 5}$, $(021)[100]^{14, 15, 3}$, $(0\bar{2}1)[100]^{11, 14, 15, 3}$.
- Terciario (observados en 1 ó 2 de las cinco muestras): $(110)[001]^{15}$, $(1\bar{1}0)[001]^{3, 5}$, $(010)\{\perp[001]/(010)\}^{11, 5}$.

TABLA V.6. Sistemas de deslizamiento en los esquistos verdes del corte de Almonaster la Real ($T < 550^{\circ}\text{C}$), afectados por la ZCS. Se presentan los posibles planos y direcciones de deslizamiento en cada muestra (? : plano o dirección dudoso) y según éstos los sistemas que podrían llegar a activarse en cada caso.

MUESTRA	PLANOS	DIRECCIÓN	SIST. DESLIZAMIENTO
Almonaster (16) ($< 550^{\circ}\text{C}$)	(010)		
	(001)	[010]	(010) [001]
	(021) ?	[001] ?	(001) [010]
	$(0\bar{2}1)$	$\perp[100]/(010)$?	(010) $\{\perp[100]/(010)\}$

Tipos de sistemas de deslizamiento:

- Principal: $(001)[010]$
- Secundario: $(010)[001]$
- Terciario: $(010)\{\perp[100]/(010)\}$

El sistema de deslizamiento principal en Almonaster la Real y en Veredas es diferente, al igual que ocurría en el apartado anterior (5.2.1) en las muestras no afectadas por la ZCS. Para el primero de los dos cortes, el sistema principal de deslizamiento es $(010)[100]$, mientras que para el segundo es $(001)[010]$. Conviene destacar otro aspecto importante: el sistema de deslizamiento principal (Tabla V.3) en las anfíbolitas bandeadas de Almonaster la Real es $(001)[010]$, el mismo que en los esquistos verdes de este mismo corte (Tabla V.6). De igual manera, el sistema principal en las anfíbolitas bandeadas de Veredas ($(010)[100]$, Tabla V.4) es el mismo que el de las anfíbolitas cizalladas de Almonaster la Real y Veredas (Tabla V.5).

En cuanto a los sistemas de deslizamiento subordinados (secundarios y terciarios), son comunes tanto para las anfíbolitas cizalladas de Almonaster la Real y Veredas como para los esquistos verdes de Almonaster la Real. Sólo cabe destacar que en este último caso, al tratarse de una única muestra (Tabla V.6), el número de sistemas de deslizamiento que se observa es menor lógicamente. Una diferencia significativa es que en los esquistos verdes [010] es una posible dirección de deslizamiento, bastante clara, mientras que en las anfíbolitas cizalladas no se ha observado dicha dirección en ninguna de las cinco muestras estudiadas.

5.2.4. Tipos de fábricas en función de la temperatura de la deformación en la ZCS

En este apartado proponemos una clasificación de los tipos de fábrica en función de la temperatura de deformación y de si las muestras se encuentran o no afectadas por la ZCS. Diferenciamos entre fábricas afectadas por la ZCS (fábricas tipo I y II, Tabla V.7) y fábricas no afectadas por dicha zona de cizalla (fábricas tipo III y IV, Tabla V.8). Las características más relevantes son:

- *Fábrica I:* esquistos verdes (muestra 16 de Almonaster la Real), temperatura $\leq 550^{\circ}\text{C}$ y (001)[010] como sistema de deslizamiento principal.
- *Fábrica II:* anfíbolitas cizalladas (muestras 11, 14 y 15 de Almonaster la Real, y muestras 3 y 5 de Veredas), temperatura en torno a $550^{\circ}\text{--}725^{\circ}\text{C}$ y (010)[100] como sistema de deslizamiento principal. También podemos considerar como sistema principal, aunque de menor importancia, $(0\bar{2}1)[100]$.
- *Fábrica III:* anfíbolitas bandeadas (muestra 7 de Almonaster la Real y muestras 1, 2 y 4 de Veredas), temperatura en torno a $725^{\circ}\text{--}825^{\circ}\text{C}$ y sistema de deslizamiento principal (010)[100].
- *Fábrica IV:* anfíbolitas bandeadas (muestras 2 y 4 de Almonaster la Real), temperatura $> 750^{\circ}\text{C}$ y sistema de deslizamiento principal (001)[010]. Se podría considerar como un caso especial de la fábrica III donde se desactiva el plano de deslizamiento (010) y se hace más importante, sin embargo, (001).

TABLA V.7. Tipos de fábricas que se desarrollan en las rocas afectadas por la ZCS en los cortes de Almonaster la Real y Veredas. Se distinguen entre sistemas de deslizamiento principal y subordinados (secundarios y terciarios). El superíndice indica la muestra en la que se ha observado el sistema de deslizamiento en cuestión.

FÁBRICA I	Muestras	Sist. Desliz. Principal	Sist. Desliz. Secundario	Sist. Desliz. Terciario
Esquistos verdes $T < 550^{\circ}\text{C}$	Almonaster (16)	(001) [010]	(010) [001]	(010) $\{\perp[100]/(010)\}$

FÁBRICA II	Muestras	Sist. Desliz. Principal	Sist. Desliz. Secundario	Sist. Desliz. Terciario
Anfíbolitas cizalladas $550^{\circ}\text{C} < T < 725^{\circ}\text{C}$	Almonaster (11)			
	Almonaster (14)	(010) [100]		(010) $\{\perp[001]/(010)\}^{11,5}$
	Almonaster (15)	$(0\bar{2}1)[100]$	(010) [001] ^{11, 15, 5}	(110) [001] ¹⁵
	Veredas (3)		(001) [100] ^{15, 3}	$(1\bar{1}0)[001]^{3,5}$
	Veredas (4)			

A pesar de las diferencias en la temperatura, el tipo de roca y las condiciones de deformación, es decir, de si las muestras están afectadas o no por la ZCS, se observa, en cuanto a sistemas de deslizamiento principales se refiere, una semejanza entre las fábricas I y IV y las fábricas II y III. En el primer caso, el sistema principal es (001)[010] y en el segundo caso es

(010)[100]. No obstante, hay diferencias significativas entre los distintos grupos en lo referente a los sistemas de deslizamiento subordinados. Esto ya se comentó en el apartado anterior (5.2.3). Para entenderlo mejor, ver las Tablas V.7 y V.8.

TABLA V.8. Tipos de fábricas que se desarrollan en las rocas afectadas por la ZCS de los cortes de Almonaster la Real y Veredas. Se distinguen entre sistemas de deslizamiento principal y subordinados (secundarios y terciarios). El superíndice indica la muestra en la que se ha observado el sistema de deslizamiento en cuestión.

FÁBRICA III	Muestras	Sist. Desliz. Principal	Sist. Desliz. Secundario	Sist. Desliz. Terciario
Anfibolitas bandeadas $T \cong 725^{\circ}\text{C} - 825^{\circ}\text{C}$	Almonaster (7)		(100) [010] ^{2, 4}	(1 $\bar{1}$ 0) [001] ⁴
	Veredas (1)	(010) [100]	(100) [001] ^{2, 4}	(0 $\bar{2}$ 1) [100] ⁴
	Veredas (2)		(010) [001] ^{2, 4}	(021) [100] ¹
	Veredas (4)		(010) $\{\perp[001]/(010)\}$ ^{2, 4}	

FÁBRICA IV	Muestras	Sist. Desliz. Principal	Sist. Desliz. Secundarios
Anfibolitas bandeadas $T > 750^{\circ}\text{C}$			(010) [001] ⁴
	Almonaster (2)	(001) [010]	(010) [100] ²
	Almonaster (4)		(001) [100] ²
			(010) $\{\perp[001]/(010)\}$ ²
			(1 $\bar{1}$ 0) [001] ⁴

5.2.5. Resumen de los sistemas de deslizamiento en los cortes de Almonaster la Real y Veredas

En este aparato exponemos, a modo de síntesis y resumen final, los distintos tipos de sistemas de deslizamiento (principal, secundario y terciario) que se observan en los cortes geológicos de Almonaster la Real (Tabla V.9) y Veredas (Tabla V.10). En ambas tablas se hace referencia al tipo de rocas de las muestras estudiadas, la influencia o no de la ZCS en ellas y la temperatura de deformación que han experimentado. En el caso de Veredas, a diferencia de Almonaster la Real, se desconocen los sistemas de deslizamiento para los esquistos verdes, ya que no se ha podido medir con la platina universal ninguna de las muestras de esquistos tomadas en el campo, debido a su alto grado de alteración y a su reducido tamaño de grano.

TABLA V.9. Resumen de los sistemas de deslizamiento principales y subordinados (secundarios y terciarios) en las muestras del corte de Almonaster la Real. El superíndice indica la muestra en la que se ha observado cada sistema. Las muestras se ordenan según la influencia o no de la ZCS y la temperatura de deformación.

			Muestra	Sist. Desliz. Principal	Sist. Desliz. Secundario	Sist. Desliz. Terciario
NO influencia de la ZCS	Anfibolitas bandeadas	T > 800°C	Almonaster (4), 826°C Almonaster (2), 790°C	(001) [010] ^{2,4}	(001) [100] ² (010) [100] ² (010) [001] ⁴ (110) [001] ⁴ (010) {⊥[001]/(010)} ²	
		T < 800°C	Almonaster (7), 727°C	(001) [010]	(001) [100] (021) [100] ($\bar{2}$ 01) [010] (010) {⊥[001]/(010)}	
SI influencia de la ZCS	Anfibolita cizallada	T > 550°C	Almonaster (11) Almonaster (14) Almonaster (15), 699°C	(010) [100] ^{11, 14, 15} (0 $\bar{2}$ 1) [100] ^{11, 14, 15}	(010) [001] ^{11, 15} (021) [100] ^{14, 15}	(001) [100] ¹⁵ (110) [001] ¹⁵ (010){⊥[001]/(010)} ¹¹
	Esquistos verdes	T < 550°C	Almonaster (16)	(001) [010]	(010) [001]	(010) {⊥[100]/(010)}

En la Tabla V.9 hemos diferenciado entre muestras no afectadas por la ZCS en el corte de Almonaster la Real, todas ellas anfibolitas bandeadas (muestras 2, 4 y 7), y muestras que, sin embargo, sí se encuentran afectadas por la zona de cizalla (muestras 11, 14, 15 y 16). Entre las anfibolitas bandeadas diferenciamos aquellas sometidas a una temperatura de deformación igual o superior a 800°C (muestras 2 y 4) y las que han experimentado una temperatura inferior a los 800°C (en este caso, sólo la muestra 7). En cuanto a las muestras que sí se encuentran afectadas por la ZCS, diferenciamos entre las anfibolitas cizalladas a temperatura superior a 550°C (muestras 11, 14 y 15), y los esquistos verdes deformados a temperaturas por debajo de los 550°C (muestra 16).

Una vez propuesta esta clasificación, se enumeran los sistemas de deslizamiento principales, secundarios y terciarios. Hay casos, como en el de las muestras no afectadas por la ZCS, en que no se hace mención alguna a sistemas de deslizamiento terciarios y sólo se diferencian entre principal y secundarios.

TABLA V.10. Resumen de los sistemas de deslizamiento principales y subordinados (secundarios y terciarios) de las muestras del corte de Veredas. El superíndice indica la muestra en la que se ha observado cada sistema. Las muestras se ordenan según la influencia o no de la ZCS y la temperatura de deformación.

			Muestra	Sist. Desliz. Principal	Sist. Desliz. Secundario	Sist. Desliz. Terciario
NO influencia de la ZCS	Anfibolitas bandeadas	T > 750°C	Veredas (1), 827°C Veredas (2), 775°C ?	(010) [100] ^{1,2}	(100) [010] ² (100) [001] ² (010) [001] ² (021) [100] ¹ (0 $\bar{2}$ 1) [100] ² (010) { $\perp$ [001]/(010)} ²	
		T < 750°C	Veredas (4)	(100) [010] (100) [001]	(010) [001] ($\bar{2}$ 01) [010] (010) { $\perp$ [001]/(010)}	(001) [100] (001) [010] (1 $\bar{1}$ 0) [001]
SI influencia de la ZCS	Anfibolita cizallada	T > 550°C	Veredas (3), 731°C Veredas (5)	(010) [100] ^{3,5} (001) [100] ³	(010) [001] ⁵ (0 $\bar{2}$ 1) [100] ³ (1 $\bar{1}$ 0) [001] ⁵ (010) { $\perp$ [001]/(010)} ³	
	Esquistos verdes	T < 550°C	Se desconocen los sistemas de deslizamiento (no se ha medido ninguna muestra)			

El tipo de criterio que hemos seguido para la clasificación y resumen de los sistemas de deslizamiento del corte de Veredas es el mismo que para Almonaster la Real. Si comparamos los sistemas de deslizamiento de ambos cortes, podemos observar que:

- El sistema de deslizamiento principal en las anfibolitas bandeadas (no afectadas por la ZCS) de Almonaster la Real es (001)[010], mientras que en Veredas son tres y no uno los sistemas principales: (010)[100], (100)[010] y (100)[001]. En cuanto a los sistemas de deslizamiento subordinados, también se observan diferencias importantes en un caso y otro. A pesar de la multiplicidad de estos sistemas en ambos cortes (7 en el caso de Almonaster la Real y 10 en Veredas), sólo 5 de ellos son comunes: (010)[001], (001)[100], (021)[100], ($\bar{2}$ 01)[010] y $\perp$ [001]/(010).
- Los sistemas de deslizamiento principales en las anfibolitas cizalladas (afectadas por la ZCS) son: (010)[100] y (0 $\bar{2}$ 1)[100] en Almonaster la Real, y (010)[100] y (001)[100] en Veredas. A diferencia de las anfibolitas bandeadas, en donde no coincidían ninguno de ellos, en este caso el sistema de deslizamiento (010)[100] es común para ambos cortes geológicos. En cuanto a los sistemas subordinados, sólo se observan dos que son comunes a ambos cortes: (010)[001] y (010){ $\perp$ [001]/(010)}.

- En los esquistos verdes (afectados por la ZCS) sólo tenemos la referencia de los sistemas de deslizamiento de la muestra 16 de Almonaster la Real. Esto es porque no se ha podido medir con la platina universal ninguna muestra de esquistos en el corte de Veredas debido, como se mencionó anteriormente, al elevado grado de alteración y al reducido tamaño de grano de las plagioclasas en este tipo de rocas.

5.3. COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE DESLIZAMIENTO ACTIVOS EN PLAGIOCLASAS DEDUCIDOS EN ESTE TRABAJO Y LOS OBSERVADOS POR OTROS AUTORES

En el apartado 2.5.4 (sistemas de deslizamiento) del capítulo de antecedentes, hicimos referencia al gran desconocimiento que en la actualidad se tiene sobre la orientación cristalográfica preferente en plagioclasas, a pesar de ser éste uno de los minerales más abundantes en las rocas que constituyen la corteza. El hecho de que existan muy pocos estudios acerca de la OCP en plagioclasas (en los feldespatos en general), hace que conozcamos muy poco sobre la deformación plástica que éstos experimentan y, por lo tanto, de los sistemas de deslizamiento que pueden llegar a desarrollar.

Un inconveniente importante, con el que hemos contado desde un principio, es que la mayoría de autores que se dedican al estudio de la OCP en plagioclasas no llegan a realizar un examen tan minucioso como el desarrollado en este trabajo (ver Tabla V.1 para más detalle). Se suelen centrar sólo y exclusivamente en el estudio de la orientación preferente de los ejes de la indicatriz óptica y, con suerte, en unas pocas direcciones y/o planos cristalográficos que, además, no siempre coinciden con los estudiados en este trabajo. El inconveniente, por ejemplo, de centrarse exclusivamente en el estudio de los ejes de la indicatriz óptica es que estas tres direcciones cristalográficas no son ilustrativas de la fábrica total de la roca y son, por lo que ya hemos visto en nuestro caso, bastante insensibles a la asimetría de la fábrica, la cual sí se puede llegar a apreciar en otros elementos. Por lo tanto, estudios como los de Olsen & Kohlstedt (1985), Rosenberg & Stünitz (2003), Schulmann *et al.* (1996) y Shelley (1979), no son de excesiva utilidad ya que sólo se centran en el estudio de la orientación cristalográfica preferente de los ejes ópticos. Otros autores como Ji & Mainprice (1988), además de estudiar la orientación de los ejes ópticos también estudian la de los ejes cristalográficos. Ague *et al.* (1990), Heidelbach *et al.* (2000), Ji *et al.* (1988), Jiang *et al.* (2000), Kruse *et al.* (2001), Lapworth *et al.* (2002) y Siegesmund *et al.* (1994) no estudian los ejes ópticos sino los cristalográficos, e incluso en algunos casos la orientación de (100), (010) y (001). Egydio-Silva & Mainprice (1999), a diferencia del resto, estudian las direcciones de esfuerzo. Ji *et al.* (1994), por ejemplo, estudian con la platina universal un gran número de elementos cristalográficos en plagioclasas (An₅₀) de una milonita anortosítica de la zona de cizalla de Morin (Québec, Canadá). Éstos son las direcciones [100], [001], [110], [011], [101], [10 $\bar{1}$], [111], [012] y [112], y los planos (010), (100), (001), (110), (101), (10 $\bar{1}$), (111), (120), (01 $\bar{1}$), (02 $\bar{1}$), (1 $\bar{2}$ 1) y (03 $\bar{1}$). En nuestro caso, y como ya hemos

visto, estudiamos la OCP para un total de 16 elementos cristalográficos distintos: 8 direcciones correspondientes a $\perp[100]/(010)$, $\perp[001]/(010)$, los ejes ópticos y los ejes cristalográficos; y los siguientes planos: (010), (001), (021), $(0\bar{2}1)$, (100), (110), $(1\bar{1}0)$ y $(\bar{2}01)$.

Ji *et al.* (1994) llegan a plantear un total de cuatro sistemas de deslizamiento, pero sólo uno de ellos es comparable con los nuestros, ya que los restantes tienen en cuenta otras direcciones y/o planos diferentes a los estudiados en nuestro trabajo. Como ya se ha indicado, la mayoría de autores que se han dedicado al estudio de la OCP en plagioclasas se han centrado únicamente en los ejes ópticos o en los ejes cristalográficos y, como mucho, en los planos (010) y (001). Es por esta razón, que al no estudiar otros planos como (021), $(0\bar{2}1)$, (110), $(1\bar{1}0)$ o $(\bar{2}01)$, los sistemas de deslizamiento que plantean son bastante más limitados que los que hemos podido deducir nosotros. De ahí, la limitación de no poder llegar a establecer una comparativa tan completa como la que hubiéramos deseado sobre los posibles sistemas de deslizamiento que pueden llegar a activarse en plagioclasas.

Nuestro propósito en este apartado es establecer las principales similitudes y/o diferencias entre los sistemas de deslizamiento propuestos por otros autores en comparación con los deducidos por nosotros, a pesar de no poder comparar, por ejemplo, sistemas de deslizamiento como $(021)[100]$, $(1\bar{1}0)[001]$ o $(\bar{2}01)[010]$, tal y como vimos en el apartado 5.2, por la ausencia de información acerca de ciertos planos o direcciones que los componen. En la comparación seguiremos la misma clasificación que en el apartado anterior, en donde distinguimos entre sistemas de deslizamiento en rocas bajo la influencia de la zona de cizalla Suribérica y fuera de ésta. Nos centraremos principalmente en los sistemas de deslizamiento que consideramos como primarios o principales³.

5.3.1. Anfibolitas bandeadas del corte de Almonaster la Real

Recordemos que en las anfibolitas bandeadas de Almonaster la Real (muestras 2, 4 y 7), no afectadas por la zona de cizalla Suribérica, el sistema de deslizamiento principal es $(001)[010]$ y el secundario es $(001)[100]$. Estos sistemas, sobre todo el último, fueron observados también por Kruhl (1987a) y Siegesmund *et al.* (1994) en rocas de alto grado metamórfico deformadas naturalmente. Estos autores observaron que para plagioclasas en rocas de facies de anfibolitas, los planos (010) eran subparalelos a la foliación y las direcciones [100] eran subparalelas a la lineación.

Kruhl (1987a) estudió con la platina universal la OCP de plagioclasas deformadas naturalmente bajo condiciones de facies de anfibolitas-esquistos verdes. Concretamente, el sistema $(001)[010]$ lo observó en gneises de facies de anfibolitas donde la plagioclasa tenía una composición An_{24-37} y constituía en torno a un 60% del volumen total de la roca. También observó

³ Para no volver a repetir las condiciones (ambiente geológico, rasgos de la deformación, tipo de roca, temperatura, presión, etc.) bajo las cuales los diferentes autores obtuvieron los sistemas de deslizamiento, ver el apartado 5.1 donde se especifica, autor por autor, tales características.

otros dos sistemas de deslizamiento adicionales: (010)[001] y (001)[100]; el primero de ellos en metapegmatitas, y el segundo en las metapegmatitas también y, además, en los gneises. En las metapegmatitas, a diferencia de los gneises, la plagioclase era de composición An_{10} y constituía un 30% del volumen total de la roca. Además, estas rocas se deformaron bajo condiciones de la parte alta de las facies de los esquistos verdes.

En nuestro caso, el sistema de deslizamiento (010)[001] es un sistema terciario y (001)[100] es algo más importante, es decir, un sistema de tipo secundario. Según Kruhl (1987a), el deslizamiento en el plano (001) no había sido considerado hasta entonces como un mecanismo de deformación importante, aunque autores como Olsen & Kohlstedt (1984) y Jensen & Starkey (1985) habían sugerido un posible deslizamiento paralelo a [100]. Y de hecho, el sistema (001)[100] lo observa Kruhl (*op.cit.*) y también nosotros en las anfibolitas bandeadas de Almonaster la Real. Incluso en trabajos más recientes como el de Heidelberg *et al.* (2000) en agregados de albita pura deformada experimentalmente a 900°C, 10-15 kbar y una tasa de deformación de 10^{-4} - 10^{-6} s⁻¹, estos autores observaron este mismo sistema de deslizamiento, aunque en muestras en las que las plagioclasas eran más anortíticas, no constituían la única fase mineral en la roca y, además, habían sido sometidas a temperaturas más bajas que las de Kruhl (*op.cit.*) y Siegesmund *et al.* (1994), equivalentes a condiciones de facies de la parte alta de los esquistos verdes y la parte media de las anfibolitas.

En cuanto a los estudios de Siegesmund *et al.* (1994), estos autores identificaron un sistema de deslizamiento principal y otro secundario, (001)[100] y (001)[010] respectivamente. La diferencia entre los sistemas de deslizamiento que identifican estos autores y los nuestros es que el que ellos consideran principal, nosotros lo consideramos secundario, y viceversa. El rango de temperaturas bajo el que serían activos esos sistemas de deslizamiento (620°-650°C) sería inferior al que sufrieron las rocas de Almonaster la Real.

5.3.2. Anfibolitas bandeadas del corte de Veredas

Las anfibolitas bandeadas de Veredas (muestras 1, 2 y 4), al igual que las de Almonaster la Real, tampoco se encuentran afectadas por la ZCS. Como vimos en la Tabla V.4, el sistema de deslizamiento principal en estas rocas es (010)[100]. Tullis (1983) considera que este sistema, junto con (010)[001], son típicos en tectonitas de alto grado (facies de anfibolitas-granulitas). De hecho, el sistema (010)[001] también lo observamos en nuestras muestras, pero lo consideramos como secundario, al igual que (100)[010] y (100)[001].

Centrándonos en el sistema de deslizamiento principal ((010)[100]), podemos citar a otros autores que también identifican en sus estudios éste mismo sistema. Es el caso de Ague *et al.* (1990), Rosenberg & Stünitz (2002) y Schulmann *et al.* (1996). Otros autores como Ji *et al.* (1988), Ji *et al.* (1994), Ji & Mainprice (1988, 1990), Kruhl (1987a, b), Kruse *et al.* (2001) y Olsen & Kohlstedt (1985) identifican sistemas de deslizamiento dominantes que coinciden, sin embargo, con los sistemas secundarios nuestros. Veamos cada caso por separado:

(010)[100] como sistema de deslizamiento principal

Schulmann *et al.* (1996) estudiaron granitoides porfíricos cizallados naturalmente bajo condiciones de facies de anfibolitas. La orientación cristalográfica la obtuvieron mediante el uso de la platina universal e identificaron dos sistemas de deslizamiento dominantes: (010)[100] y (010)[001]. El primero de ellos ha sido obtenido también experimentalmente para temperaturas próximas a 700°C y a una tasa de deformación de 10^{-6} s^{-1} (Tullis & Yund, 1977), y coincide con nuestro sistema de deslizamiento principal. El segundo de los sistemas que obtuvieron corresponde a un sistema de tipo secundario en nuestro caso. En líneas generales, las fábricas de plagioclasa y estos dos sistemas de deslizamiento son similares a los encontrados por Ji & Mainprice (1988) y Olsen & Kohlstedt (1985). Según Tullis (1983), estos tipos de sistemas son los habituales en tectonitas de alto grado (facies de anfibolitas o granulitas).

Rosenberg & Stünitz (2002) identificaron un único sistema de deslizamiento (010)[100], el cual coincide con nuestro sistema de deslizamiento principal. Si bien el plano (010) es el plano más comúnmente observado en plagioclasas deformadas experimental y naturalmente (Marshall & McLaren, 1977; Montardi & Mainprice, 1981; Olsen & Kohlstedt, 1984), la dirección de deslizamiento [100] es inusual (la más frecuente es [001]), aunque ha sido identificada por otros autores como Kruhl (1987a, b) y Kruse *et al.* (1992). Es de resaltar que las fábricas estudiadas por Rosenberg & Stünitz (2002) corresponden a rocas sometidas a temperaturas de entre 580° y 670°C. Estas temperaturas son similares a las sufridas por la parte baja de las anfibolitas bandeadas, mientras que hacia techo las temperaturas fueron muy superiores (Tabla V.10). A pesar de ello, se mantiene o incluso se refuerza la actividad del sistema (010)[100], con independencia de la mayor actividad de mecanismos como el deslizamiento de bordes de grano. Es de suponer, por otra parte, que dicho mecanismo en las metabasitas de Acebuches, a diferencia de las muestras estudiadas por Rosenberg & Stünitz (2002), ya que el tamaño de grano medio, parámetro crítico de ese mecanismo, es grande en la parte alta de la serie de las anfibolitas de Acebuches.

(010)[100] como sistema de deslizamiento secundario

Olsen & Kohlstedt (1985) estudiaron plagioclasas de composición intermedia ($\text{An}_{25}\text{-An}_{48}$) deformadas naturalmente bajo condiciones de facies granulita (700°-800°C y 6-8 kbar). Las plagioclasas constituían en torno a un 40-70% del volumen total de las rocas y sufrieron una intensa deformación dúctil por deslizamiento intracrystalino y maclado. Los análisis de TEM mostraron (010)[001] como sistema de deslizamiento dominante, al menos durante la deformación natural a alta temperatura de la oligoclasa y la andesina, como demuestran los resultados de los estudios llevados a cabo mediante el TEM por estos mismos autores en los años 1981 y 1984. Orientaciones cristalográficas similares a las encontradas por Olsen & Kohlstedt (*op.cit.*) fueron también encontradas por Crampton (1957) en albitas de los esquistos de Moine y por Shelley (1977) en albitas de los esquistos de Haast (Nueva Zelanda).

Kruhl (1987a) observó los siguientes sistemas de deslizamiento: $(010)[001] \pm (001)[100]$ en plagioclasas de composición An_{10} , y $(001)[100] \pm (001)[010]$ en plagioclasas de composición An_{24-37} . En ninguno de los casos existe coincidencia con nuestro sistema de deslizamiento principal; de hecho, $(010)[001]$ correspondería a un sistema de tipo secundario en las anfibolitas bandeadas de Veredas, mientras que $(001)[100]$ y $(001)[010]$ serían sistemas de deslizamiento de menor importancia aún, es decir, de los considerados de tipo terciario. Es probable que la diferencia se deba al menor grado metamórfico de las rocas estudiadas por este autor.

Ji *et al.* (1988) estudiaron, con la platina universal, plagioclasas de composición An_{35-45} en el caso de los gneises máficos y An_{25-35} en los peralcalinos. Los sistemas de deslizamiento que reconocieron estos autores fueron $(010)[100]$ y $(010)[001]$. El primero de ellos coincide con el sistema de deslizamiento principal observado en las anfibolitas bandeadas de Veredas, y el segundo coincide con uno de nuestros tres sistemas de deslizamiento de tipo secundario, junto con $(100)[010]$ y $(100)[001]$. Las temperaturas de deformación de los gneises que estudiaron ($>750^{\circ}\text{C}$) coinciden con las de buena parte de las anfibolitas bandeadas de Almonaster la Real.

Ji & Mainprice (1988) investigaron rocas deformadas naturalmente y procedentes de ambientes tectónicos muy diferentes (ver Tabla II.1). Utilizaron el TEM y la platina universal en dos secciones ortogonales. Todas las muestras eran tectonitas que presentaban evidencias de deformación plástica y abarcaban un amplio rango de composición, de An_0 a An_{80} . El TEM mostró dos sistemas de deslizamiento, uno dominante $(010)[001]$ y otro secundario $(010)[100]$. Este último es el sistema principal o dominante observado en nuestras muestras, mientras que el que ellos consideran como dominante es, para nosotros, un sistema secundario junto con $(100)[010]$ y $(100)[001]$. Los dos sistemas de deslizamiento que observaron estos autores están de acuerdo con trabajos experimentales previos (Marshall & McLaren, 1977; Tullis, 1983; Gandais & Gullaime, 1984) y con estudios de plagioclasas deformadas naturalmente (Olsen & Kohlstedt, 1984; Montardi & Mainprice, 1987). El rango de temperatura que afectó a las rocas estudiadas por Ji & Mainprice (1988) (600° - 900°C) incluye a las temperaturas bajo las que se deformaron las anfibolitas bandeadas de Acebuches.

Ji & Mainprice (1990) estudiaron gneises anfibolítico-granulíticos de la corteza inferior. La plagioclase era de composición intermedia (An_{40-50}) y había sufrido una intensa deformación dúctil por deslizamiento intracrystalino y maclado. Estudios de TEM mostraron que las fábricas presentaban una intensa orientación cristalográfica producida por el sistema de deslizamiento dominante $(010)[001]$. Éste es el único que llegaron a observar, y aunque no coincide con nuestro sistema de deslizamiento principal, sí coincide con uno de los tres sistemas secundarios que hemos reconocido en las anfibolitas bandeadas de Veredas.

Ji *et al.* (1994) estudiaron, mediante la platina universal también, las plagioclasas de una zona milonítica con una composición entre An_{45} y An_{55} . Estos autores identificaron que los planos (010) , $(01\bar{1})$, $(02\bar{1})$, $(1\bar{2}1)$ y $(03\bar{1})$ se alineaban paralelos o subparalelos al plano de foliación, con lo que todos ellos serían posibles planos de deslizamiento. Así mismo, las direcciones $[001]$, $[111]$ y $[012]$ presentan una alta concentración a bajo ángulo de la lineación mineral, con lo que constituirían posibles direcciones de deslizamiento también. De todo ello, dedujeron el siguiente

conjunto de sistemas de deslizamiento: $(010)[001]$, $(01\bar{1})[111]$, $(02\bar{1})[012]$ y $(1\bar{2}1)[012]$. Sólo el primero de ellos lo reconocemos nosotros como sistema de deslizamiento de tipo secundario en nuestras muestras, el resto, sin embargo, no los hemos podido identificar en ningún caso ya que no hemos estudiado los planos y direcciones que estos autores consideran.

Kruse *et al.* (2001) estudiaron gabros anortosíticos deformados a aproximadamente 700°C y presiones inferiores a 9 kbar. Identificaron en los gabros un único sistema de deslizamiento dominante: $(010)[001]$, que es, sin embargo, un sistema de tipo secundario en las anfibolitas bandeadas de Veredas. También identificaron un conjunto de sistemas de deslizamiento secundarios. Entre ellos destacan $(010)[100]$, que se corresponde con el sistema de deslizamiento principal identificado en nuestras muestras, y $(001)[100]$ que para nosotros es de tipo terciario. El resto de sistemas secundarios que plantean hacen referencia a planos y/o a direcciones que no hemos estudiado, como es el caso de: $(010)[101]$, $(010)[\bar{2}01]$, $(001)1/2[110]$, etc.

5.3.3. Anfibolitas cizalladas de los cortes de Almonaster la Real y Veredas

Las anfibolitas cizalladas son las muestras 11, 14 y 15 de Almonaster la Real, y la 3 y 5 de Veredas. Todas ellas están afectadas por la ZCS (ver Tabla V.4). Para este tipo de rocas hemos identificado un único sistema de deslizamiento principal, $(010)[100]$, que es el mismo que en las anfibolitas bandeadas de Veredas, y cuatro sistemas de tipo secundario: $(010)[001]$, $(001)[100]$, $(021)[100]$ y $(0\bar{2}1)[100]$. Atendiendo principalmente al sistema de deslizamiento principal y, en menor grado, a los sistemas subordinados, podemos observar claramente la enorme similitud entre las anfibolitas cizalladas de Veredas y Almonaster la Real y las anfibolitas bandeadas de Veredas (ver Tabla V.8 y V.9). Es por ello que todas las observaciones realizadas en el apartado 5.3.2 son también válidas para éste. De hecho, las temperaturas bajo las que se deformaron estas rocas durante la actuación de la ZCS (entre 550°C y 750°C), no difieren sustancialmente de las que afectaron a las anfibolitas bandeadas durante la fase anterior. No cabe esperar, por tanto, transiciones de fábrica sustanciales.

5.3.4. Esquistos verdes del corte de Almonaster la Real

La muestra 16 de Almonaster la Real es la única muestra de esquistos verdes que se ha podido medir con la platina universal. Recordemos que en Veredas no fue posible medir ninguna muestra de esquistos debido al reducido tamaño de grano y a la intensa alteración que presentaban las muestras.

En la muestra mencionada de Almonaster la Real, identificamos dos sistemas de deslizamiento. Uno de ellos es el principal $(001)[010]$, que es el mismo que en las anfibolitas bandeadas de Almonaster la Real, el otro es el secundario $(010)[001]$, que es muy típico también como sistema secundario en todas las muestras de ambos cortes, independientemente de la litología y su posición dentro de la pila de las metabasitas de Acebuches. Además, observamos una transición de fábrica entre las anfibolitas cizalladas de ambos cortes y los esquistos verdes.

Parece que al aumentar la temperatura se desactiva el plano de deslizamiento (001) y se activa, sin embargo, el plano (010), idea que también citan Heidelberg *et al.* (2000).

Al igual que en el apartado anterior, si atendemos únicamente al sistema de deslizamiento principal, los comentarios hechos en el apartado 5.3.1 sobre las anfibolitas bandeadas de Almonaster la Real sirven también para el caso de los esquistos verdes. Cabría exceptuar la cita a Heidelberg *et al.* (2000), ya que estos autores identifican un sistema de deslizamiento, (001)[100], que no está presente en los esquistos verdes de Almonaster la Real.

En definitiva, los escasos estudios sobre sistemas de deslizamiento en la transición entre esquistos verdes y anfibolitas, son confirmados por este trabajo.

5.3.5. Otros planos y/o direcciones de deslizamiento

Como vimos en el apartado 5.3, la mayoría de autores que han estudiado la OCP en plagioclasas no aportan conclusiones sobre otros posibles sistemas de deslizamiento que no sean aquellos que contengan a los planos (100), (010) y (001), y a las direcciones de los ejes cristalográficos [100], [010] y [001]. Únicamente algunos autores han apuntado hacia otros planos, direcciones y sistemas de deslizamiento distintos.

Así, por ejemplo, Ague *et al.* (1990) propusieron en los gabros, junto con (010)[001], el sistema (001) $_{1/2}$ [110]. Ambos parecen ser comunes en todos los granos, pero más aún en los que están maclados. También observan dislocaciones con vectores de Burgers según [001] y [110], y que clasifican como dislocaciones libres cuya abundancia varía según los granos, existiendo una mayor proporción en aquellos sin maclar. Identificaron dislocaciones secundarias a lo largo de límites de grano, como es el caso de [112] y [101]. En cuanto a los diques gabroicos, los vectores de Burgers son del tipo $[11\lambda]$, y en el caso de las dislocaciones [110] y [101] no son demasiado comunes. De hecho, otros autores como Olsen & Kohlstedt (1984) también las consideraron secundarias, al igual que las dislocaciones en $[1\bar{1}0]$.

Ji *et al.* (1994) propusieron como planos de deslizamiento aquellos que se disponían paralelos o subparalelos al plano de foliación, siendo éste el caso de (010), $(01\bar{1})$, $(02\bar{1})$, $(1\bar{2}1)$ y $(03\bar{1})$. De todos ellos, (010) y $(1\bar{2}1)$ eran los más probables. También identificaron [001], [111] y [021] como posibles direcciones de deslizamiento al estar a bajo ángulo de la lineación. Aparte del sistema de deslizamiento (010)[001], mencionan también $(01\bar{1})$ [111], $(02\bar{1})$ [021] y $(1\bar{2}1)$ [012] como sistemas de deslizamiento potenciales para sus modelos de fábricas.

Kruse *et al.* (2001) propusieron múltiples sistemas de deslizamiento recopilados de la bibliografía, aunque no hacen referencia a las fuentes concretas de donde los obtuvieron. Entre los sistemas de tipo secundario identificaron: (010)[101], (010)[201], (001) $_{1/2}$ [110], $(1\bar{1}\bar{1})$ [110], (001) $_{1/2}$ [$1\bar{1}0$], $(11\bar{1})_{1/2}$ [$1\bar{1}0$], $(10\bar{1})_{1/2}$ [111] y $(10\bar{1})_{1/2}$ [$1\bar{1}0$]; y como sistemas de tipo terciario identificaron sólo dos: $(11\bar{1})_{1/2}$ [112] y (110) [$1\bar{1}2$]. Como se puede ver, ninguno de ellos coincide con los sistemas de deslizamiento que hemos identificado en nuestras muestras porque, o bien los

planos, o las direcciones de deslizamiento en cuestión, no se corresponden con los elementos cristalográficos estudiados en nuestro caso.

5.4. APORTACIONES DE ESTE TRABAJO

En este último apartado se discutirán los resultados alcanzados en este trabajo, a la luz del estado actual de conocimientos sobre la evolución microestructural de las plagioclasas con la deformación y el metamorfismo. Se pretende, de esta manera, ofrecer una imagen del significado que este trabajo puede tener para lograr un mejor entendimiento de este aspecto tan complejo y desconocido de la microtectónica. Finalmente, se expondrán algunos argumentos, en relación con la utilidad de los resultados alcanzados, para precisar o mejorar los modelos de evolución tectonometamórfica de las metabasitas de Acebuches de los que se dispone en la actualidad.

5.4.1. Aportaciones al estudio de la OCP y de los sistemas de deslizamiento en plagioclasas

Uno de los principales objetivos de este trabajo es el establecimiento de unos patrones de variación de la OCP de la plagioclasa con el cambio en la temperatura y en la intensidad de la deformación. En definitiva, descubrir transiciones de fábrica en plagioclasas, similares a las conocidas desde antiguo en el cuarzo (Hobbs, 1985) y en otros minerales. En este sentido, nos parece especialmente relevante la identificación de una transición de fábrica al pasar el límite de las facies de los esquistos verdes a la de anfibolitas, en el inicio del comportamiento plástico de la plagioclasa. Esta transición de fábrica (T1 en la fig.5.3) podría situarse hacia los 550°C para 4-6 kbar de presión. T1 coincide con la variación microestructural descrita en las plagioclasas en el tránsito entre el grado medio y alto. El cambio en la OCP se debe a la distinta actividad de los sistemas de deslizamiento implicados en su génesis. Las fábricas de baja temperatura (que aquí hemos llamado fábricas I) se caracterizan por la frecuencia de deslizamiento a lo largo de los planos (001). Al aumentar la temperatura, los sistemas basados en ese plano pierden importancia y son sustituidos por sistemas basados en los planos (010). Aunque ambos grupos de sistemas de deslizamiento fueron descritos por separado, sobre todo el de mayor temperatura que es el más característico de las plagioclasas, en este trabajo se describe por primera vez la transición entre uno y otro y se establecen las condiciones puntuales de temperatura y presión que condicionan esta transición.

El paso de las anfibolitas bandeadas a las anfibolitas cizalladas supone únicamente un aumento en la deformación, en este caso a la asociada a la ZCS, sin que se haya detectado un cambio brusco en la temperatura de deformación. Como consecuencia, la OCP de las plagioclasas es muy similar en ambos tipos de litologías. La deformación en la ZCS se manifiesta únicamente mediante el desarrollo de fábricas mejor definidas. En este sentido, la fábrica de mayor temperatura descrita antes, y definida en este trabajo como fábrica II ó III, se mantiene sin

cambios significativos entre los 550°C y, al menos, los 750°C. Esto abarca la mayor parte de las facies de las anfibolitas.

En el corte de Almonaster la Real parece haberse identificado una segunda transición de fábrica, que daría paso nuevamente a la activación de los planos (001) en los sistemas de deslizamiento. Esta transición tendría lugar por encima de los 750°C y coincidiría con el paso de las facies de las anfibolitas a las facies de las granulitas. Ciertamente, el número de sistemas de deslizamiento activo bajo este régimen de muy alta temperatura (fábrica IV) es mucho mayor que en el de baja temperatura (fábrica I), lo que daría lugar a diferencias significativas en las OCP (fig.5.3, transición T2). La actividad de los planos (001) en condiciones de bajas temperaturas (por debajo de T1) y de muy altas temperaturas (por encima de T2), fue observada de manera independiente por Heidelberg *et al.* (2000) y por Kruhl (1987a, b), respectivamente.

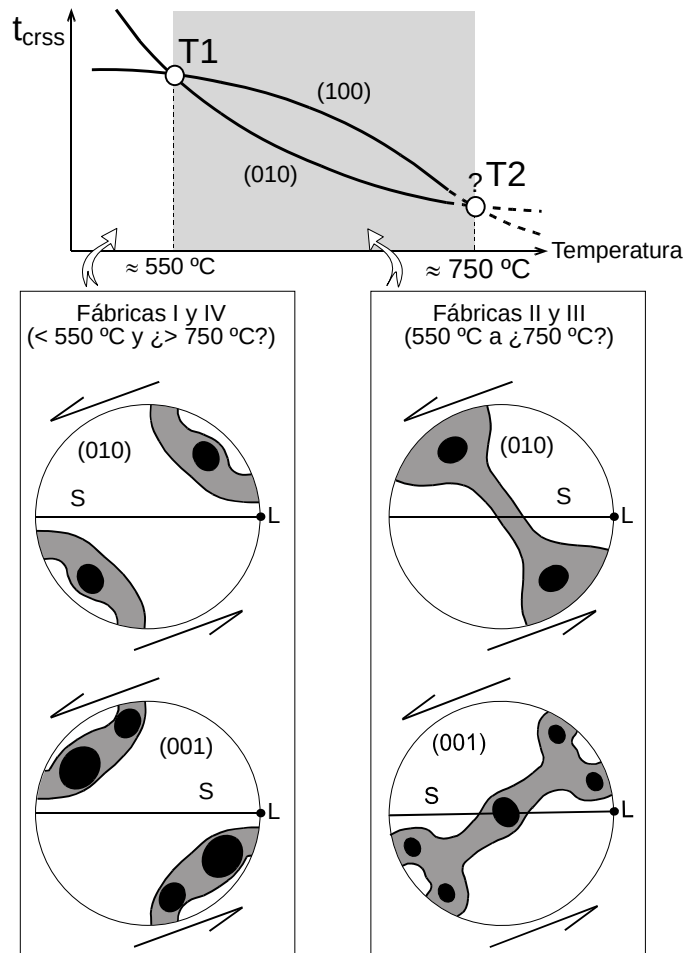


Fig.5.3. Transiciones de fábrica en plagioclasas (T1 y T2) y su influencia en la utilización de los diagramas de OCP como criterio cinemático. t_{crss} es el esfuerzo de cizalla crítico sobre cada sistema de deslizamiento.

Sin embargo, esta transición de alta temperatura no ha sido identificada en el corte de Veredas, a pesar de haberse medido las fábricas cristalográficas de rocas sometidas a temperaturas cercanas o superiores a los 800°C. En su lugar, en Veredas se encuentran fábricas debidas al deslizamiento según los planos (001) y (010). ¿Cómo se podría explicar estas diferencias en las fábricas de alta temperatura entre los cortes de Almonaster la Real y Veredas? Repasemos algunas posibles hipótesis al respecto:

1. Las fábricas de “alta temperatura” de Almonaster la Real fueron retocadas por un evento posterior de baja temperatura, en el límite entre las facies de los esquistos verdes y de las anfibolitas. Esto explicaría el parecido entre las fábricas I y IV. No obstante, como se ha indicado con anterioridad, la fábrica IV muestra la actuación de una mayor variedad de sistemas de deslizamiento. Más importante que esto es la observación de que no existen pruebas meso o microestructurales que apoyen un retrabajamiento de las fábricas de alta temperatura por zonas de cizalla de grado bajo a medio.
2. Diferencias en el tipo y características de la deformación. Los estudios teóricos y experimentales de desarrollo de OCP mediante el deslizamiento de dislocaciones muestran que puede haber diferencias significativas en la forma de la fábrica cristalográfica cuando cambia la geometría del elipsoide de deformación finita; o para historias de la deformación progresiva que contemplen diferentes grados de rotacionalidad. Sin embargo, no es previsible deducir sistemas de deslizamiento tan contrapuestos en rocas sometidas a las mismas condiciones de presión y temperatura y bajo diferentes historias de deformación. Por otra parte, el estudio estructural de la primera fase de deformación en las metabasitas de Acebuches, no hace pensar en diferencias significativas entre ambos sectores (Díaz Azpiroz, 2001).
3. López & Castro (2001) determinaron la curva del *solidus* anhidro de las anfibolitas de Acebuches. Dicha curva presenta una pendiente positiva entre 2 y 9 kbar. Para presiones comprendidas entre 4 y 6 kbar, el *solidus* se alcanza entre los 780°C y los 830°C, aproximadamente. Un rasgo característico y muy significativo de las anfibolitas de Acebuches en la zona de Veredas, es la presencia de abundantes venas leucocráticas tonalíticas hacia el techo de la unidad. De acuerdo con los resultados de López & Castro (*op.cit.*), dichas venas pueden interpretarse como el resultado de la fusión parcial de las anfibolitas. Este tipo de venas tonalíticas están ausentes, o son muy escasas, en la zona de Almonaster la Real. Como las temperaturas de metamorfismo son prácticamente idénticas en ambos cortes (Díaz Azpiroz, 2001) y la composición de las rocas es constante, debemos concluir que las anfibolitas de la zona de Veredas se vieron sometidas a menores presiones o fundieron en presencia de un fluido procedente de las rocas adyacentes y que no se liberó, sin embargo, en Almonaster la Real. La influencia de una fracción fundida en la reología de una roca es determinante. Según el trabajo experimental de Rushmer (1995), la presencia de un pequeño porcentaje de fundido en anfibolitas produce rápidamente el tránsito desde una deformación plástica a un régimen de flujo cataclástico asistido por los fundidos. Estos rellenan rápidamente las fracturas, dando lugar a venas, y la deformación se concentra casi totalmente en el desplazamiento de los bloques más rígidos a lo largo de estas fracturas lubricadas por los fundidos. Si ésta hubiese

sido la historia deformativa de Veredas, podría argumentarse que las OCP de las plagioclasas en las rocas de esta zona se adquirieron por debajo de los 780°C, antes de que comenzase la fusión parcial de estas rocas. La temperatura de fusión podría ser mucho menor si la fusión hubiese estado condicionada por la entrada de agua. Por el contrario, en Almonaster la Real la deformación plástica de las plagioclasas continuó para temperaturas superiores a los 800°C ante la ausencia de una fracción significativa de fundido tonalítico en la roca. La confirmación de esta hipótesis requeriría la realización de un estudio muy detallado de la distribución de las venas tonalíticas en una y otra zona, incluyendo una estimación de la deformación asociada a su presencia. Además, se sugiere la realización de un estudio de CSD (*crystal size distribution*) en el corte de Almonaster la Real similar al que Díaz Azpiroz & Fernández (2003) han realizado en el corte de Veredas. La comparación entre los diagramas CSD de las rocas situadas a techo de ambos cortes puede mostrar diferencias que sean correlacionables con las encontradas para las fábricas cristalográficas y dependientes del porcentaje de fusión parcial. En caso de que esta hipótesis llegase a encontrar respaldo, podría definirse sobre bases más sólidas la transición de fábrica de alta temperatura a la que hacíamos referencia con anterioridad.

Una de las referencias habituales en la bibliografía especializada en el estudio de la OCP de las plagioclasas, es la posibilidad de utilizar la asimetría de las fábricas de algunos elementos cristalográficos con respecto a los ejes de la deformación finita como criterio cinemático (a este respecto, véase por ejemplo Kruhl, 1987a y Ji *et al.* 1988). A la luz de los resultados de este trabajo, podemos hacer algunas aportaciones al respecto. Los estudios estructurales realizados hasta el momento en las metabasitas de Acebuches (véase una síntesis en Díaz Azpiroz, 2001) demuestran la actuación de un componente de cizalla simple de cinemática muy similar para las dos fases principales de deformación. En ambos casos, el bloque de techo se habría desplazado hacia el SO con respecto al bloque de muro. Este excelente conocimiento estructural de las metabasitas de Acebuches permite interpretar las características de la OCP de sus plagioclasas con una buena base. Las figuras 4.9 a 4.15 (corte de Almonaster la Real) y 4.32 a 4.36 (corte de Veredas) son un claro exponente de fábrica cristalográfica de simetría monoclinica en relación con los ejes principales de la deformación finita. Si bien algunos elementos pueden mostrar simetrías más altas, no olvidemos que “la simetría de cualquier sistema físico debe incluir aquellos elementos de simetría comunes a todos los factores independientes (...) que contribuyen al sistema (...)” (tercer principio de simetría de Curie, recogido por Paterson & Weiss, 1961). Por tanto, la fábrica global presenta una simetría más baja que la de algunas de las fábricas de elementos concretos. Y dicha simetría está reflejando la de la matriz del tensor de gradiente de velocidades que ha condicionado el desarrollo de la fábrica. Las OCP medidas en este trabajo constituyen la primera demostración incontrovertible de la asimetría de las fábricas cristalográficas de plagioclasea con respecto a los ejes de la deformación interna, desarrollada por efecto de una historia de deformación rotacional.

Ji *et al.* (1988) propusieron que la inclinación de los polos de (010) (principal plano de deslizamiento) con respecto a la foliación y a la lineación, podría utilizarse como criterio

cinemático. Para que esta afirmación sea correcta, es preciso que dicha inclinación sea siempre en el mismo sentido en relación con el giro impuesto por la vorticidad del flujo. Para todas aquellas fábricas en las que el sistema de deslizamiento aprovecha el plano (010), la inclinación antihoraria de las coronas de los polos de dichos planos coincide de manera consistente con el desplazamiento del bloque de techo hacia el SO (hacia la izquierda en nuestros diagramas, fábricas II y III de la fig.5.3). Este es también el criterio expresado por Ji *et al.* (1988) y otros autores. Sin embargo, para fábricas (010) como las de las muestra 4 y 16 de Almonaster la Real, la inclinación de los polos (010) es exactamente la contraria. La explicación de este hecho es sencilla. En estas últimas muestras, el plano cristalográfico que controla el movimiento de dislocaciones es esencialmente (001). En consecuencia, son los polos de estos planos (001) los que definen máximos y coronas inclinados en el sentido impuesto por la vorticidad, y no los de (010), como se puede comprobar en las figuras 4.10 y 4.15 (véase también la fig.5.3, fábricas I y IV).

Como conclusión, podríamos decir que este trabajo confirma el criterio establecido por Ji *et al.* (1988) para obtener el sentido de cizalla a partir de la asimetría de las fábricas de los planos (010) de las plagioclasas. Sin embargo, las transiciones de fábrica pueden afectar críticamente a este criterio cinemático. Estructuralmente, solo sería aplicable a aquellas muestras deformadas bajo condiciones metamórficas de las facies de las anfíbolitas, a temperaturas por encima de 550°C y, probablemente, por debajo de 750°C. En la transición entre las facies de las anfíbolitas y las de los esquistos verdes, por debajo de los 550°C, la fábrica de (010) ofrece un resultado equívoco y habría que utilizarla a la inversa de cómo fue descrita por Ji *et al.* (1988). Alternativamente, puede utilizarse la asimetría de (001) como criterio cinemático, que es otra de las aportaciones de este trabajo. Es preciso también utilizar con precaución la fábrica de (010) en rocas deformadas bajo las condiciones de las facies de las granulitas, ya que este trabajo muestra que es posible una transición de fábrica de alta temperatura. Toda esta discusión acerca del uso de la OCP como criterio cinemático se encuentra ilustrada y resumida en la fig.5.3.

Queremos finalizar esta sección con una reflexión acerca del estado actual de conocimientos en este campo y las nuevas expectativas que este trabajo puede abrir. Se han interpretado varias colecciones de posibles sistemas de deslizamiento (Tablas V.3 a V.10). Algunos de estos sistemas no están citados en la literatura. Queda, por tanto, un trabajo por realizar, que consiste en la verificación de la existencia de tales sistemas mediante la utilización del TEM, en estas u otras litologías. Disponer de una tabla completa de los sistemas de deslizamiento activos en plagioclasas bajo las distintas condiciones de temperatura y presión, es un elemento fundamental de cara a la realización de modelos numéricos de desarrollo de la OCP en plagioclasas. La realización de tales simulaciones supuso una verdadera revolución en la comprensión de las fábricas cristalográficas del cuarzo (Hobbs, 1985). No dudamos de que disponer de estos modelos será un paso crucial también para las plagioclasas. Mientras tanto, este problema seguirá en su estado embrionario actual.

Agazapada en la ingente cantidad de datos que se han producido en este trabajo, está la posibilidad de que plagioclasas de diferentes composiciones posean fábricas diferenciadas en la

misma muestra. La comprobación de este extremo supone una exhaustiva labor de separación y representación que no ha sido abordada en este trabajo. Queda para futuros desarrollos del mismo, junto con la posible influencia de los cristales rígidos de anfíbol, que ya se citaba en el apartado anterior.

Es de desear, finalmente, que las aportaciones de este trabajo puedan animar futuras líneas experimentales de investigación acerca del desarrollo de OCP en plagioclasas, ya que este campo de la experimentación, que es uno de los más resolutivos en el estudio de fábricas cristalográficas, se encuentra muy poco desarrollado en el caso de este mineral.

5.4.2. Aportación al estudio del maclado en plagioclasas metamórficas

En lo que se refiere a las características y evolución de los tipos de maclas dentro de las metabasitas de Acebuches, ha quedado establecido que las maclas de ley normal decrecen proporcionalmente de techo a muro de las metabasitas. Indudablemente, esta variación tiene más relación con la temperatura a la que se formaron estas maclas que con la intensidad de la deformación bajo la que se generaron (véase, por ejemplo, la fig.4.2). Olsen & Kohlstedt (1985) propusieron que la formación de maclas de la Albite y de la Periclina se produce en presencia de altos esfuerzos de cizalla. Por su parte, Suwa *et al.* (1974) concluyeron que la frecuencia de la aparición de la macla de la Periclina y de la Albite debería crecer con el grado metamórfico. El fundamento de este crecimiento sería el descenso en el esfuerzo de cizalla crítico con la temperatura. Esta variación es reconocible para la macla de la Albite en el corte de Almonaster la Real, cuya proporción crece sistemáticamente hacia techo de las metabasitas (con la excepción de la muestra 4). Mejores tendencias se observan incluso para las maclas de Baveno y Manebach (figs.4.2 y 4.28). Sin embargo, no se observa lo mismo para la Periclina. Este comportamiento errático de la Periclina confirma lo expuesto por Takahashi *et al.* (1997), que exponen que la frecuencia de este tipo de macla debe ser dependiente de factores distintos de la temperatura.

Aparte de estas observaciones, el desconocimiento que hoy en día se tiene acerca de las condiciones que controlan el desarrollo de uno u otro tipo de maclas en plagioclasas metamórficas, no nos permite dar una interpretación más profunda de las variaciones observadas.

5.4.3. Aportaciones al conocimiento regional de las metabasitas de Acebuches

Algunas de estas aportaciones han sido avanzadas en las secciones anteriores, como la referente a la posible variación lateral en la lámina de las metabasitas de las características de la primera fase de deformación. El trabajo de Díaz Azpiroz (2001) puso de manifiesto que la variación en la orientación de las fábricas (esencialmente las lineaciones) asociadas a la ZCS podría explicarse mediante la actuación de un régimen tectónico transpresivo durante la segunda fase de deformación. Cambios laterales en la intensidad del componente de cizalla simple a lo largo de la ZCS pueden explicar la modificación en la orientación de L_2 . En este sentido, el componente de cizalla simple debería ser más intenso en Almonaster la Real, donde las lineaciones se inclinan hacia el SE, que en Veredas, donde son horizontales o incluso se inclinan hacia el NO.

Desgraciadamente, la OCP de las muestras de la ZCS no muestra variaciones significativas al comparar ambos cortes. Alternativamente, puede argumentarse que no somos capaces de ver esas variaciones. Wenk *et al.* (1987) realizaron una simulación teórica del desarrollo de fábricas de ejes *c* de calcita para distintos tensores de gradientes de velocidades. Las simulaciones para historias de deformación coaxiales presentaban un máximo prominente de ejes *c* normal al plano de foliación. En las simulaciones de cizalla simple, dicho máximo se desviaba unos 35° del polo de la foliación. Y, para historias de la deformación intermedia, dicho ángulo variaba progresivamente entre los dos valores extremos. Si algo parecido llegase a suceder con las fábricas de (010) en plagioclasas, las zonas con un componente de cizalla simple más acusado (Almonaster la Real) deberían mostrar fábricas con mayores oblicuidades con respecto a la foliación. Pero, ¿cuántos grados de diferencia cabría esperar? Solo un modelo numérico podría responder a esta pregunta. Por otra parte, los errores en la determinación de las fábricas y la influencia de otras fases minerales como el anfíbol, podrían modificar sustancialmente estos resultados. Concluimos que el estudio de la OCP de plagioclasas no es resolutivo para apoyar o desmentir modelos detallados de variación de los componentes de flujo coaxial y no coaxial que se combinan en zonas transpresivas o transtensivas.

Por otro lado, resulta interesante comparar las fábricas cristalográficas medidas en el corte de Veredas con el análisis textural mediante el uso de los diagramas CSD realizado por Díaz Azpiroz & Fernández (2003). Los diagramas de variación de S_u y S con la distancia encuentran un paralelismo perfecto con los diagramas de variación de $\bar{\phi}$ (tamaño medio de los cristales) y R (relación media del eje largo entre el eje corto de los cristales) frente a la distancia, que presentaron Díaz Azpiroz & Fernández (*op.cit.*). En este sentido, el corte de Veredas, para el que también se dispone del correspondiente perfil de temperaturas metamórficas (Díaz Azpiroz, 2001), puede considerarse como uno de los mejor estudiados en metabasitas desde el punto de vista de la microtectónica. Falta únicamente un reconocimiento de las microestructuras bajo microscopía electrónica. La variación en los dos parámetros característicos de los diagramas CSD, es decir, la ordenada en el origen (n°) y la pendiente del segmento recto ($tg \beta$) a lo largo del corte de Veredas, muestra una buena correlación con la variación en las fábricas cristalográficas de las plagioclasas. El aumento en n° que se produce en las anfíbolitas bandeadas desde el techo hacia la parte media de las metabasitas, coincide con la disminución en la intensidad del grado de orientación preferente de la OCP de las plagioclasas. Mientras que la variación en n° refleja el gradiente de temperaturas, la fábrica cristalográfica está marcando el aumento de la deformación asociada a la primera fase desde el muro hacia el techo de las metabasitas. Por su parte, el aumento de $tg \beta$ que se observa a medida que aumenta la deformación en la ZCS se corresponde con el incremento paralelo en el grado de orientación preferente de la OCP. Ambas tendencias están correlacionadas con la intensidad de la deformación.

Finalmente, en lo que respecta a la composición de las plagioclasas medidas, tanto los valores medios como la variación observada a través de las metabasitas de Acebuches, coincide con la determinada mediante análisis químicos detallados (Díaz Azpiroz, 2001). No obstante, la tendencia hacia una composición más anortítica en la ZCS está probablemente condicionada por el tamaño de grano de los porfiroclastos utilizados para la medición con la platina universal. Como

ya se indicó anteriormente, los resultados presentados en este trabajo no deben tomarse como un estudio sistemático de la composición de las plagioclasas, sino que únicamente complementen y confirman lo observado por otros autores.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

- Se ha programado un nuevo método de estimación de la orientación cristalográfica completa de las plagioclasas a partir de datos procedentes de la platina universal. El programa *PLA-9* resuelve gran parte de los problemas y limitaciones que planteaban los métodos disponibles hasta el momento.
- La orientación cristalográfica preferente (OCP) de las plagioclasas no puede deducirse directamente a partir de la medida de los ejes de la indicatriz óptica, sino que debe ser reconstruida a partir de la medida de éstos y de otros elementos estructurales planares, tales como planos composicionales de macla. El inconveniente de utilizar únicamente los ejes de la indicatriz es que estas tres direcciones no son ilustrativas de la fábrica total de la roca y, además, son bastante insensibles a la asimetría de la fábrica, con lo que no se puede deducir a partir de ellas si la deformación ha tenido o no componente rotacional.
- Se observa que la OCP se hace más intensa con el incremento de la temperatura y de la deformación. Es decir, la intensidad de la orientación cristalográfica es mayor hacia el techo de la serie de las metabasitas como consecuencia del evento D_1 , y hacia muro como consecuencia del incremento de la intensidad de la deformación asociada a la zona de cizalla Suribérica (D_2).
- El efecto que tiene la actuación de la zona de cizalla Suribérica (ZCS) en las maclas que se observan en las plagioclasas, consiste en el aumento de la abundancia de las maclas de ley paralela o compleja hacia muro de las metabasitas, en detrimento de las de ley normal. Este aumento se atribuye al retrometamorfismo (M_2) asociado con el funcionamiento de dicha zona de cizalla y al incremento en la intensidad de la deformación. Como no se dispone de estimaciones termobarométricas en la ZCS, no es posible saber si la variación corresponde a diferencias en la temperatura de deformación o es consecuencia de los procesos de deformación ocurridos dentro de la ZCS.
- Los resultados del test de bondad de ajuste de las fábricas cristalográficas de plagioclase a la distribución de Watson presentan un problema sistemático en el ajuste al test de colatitud, debido a la complejidad de los patrones de fábrica estudiados en nuestras muestras. No es descartable tampoco un error en el funcionamiento de dicho test. Es por ello que no ofrece una descripción estadística del todo satisfactoria de las fábricas analizadas. No obstante, es de esperar que en el futuro se pueda disponer de descripciones estadísticas más rigurosas que permitan, por ejemplo, plantear un test de simetría de la fábrica con respecto a la foliación y a la lineación.
- A pesar de que no se han obtenido ajustes perfectos entre los diagramas de densidad de las OCP de las plagioclasas y sus proyecciones en el diagrama de Woodcock, sí se observan patrones de variación bastante sistemáticos de una muestra a otra y para los diferentes

elementos cristalográficos. La intensidad de las fábricas disminuye al descender la temperatura en la zona no afectada por la ZCS. En la parte central de la serie de las metabasitas las fábricas fluctúan en su forma pero no en su intensidad. Además, al aumentar la deformación asociada a la ZCS aumenta también fuertemente el parámetro S (distancia de la fábrica al origen del diagrama de Woodcock).

- La observación microestructural demuestra que las plagioclasas de las metabasitas de Acebuches han sufrido procesos de deformación intracristalina durante las fases D_1 y D_2 , incluyendo: deslizamiento de dislocaciones, recuperación y recristalización y maclado mecánico.
- El debilitamiento del grado de orientación preferente para las muestras deformadas a altas temperaturas (cercanas a los 700°C) puede atribuirse al efecto del deslizamiento de bordes de grano acomodado por difusión, el cual podría llegar a competir con el *creep* de dislocaciones. Esto podría explicar la asimetría encontrada en la variación del grado de orientación preferente de techo a muro de las metabasitas.
- Los patrones que muestran las fábricas cristalográficas de los diferentes elementos cristalográficos de las plagioclasas varían de manera compleja con la distancia a techo o muro estructural de la serie. Las fábricas de determinados elementos, como los polos de (001), siguen patrones coherentes de variación espacial, lo que refleja la importancia de dichos elementos como integrantes de los sistemas de deslizamiento responsables de la OCP en la plagioclasea.
- Se han identificado dos transiciones de fábrica en la OCP de las plagioclasas. La primera de ellas aparece al pasar el límite de las facies de los esquistos verdes a las de anfibolitas, alrededor de los 550°C , poco después del inicio del comportamiento plástico de la plagioclasea y la segunda tiene lugar hacia los 750°C , al pasar de las facies de las anfibolitas a las de las granulitas.
- Las fábricas de baja temperatura (fábricas tipo I, esquistos verdes de Almonaster la Real) se caracterizan por la frecuencia de deslizamiento a lo largo de los planos (001).
- Al aumentar la temperatura, los sistemas de deslizamiento basados en dichos planos pierden importancia y son sustituidos por sistemas de deslizamiento basados en los planos (010). Aunque el sistema de mayor temperatura es el más característico en plagioclasas, en este trabajo describimos por primera vez la transición de uno a otro. El paso de las anfibolitas bandeadas a las cizalladas supone un aumento en la deformación asociada a la ZCS, sin que se hayan detectado cambios bruscos en la temperatura de deformación. Es por ello que en ambos tipos de litologías, la OCP de las plagioclasas es muy similar. Las fábricas de mayor temperatura (fábricas II y III, anfibolitas cizalladas y bandeadas, respectivamente, de Almonaster la Real y Veredas) se mantienen sin cambios significativos entre los 550°C y, al menos los 750°C , lo cual abarca la mayor parte de las facies de las anfibolitas.

- La segunda transición de fábrica se identifica en Almonaster la Real, pero no en Veredas (a pesar de que se han medido en este último corte las fábricas cristalográficas de rocas sometidas a temperaturas cercanas a los 800°C). No se conoce con seguridad la razón de esta diferencia, que puede deberse a la presencia de pequeños porcentajes de fundidos en Veredas.
- Esta segunda transición daría paso nuevamente a la activación de los planos (001) en los sistemas de deslizamiento y tendría lugar por encima de los 750°C, coincidiendo con el paso de las facies de las anfibolitas a granulitas.
- La actividad de los planos (001) en condiciones de baja temperatura (por debajo de 550°C) y de muy altas temperaturas (por encima de 750°C) fue observada de manera independiente por Heidelberg et al. (2000) y por Kruhl (1987a, b), respectivamente. En este trabajo se ha identificado, por primera vez, su importancia en ambas condiciones y afectando al mismo tipo de rocas. Se ha podido precisar también que en ambos casos el sistema de deslizamiento según (001) se acompaña de sistemas de deslizamiento secundarios y terciarios muy diferentes.
- La fábrica global presenta una simetría más baja que las fábricas de elementos concretos. Dicha simetría refleja la de la matriz del tensor del gradiente de velocidades que ha condicionado el desarrollo de la fábrica. Las OCP medidas en este trabajo constituyen una demostración incontrovertible de la asimetría de las fábricas cristalográficas de plagioclasa respecto a los ejes de la deformación interna, desarrollada por efecto de una historia de deformación rotacional.
- La inclinación antihoraria de las coronas de los polos de los planos (010) con respecto a los ejes de la deformación finita coincide de manera consistente, para la mayor parte de las muestras, con el desplazamiento del bloque de techo de las metabasitas hacia el O ó SO, tanto para la fase D₁ como para la D₂ (ZCS). La actuación de un componente de cizalla simple explica la oblicuidad de todas las fábricas respecto a los ejes de la deformación finita. Este es también el criterio expresado por Ji et al. (1988) y otros autores.
- Las fábricas de los planos (010) de las de las muestras 2, 4 y 16 de Almonaster la Real muestran asimetrías contrarias a las esperables. Esto se debe a que en estas muestras el plano cristalográfico que controla el movimiento de dislocaciones es esencialmente (001).
- Las transiciones de fábrica afectan críticamente al criterio cinemático propuesto por Ji et al. (1988). Desde el punto de vista estructural, dicho criterio sólo sería aplicable para aquellas muestras deformadas bajo condiciones metamórficas de las facies de las anfibolitas, a temperaturas superiores a los 550°C y, probablemente, por debajo de los 750°C. En este trabajo se propone utilizar en su lugar la asimetría de las fábricas de los polos de los planos (001) cuando las temperaturas de deformación son inferiores a 550°C y superiores a 750°C.
- Las fábricas de anfíbol presentan un carácter ortorrómbico que contrasta con las asimetrías descritas en las OCP de las plagioclasas. Esto es debido a que, desde un punto de vista microestructural, las plagioclasas constituyen la fase menos resistente de las rocas y acomodan,

por ello, la mayor parte de la deformación plástica, mientras que los anfíboles debieron adquirir su OCP mediante la combinación de los mecanismos de rotación rígida en una matriz más blanda y crecimiento condicionado por el campo de esfuerzos durante el metamorfismo. La posible influencia que la presencia de cristales de anfíbol ha podido tener en el desarrollo de las fábricas cristalográficas de plagioclasea en las metabasitas de Acebuches está por evaluar, y sería una posible línea de trabajo futura. Las asimetrías de la OCP de las plagioclasas indican que este mineral es más sensible al componente rotacional de la deformación, como es propio de un mecanismo de deformación basado en el movimiento de dislocaciones. La presencia de anfíbol puede haber aumentado o disminuido localmente la intensidad de las OCP de las plagioclasas, aunque no debe haber influido sustancialmente en su forma ni en su intensidad.

- Este trabajo deja abiertas varias líneas de investigación futura en el estudio de la OCP de las plagioclasas, entre las cuales se pueden citar: (1) elaboración de técnicas de análisis estadístico más rigurosas, como un test de simetría de las fábricas con respecto a la foliación y a la lineación, (2) resolver los problemas de ajuste a los test de colatitud de la distribución de Watson y al de la uniformidad de Ajne, (3) superar los problemas de un ajuste no del todo satisfactorio entre los diagramas de densidad de los elementos cristalográficos de la plagioclasea y sus proyecciones en el diagrama de Woodcock, (4) verificación, mediante el TEM, de la existencia de los sistemas de deslizamiento que en este trabajo se han propuesto, y disponer de una tabla completa de los sistemas de deslizamiento activos en plagioclasas bajo distintas condiciones de temperatura y presión, (5) modelización numérica del desarrollo de la OCP en plagioclasas, como en el caso del cuarzo, (6) evaluar la posibilidad de que plagioclasas de diferentes composiciones posean fábricas cristalográficas diferenciadas en una misma muestra, y qué relación puede existir entre la composición de la plagioclasea y el tipo de macla que desarrolla, (7) estudiar la influencia de la presencia de otras fases minerales, como el anfíbol, en el desarrollo de las OCP en plagioclasas, (8) conocer las condiciones que controlan el desarrollo de uno u otro tipo de maclas en plagioclasas metamórficas.

Capítulo 7

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERENCIAS

- ADLHART, W., FREY, F. & JAGODZINSKY, H. (1980b). X-ray and neutron investigations of the $P \bar{1}$ - $I \bar{1}$ transition in pure anorthite with low albite content. *Acta Crystallographica*, **A36**, 461-470.
- AGUE, D.M., WENK, H.R. & WENK, H. (1990). Deformation Microstructures and Lattice Orientations of Plagioclase in Garbos from Central Australia. *Geophysical Monograph*, **56**, 173-186
- ALBICH, W.H. (1841). Jahresbericht über die Fortschritte der physischen wissenschaften. *J.J. Berzelius. Turbingen*, **XXI**, 167. See Chester (1886).
- ANGEL, R.J., REDFERN, S.A.T. & ROSS, N.L. (1989). Spontaneous strain below the $I \bar{1}$ - $P \bar{1}$ transition in anorthite at pressure. *Physics and Chemistry of Minerals*, **16**, 539-544
- AVÉ LALLEMANT, H.G. & CARTER, N.L. (1970). Syntectonic recrystallization of olivine and modes of flow in the upper mantle. *Bulletin of the Geological Society of America*, **81**, 2203-2220.
- BARD, J.P. (1969). Le métamorphisme régional progressif de Sierra de Aracena en Andalousie occidentale (Espagne). *Thèse d'Etat, Université de Montpellier*, 397 pp.
- BARD, J.P. (1970). Composition of Hornblendes formed during the Hercynian progressive metamorphism of the Aracena Metamorphic Belt (SW Spain). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **28**, 117-134.
- BARD, J.P. (1971). Sur l'alternance des zones métamorphiques dans le segment hercynien sudibérique ; comparaison de la variabilité des caractères géotectoniques de ces zones avec les orogènes «orthotectoniques». *Bulletin of Geology and Mineralogy*, **82**, 324-345.
- BARD, J.P. (1972). Les complexes intrusifs acide-basique calcoalcalines de la Chaîne Varisque Sud-Iberique et leurs liaisons avec les grands cisaillements transpressifs de Basajoz-Cordue et de la Zone Sud-Iberique: Proposition de modeles geodynamiques impliquant des processus de subduction continentale. *Compte Rendu Académie Sciences, Paris*, **314**, 711-716.
- BARD, J.P. & MOINE, B. (1979). Acebuches amphibolites in the Aracena hercynian metamorphic belt (southwest Spain): Geochemical variations and basaltic affinities. *Lithos*, **12**, 271-282.
- BARD, J.P., CAPDEVILA, R., MATTE, P. & RIBEIRO, A. (1973). Geotectonics model for the Iberian Variscan Orogen. *Nature*, **241**, 50-52.
- BARKER, A.J. (1990). Introduction to metamorphic textures and microstructures. Blackie Academic & Profesional, Glasgow. 170 pp.
- BARRUOL, G. (1993). Pétrophysique de la croûte inférieure. *Ph. D. Thesis, Université de Montpellier II, France*.
- BEGIN, N.J. (1992). Contrasting mineral isograd sequences in metabasites of the Cape Smith Belt, northern Québec, Canada: three new bathograds for mafic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, **10**, 685-704.
- BENN, K. & ALLARD, B. (1989). Preferred mineral orientations related to magmatic flow in ophiolite layered gabbros. *Journal of Petrology*, **30**, 925-946.

- BENN, K. & MAINPRICE, D. (1989). An interactive program for determination of plagioclase crystal axis orientation from U-stage measurements: an aid for petrofabric study. *Computer & Geoscience*, **15**, 1127-1142.
- BERAN, R.J. (1968). Testing for uniformity on a compact homogeneous space. *Journal of Applied Prob.*, **5**, 177-195.
- BIBGHAM, C. (1964). Distributions on the sphere and on the projective plane. *Ph. D. Thesis, University of Yale*.
- BLACIC, J.D. & CHRISTIE, J.M. (1984). Plasticity and hidrolytic weakening of quartz single crystals. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 4223-4239.
- BLOSS, F.D. (1971). Crystallography and Crystal Chemistry. Holt, Rinehart & Winston. New York, 543 pp.
- BORG, I.Y. & HANDIN, J. (1966). Experimental deformation of cristalline rocks. *Tectonophysics* **3**, 249-358.
- BORG, I.Y. & HEARD, H.C. (1967). Further studies on experimentally deformed plagioclase. In: Rock deformation and deformation mechanisms in torsion tests. Herard, H.C. (Ed.), Final report: Project Vela Uniform. *Advanced Research Projects Agency*.
- BORG, I.Y. & HEARD, H.C. (1969). Mechanical twinning and slip in experimentally deformed plagioclase. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **23**, 128-135.
- BORG, I.Y. & HEARD, H.C. (1970). Experimental deformation of plagioclase. In: Paulitsch, P. (Ed), Experimental and natural rock deformation. Springer, Berlin – Heidelberg - New York. 375-403.
- BORGES, F.S. & WHITE, S.H. (1980). Microstructural and chemical studies of sheared anorthosites, Roneval, Soth Harris. *Journal of Structural Geology*, **2**, 273-280.
- BOUCHEZ, J.L. & PÉCHER, A. (1981). The Himalayan Main Central Thrust pile ant its quartz-rich tectonites in Central Nepal. *Tectonophysics*, **78**, 23-50.
- BOUCHEZ, J.L., LISTER, G.S & NICOLAS, A. (1983). Fabric asymmetry and shear sense in movement zones. *Geologische Rundschau*, **72**, 401-419.
- BREITHAUPT, A. (1847). Vollständiges Handbuch der Mineralogies. 3 vols. Dresden and Leipzig.
- BREITHAUPT, A. (1826). Poggendorff's. *Ann. Phys. Chem.*, **VIII**, 238. See Chester (1886).
- BRINKMANN, D. & STAEHLI, J.L. (1968a). ^{27}Al -Kernresonanzmessungen von Anorthit bei höden Temperaturen. *Hel. Phys. Acta*, **41**, 424.
- BRINKMANN, D. & STAEHLI, J.L. (1968b). Magnetische Kernresonanz von ^{27}Al im Anorthit. *Hel. Phys. Acta*, **41**, 474-481.
- BRODIE, H.K. (1981). Variations in amphibole and plagioclase composition with deformation. *Tectonophysics*, **78**, 385-402.
- BRODIE, K.H. & RUTTER, E. (1985). On the relationship between deformation and metamorphism, with special reference to the behaviour of basic rocks. In: Metamorphic reactions: kinetics, textures and deformation. Thompson, B.A. & Rubie, D.C. (Eds). Springer-Verlag, Nueva York, 138-179.

- BROWN, W.L. (1989a). Glide twinning and pseudotwinning in peristerite: twin morphology and propagation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **102**, 306-312.
- BROWN, W.L. (1989b). Glide twinning and pseudo twinning in peristerite: Si, Al diffusional stabilization and implications for the peristerite solvus. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **102**, 313-330.
- BROWN, W.L. & MACAUDIÈRE, J. (1986). Mechanical twinning of plagioclase in a deformed meta-anorthosite – the production of M-twinning. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **92**, 44-56.
- BROWN, W.L., HOFFMAN, W. & LAVES, F. (1963). Über kontinuierliche und reversible Transformationen des Anorthits. (CaAl₂Si₂O₈) zwischen 25 und 350°C. *Naturwissenschaften*, **50**, 221.
- BROWN, W.L., MACAUDIÈRE, D., OHNENSTETTER, M. (1980). Ductile shear zones in a meta-anorthosite from Harris, Scotland: textural and compositional changes in plagioclase. *Journal of Structural Geology*, **2** (1/2), 281-287.
- BROWN, W.L., OPENSAHAW, R.E., MCMILLAN, P.F. & HENDERSON, C.M.B. (1984). A review of the expansion behaviour of alkali feldspars: Coupled variations in cell parameters and possible phase transitions. *American Mineralogist*, **69**, 1058-1071.
- BUERGUER, M.J. (1945). The genesis of twin crystals. *American Mineralogist*, **30**, 469-482.
- BURG, J.P., WILSON, C.J.L. & MITCHELL, J.C. (1986). Dynamic recrystallization and fabric development during the simple shear deformation of ice. *Journal of Structural Geology*, **8**, 857-870.
- BURRI, C. (1962). A survey of feldspar twinning. *Norrs Geologisk Tidskrift*, **42**, 193-206.
- BURRI, C. (1964). Versuch einer einfachen Systematik der wichtigsten Plagioklas-Zwillingsgesetze. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **44**, 421-427.
- BURRI, C., PARKER, R.L. & WENK, E. (1967). Die optische Orientierung der Plagioklase. Birkhäuser, Basel, 334 pp.
- CAHN, R.W. (1954). Twinned crystals. *Adv. in Physics*, **3**, 363-445.
- CARPENTER, M.A. & McCONNELL, J.D. (1992). Experimental delineation of the $C\bar{1} \leftrightarrow 1\bar{1}$ transformation in intermediate plagioclase feldspars. *American Mineralogist*, **69**, vol.1-2, 112-121.
- CASTRO, A., FERNÁNDEZ, C., DE LA ROSA, J., MORENO-VENTAS, I., EL-HIMIDI, H., EL-BIAD, M., BERGAMIN, J.F. & SÁNCHEZ, N. (1996a). Triple-junction migration during Paleozoic Plate convergence: the Aracena metamorphic belt, Hercynian massif, Spain. *Geologische Rundschau*, **85**, 108-185.
- CASTRO, A., FERNÁNDEZ, C., DE LA ROSA, J., MORENO-VENTAS, I., ROGERS, G. (1996b). Significance of MORB-derived amphibolites from the Aracena Metamorphic Belt, Southwest Spain. *Journal of Petrology*, **37**, 235-260.
- CASTRO, A., FERNÁNDEZ, C., EL-HIMIDI, H., EL-BIAD, M., DÍAZ, M., DE LA ROSA, J. & STUART, F. (1999). Age constraints to the relationship between magmatism, metamorphism and tectonism in the Aracena metamorphic belt, southern Spain. *International Journal of Earth Science*, **88**, 26-37.

- CHESTER, A.H. (1886). A dictionary of the names of minerals including their history and etymology. Wiley, J. & Sons, New York, 320 pp.
- CRAMPTON, C.B. (1957). Regional study of epidote, mica, and albite fabrics of the Moines. *Geological Magazine*, **94**, 89-102.
- CRESPO-BLANC, A. (1991). Evolución geotectónica del contacto entre la zona de Ossa-Morena y la zona Surportuguesa en las Sierras de Aracena y Aroche (Macizo Ibérico Meridional): Un contacto mayor en la Cadena Hercínica Europea. *Tesis Doctoral, Universidad de Granada*, 327 pp.
- CRESPO-BLANC, A. & OROZCO, M. (1988). The Southern Iberian Shear Zone: A major boundary in the Hercynian folded belt. *Tectonophysics*, **148**, 221-227.
- CZANK, M. & SCHULZ, H. (1971). Thermal expansion of anorthite. *Naturwissenschaften*, **58**, 94.
- CZANK, M., LAVES, F. & SCHULZ, H. (1970). On the domains of anorthite. *Naturwissenschaften*, **57**, 128.
- CRAWFORD, M.L. (1966). Composition of plagioclase and associated minerals in some schists from Vermont, U.S.A., and South Westland, New Zealand, with inferences about the peristerite solvus. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **13**, 269-294.
- DALLMEYER, R.D., FONSECA, P.E., QUESADA, C., & RIBEIRO, A. (1993). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral age constraints for the tectonothermal evolution of a Variscan suture in Southwest Iberia. *Tectonophysics*, **222**, 177-194.
- DALLMEYER, R.D., MATÍNEZ CATALÁN, J.R., ARENAS, R., GIL IBARBUCHI, J.I., GUTIERREZ ALONSO, G., FARIAS, P., BASTIDA, F. & ALLER, J. (1997). Diachronous Variscan tectonothermal activity in the NW Iberian massif: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of regional fabrics. *Tectonophysics*, **277**, 307-337.
- DEBAT, P., SOULA, J.C., KUBIN, L. & VIDAL, J.L. (1978). Optical studies of natural deformation microstructures in feldspar (gneisses and pegmatites from Occitania, southern France). *Lithos*, **11**, 133-145.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. (1963). Rock-Forming Minerals, vol. 4, 1-178. Longmans, Green & Co., London.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. (2001). Rock-forming minerals. Framework silicates: Feldspars, volume 4A (second edition). Publisher by the Geological Society of London.
- DELL'ANGELO, L.N. & TULLIS, J. (1989). Fabric development in experimentally sheared quartzite. *Tectonophysics*, **169**, 1-21.
- DÍAZ AZPIROZ, M. (2001). Evolución tectono-metamórfica del dominio de alto grado de la banda metamórfica de Aracena. *Tesis Doctoral, Universidad de Huelva*, 556 pp.
- DÍAZ AZPIROZ, M. & FERNÁNDEZ, C. (2003). Characterization of tectono-metamorphic events using crystal-size distribution diagrams. A case study from Acebuches metabasites (SW Spain). *Journal of Structural Geology*, **25**, 935-947.
- DÍAZ, M., FERNÁNDEZ, C. & CASTRO, A. (1997). Structural and metamorphic characteristics of the Acebuches amphibolites (SW Iberian massif). A model for the preservation of the upper oceanic crust in sutures resulting from triple junction evolution. *EUG Annual Meeting, Strasbourg, France. EUG. Abstracts supplement. Terra Nova*, **9**, 384.

- DÍAZ AZPIROZ, M., CASTRO, A., FERNÁNDEZ, C., LÓPEZ, S., FERNÁNDEZ CALIANI, J.C., MORENO-VENTAS, I. (2004). The contact between the Ossa-Morena and the South Portuguese zones. Characteristics and significance of the Aracena metamorphic belt, in its central sector between Aroche and Aracena (Huelva). *Journal of Iberian Geology*, **30**, 23-51.
- DIMROTH, E. (1962). Untersuchungen zum Mechanismus von Blastesis und Syntexis in pilliten und Hornfelsen des sudwestlinchen Fichtelgebirges. I. Die statistische Auswertung einfacher Gurteldiagramme. *Tschermaks Mineralogische Petrographische Mitteilungen*, **8**, 248-274.
- DONNAY, J.D.H. (1943). Plagioclase twinning. *Bulletin of the Geological Society of America*, **54**, 1645.
- DORNBUSCH, H.J., WEBER, K. & SKROTZKI, W. (1994). Development of microstructure and texture in high-temperature mylonites from the Ivrea Zone. In: Bunge, H.L., Siegesmund, S., Skrotzki, W. & Weber, K. (Eds.), *Textures of Geological Materials*. Deutscher Gesellschaft für Materialkunde, Oberusel, 187-201.
- DOWTY, E. (1980). Atomic structure of Carlsbad and Carlsbad-albite twins in feldspar. *Zeitschrift für Kristallographie*, **152**, 201-206.
- DUPARC, L. & REINHARD, M. (1923). Les methods de Federof et leur application a la determination des plagioclases. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **3**, 1-74.
- DUPARC, L. & REINHARD, M. (1924). La determination des plagioclases dans les coupes minces. *Societe de Physique et d'Histoire Naturelle. Geneva*, **40**, fasc.1.
- DUPUY, C., DOSTAL, J. & BARD, J.P. (1979). Trace element geochemistry of paleozoic amphibolites from SW Spain. *Tschermaks Mineralogische Petrographische Mitteilungen*, **26**, 87-93.
- EDEN, C. (1991). Tectonostratigraphic analysis of the northern extent of the oceanic exotic terrane, northwestern Huelva province, Spain. *Ph. D Thesis, University of Southampton*, 213 pp.
- EDINGTON, J.W., METON, K.N. & CULTER, C.P. (1976). Superplasticity. *Progr. Material Science*, **21**, 61-170.
- EGYDIO-SILVA, M., MAINPRICE, D. (1999). Determination of stress directions from plagioclase fabrics in high grade deformed rocks (Além Paraíba shear zone, Ribera fold belt, southeastern Brazil). *Journal of Structural Geology*, **21**, 1751-1771.
- EL-BIAD, H. (2000). Generación de granitoides en ambientes geológicamente contrastados del Macizo Ibérico. Limitaciones experimentales entre 2 y 15 Kbar. *Tesis Doctoral, Universidad de Huelva*, 310 pp.
- EL-BIAD, M., EL-HIMIDI, H., DÍAS, M., CASTRO, A. & FERNÁNDEZ, C. (1997). Dating high temperature events in the continental domain of the Aracena Metamorphic Belt (SW Iberian Massif). An evidence for a local metamorphic peak to ridge subduction. *EUG meeting, Strasbourg, France. Abstracts supplement. Terra Nova*, **9**, 493.
- EL-HIMIDI, H. (2000). Petrología y geoquímica de los sistemas andesíticos ricos en Mg: estudio petrológico y experimental de las noritas de la Banda Metamórfica de Aracena, SO de España. *Tesis Doctoral, Universidad de Huelva*, 239 pp.
- EMMONS, R.C & GATES, R.M. (1943). Plagioclase twinning. *Geological Society of America. Bulletin*, **54**, 287-303

- ETCHECOPAR, A. (1977). A plane kinematic model of progressive deformation in a polycrystalline aggregate. *Tectonophysics*, **39**, 121-139.
- ETCHECOPAR, A. & VASSEUR, G. (1987). A 3-D kinematic model of progressive deformation in a polycrystalline aggregates: comparisons with experimental and natural examples. *Journal of Structural Geology*, **9**, 667-677.
- FERGUSON, R.B., TRAILL, R.J. & TAYLOR, W.H. (1958). The crystal structure of low-temperature and high-temperature albites. *Acta Crystallographica*, **11**, 331-348.
- FISHER, N.I., LEWIS, T. & EMBLETON, B.J.J. (1987, 1988). Statistical analysis of spherical data. Cambridge University Press, 329 pp.
- FISHER, SIR R.A. (1953). Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **217**, 195-305.
- FITZ GERALD, J.D. & STÜNITZ, H. (1993). Deformation of granitoids of a low metamorphic grade: reaction and grain size reduction. *Tectonophysics*, **221**, 269-297.
- FOIT, F.F. & PEACOR, D.R. (1967). High temperature diffraction data on selected reflections of an andesine and anorthite. *Zeitschrift für Kristallographie*, **125**, 147-156.
- FONSECA, P. & RIBEIRO, A. (1993). Tectonics of the Beja-Acebuches ophiolite: a major suture in the Iberian Variscan Foldbelt. *Geologische Rundschau*, **82**, 440-447.
- FRIEDEL, G. (1926). Lecons de Crystallographie. Berger Levrault, Paris.
- FRIEDEL, G. (1964). Lecons de cristallographie professe'es a la Faculte des Sciences de Strasbourg. Paris (Berger-Levrault), 620 pp. Reprinted (1896) by Blanchard, A., Paris.
- GANDAIS, M. & WILLAIME, C. (1984). Mechanical properties of feldspars. In: Brown, W.L. (Ed.), Feldspars and Feldspathoids-Structures, Properties and Occurrences, 207-246. Reidel, D. Publishing Co., New York, 1984.
- GAPPAIS, D. (1989). Shear structures within deformed granites: mechanical and thermal indications. *Geology*, **17**, 1144-1147.
- GATES, A.E. & GLOVER, L. (1989). Alleghanian tectono-thermal evolution of the distal transcurrent hylas zone, Virginia Piedmont, USA. *Journal of Structural Geology*, **11**, 407-419.
- GAY, P. (1956). A note on albita twinning in plagioclase feldspars. *Mineralogical Magazine*, **31**, 301-305.
- GAY, P. & BROWN M.G. (1956). The structures of plagioclase feldspar – the heat treatment of intermediate plagioclase. *Mineralogical Magazine*, **31**, 306-313.
- GIESE, U., VON HOEGEN, R., HOYMANN, K.H., KRAMM, U. & WALTER, R. (1994). The Paleozoic evolution of the Ossa-Morena zone and its boundary, to the South Portuguese zone in SW Spain: Geological constraints and geodynamic interpretation of a suture in the Iberian Variscan orogen. *N. Jb. Geol. Palaont, Abh.*, **192**, 383-412.
- GLEASON, G.C. & TULLIS, J. (1995). A flow law for dislocation creep of quartz aggregates determined with the molten salt cell. *Tectonophysics*, **247**, 1-23.
- GOODE, A.D.T. (1978). High temperature, high strain rate deformation in the lower crustal Kalka Intrusion, central Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **66**, 137-148.

- GORAI, M. (1951). Petrological studies on plagioclase twins. *American Mineralogist*, **36**, 884-901.
- GOWER, R.J.W. & SIMPSON, C. (1992). Phase boundary mobility in naturally deformed, high-grade quartzofeldspathic rocks: evidence for diffusional creep. *Journal of Structural Geology*, **14**, 301-238.
- GRAPES, R.H. & GRAHAM, C.M. (1978). The actinolite-hornblende series in metabasites and the so-called miscibility gap: A review. *Lithos*, **11**, 85-97.
- GREEN, H.W., GRIGGS, D.T & CHRISTIE, J.M. (1970). Syntectonic and annealing recrystallization of fine-grained quartz aggregates. In: Paulitsch, P. (Ed.), *Experimental and natural rock deformation*. Springer, Berlin – Heidelberg - New York, 272-335.
- GRUNDY, H.D. & BROWN, W.L. (1974). A high-temperature study of low and high plagioclase feldspars. In: MacKenzie, W.S. & Zussman, J. (Eds.), *The Feldspars*. Manchester University Press, 162-173.
- GRUNDY, H.D., BROWN, W.L. & MACKENZIE, W.S. (1967). On the existence of monoclinic $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ at elevated temperature. *Mineralogical Magazine*, **36**, 83-88.
- HAMMONDS, K.D., DOVE, M.T., GIDDY, A.P., HEINE, V. & WINKLER, B. (1996). Rigid-unit phonon modes and structural phase transitions in framework silicates. *American Mineralogist*, **81**, 1057-1079.
- HANMER, S. (1982). Microstructure and geochemistry of plagioclase and microcline in naturally deformed granite. *Journal of Structural Geology*, **4**, 197-213.
- HASTINGS, C. (1955). *Approximations for Digital Computer*. Princeton University Press.
- HEIDELBACH, F., POST, A., TULLIS, J. (2000). Crystallographic preferred orientation in albite samples deformed experimentally by dislocation and solution precipitation creep. *Journal of Structural Geology*, **22**, 1649-1661.
- HIRTH, G. & TULLIS, J. (1992). Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*, **14**, 145-159.
- HIRTH, G., TEYSSIER, C. & DUNLAP, W.L. (2001). An evaluation of quartzite flow laws based on comparisons between experimentally and naturally deformed rocks. *International Journal of Earth Science (Geologische Rundschau)*, **90**, 77-87.
- HOBBS, B.E. (1985). The geological significance of microfabric. In: Wenk, H.R. (Ed.), *Preferred orientation in deformed metals and rocks*. Academic Press, New York.
- HOLLAND, T.J.B. & BLUNDY, J.D. (1994). Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **116**, 433-447.
- HUNASHASHI, M., HOE, S.G. (1973). Plagioclase Fabrics in Some Metabasic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **41**, 119-129.
- JAEGER, J.C. (1969). *Elasticity, fracture and flow with engineering and geological applications*. Methuen & Co., 268 pp.
- JENSEN, L. & STARKEY, J. (1985). Plagioclase microfabrics in a ductile shear zone from the Jotun Nappe, Norway. *Journal of Structural Geology*, **7**, 527-539.

- JESELL, M.W. (1987). Grain-boundary migration microstructures in a naturally deformed quartzite. *Journal of Structural Geology*, **9**, 1007-1014.
- JESELL, M.W. (1988). Simulation of fabric development in recrystallizing aggregates: 1. Description of the model. *Journal of Structural Geology*, **10**, 779-793.
- JI, S., MAINPRICE, D. (1988). Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, **147**, 145-163.
- JI, S. & MAINPRICE, D. (1990). Recrystallization and fabric development in plagioclase. *Journal of Geology*, **98**, 65-79.
- JI, S. & MARTIGNOLE, J. (1994). Ductility of garnet as an indicator of extremely high temperature deformation. *Journal of Structural Geology*, **16**, 985-996.
- JI, S., MAINPRICE, D. & BOUDIER, F. (1988). Sense of shear in high-temperature movement zones from the fabric asymmetric of plagioclase feldspars. *Journal of Structural Geology*, **10** (1), 73-81.
- JI, S., SALISBURY, M.H. & HANMERS, S. (1993). Petrofabric, P-wave anisotropy and seismic reflectivity of high-grade tectonites. *Tectonophysics*, **222**, 195-226.
- JI, S., ZHAO, X. & ZHAO, P. (1994). On the measurement of plagioclase lattice preferred orientations. *Journal of Structural Geology*, **16** (12), 1711-1718.
- JIANG, Z., PRIOR, D.J. & WHEELER, J. (2000). Albite crystallographic preferred orientation and grain misorientation distribution in a low-grade mylonite: implications for granular flow. *Journal of Structural Geology*, **22**, 1663-1674.
- JULIVERT, M., FONTBOTÉ, J.M., RIBEIRO, A. & CONDE, L.E. (1972). Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares. E. 1:1.000.000. IGME, Madrid.
- KAMB, W.B. (1959). Theory of preferred orientation development by cristallization under stress. *Journal of Geology*, **67**, 153-170.
- KRONENBERG, A.K. & SHELTON, G.J. (1980). Deformates microstructures in experimentally deformed Maryland diabase. *Journal of Structural Geology*, **2**, 341-353.
- KROLL, H., BAMBAUER, H.U. & SCHIRMER, U. (1980). The high albite-monalcite and analbite-monalcite transitions. *American Mineralogist*, **65**, vol.11-12, 1192-1211.
- KRUHL, J.H. (1987a). Preferred lattice orientations of plagioclase from amphibolite and greenschist facies rocks near the Insubric Line (Western Alps). *Tectonophysics*, **135**, 233-242.
- KRUHL, J.H. (1987b). Zur Deformation und Gitterregelung des Plagioklases. *Jahrbuch der Geologische Bundesanstalt*, **130**, 205-243.
- KRUHL, J.H. (1989). Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy – a discussion on measuring and interpreting plagioclase preferred orientation. *Tectonophysics*, **166**, 345-349.
- KRUHL, L.H. (1993). The *P-t-d* development at the basement-cover boundary in the north-eastern Tauern Window (Eastern Alps): Alpine continental collision. *Journal of Metamorphic Geology*, **11**, 31-47.

- KRUSE, R. (1998). Recrystallization and deformation mechanisms in mafic high temperature mylonites from Jotun nappe (S. Norway) and the Ivrea zone (N. Italy). *Ph. D. Thesis, Universität Basel*.
- KRUSE, R., STÜNIZ, H. (1999). Deformation mechanisms and phase distribution in mafic high-temperature mylonites from the Jotun Nappe, southern Norway. *Tectonophysics*, **303**, 223-249.
- KRUSE, R., STÜNITZ, H. & KUNZE, K. (2001). Dynamic recrystallization processes in plagioclase porphyroclast. *Journal of Structural Geology*, **23**, 1781-1802.
- LAFRANCE, B., JOHN, B.E. & SCOATES, J.S. (1996). Syn-emplacement recrystallization and deformation microstructures in a Poe Mountain anorthosite, Wyoming. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **122**, 431-440.
- LAIRD, J. (1980). Phase equilibria in mafic schists from Vermont. *Journal of Petrology*, **21**, 1-37.
- LAIRD, J. & ALBEE, A.L. (1981). Pressure, temperature and time indicator in mafic schist: their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont. *American Journal of Science*, **281**, 127-175.
- LAPWORTH, T., WHEELER, J. & PRIOR, D.J. (2002). The deformation of plagioclase investigated using electron backscatter diffraction crystallographic preferred orientation data. *Journal of Structural Geology*, **24**, 387-399.
- LAVES, F. (1952a). Phase relations of alkali feldspars. *Journal of Geology*, **60**, 436-450.
- LAVES, F. (1952b). Mechanische Zwillingsbildung in Felspaten in Abhängigkeit von Ordnung-nordnung der Si/Al Verteilung innerhalb des $(\text{Si,Al})_4 \text{O}_8$ Gerüstes. *Naturwissenschaften*, **39**, 546-547.
- LAVES, F. (1954). The coexistence of two plagioclases in the oligoclase compositional range. *J. Geol.*, **62**, 409-411.
- LAVES, F. (1965). Mechanical twinning in acid plagioclases. *American Mineralogist*, **50**, 511-514.
- LAVES, F. (1966). What is a twin and what is a "twin"? *Acta Met.*, **14**, 58.
- LAVES, F. (1974). Domain and deformation textures in plagioclases and their investigation by photo-emission-electron-microscopy (PEEM) and by transmission electron microscopy. In: McKenzie, W.S. & Zussman, J. (Eds.), *The feldspars*. Manchester University Press, Manchester, 536-550.
- LAVES, F. & SCHNEIDER, T. (1956). Ueber den rhombischen Schnitt in sauren Plagioklasen. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **36**, 622-623.
- LAWRENCE, R.D. (1970). Stress analysis based on albite twinning of plagioclase feldspar. *Bulletin of Geological Society of America*, **81**, 2507-2512.
- LIN, S., JIANG, D. & WILLIAMS, P.F. (1998). Transpression (or transtension) zones of triclinic symmetry: natural example and theoretical modelling. In: Holdsworth, R.E., Strachan, R.A. & Dewey, J.F. (Eds.), *Continental Transpression and Transtension Tectonics*. Geological Society of London, *Special Publication*, 41-47.
- LIU, J.G., KUNYIOSHI, K. & ITO, K. (1974). Experimental studies of the phase relations between greenschists and amphibolite in a basaltic system. *American Journal of Science*, **274**, 613-632.

- LISTER, G.S. (1974). The theory of deformation fabrics. *Unpublished Ph.D. Thesis – Australian National University*, 2 vols., 463 pp.
- LISTER, G.S. (1977). Discussion: crossed-girdle *c*-axis fabrics in quartzites plastically deformed by plane strain and progressive simple shear. *Tectonophysics*, **39**, 51-54.
- LISTER, G.S. & HOBBS, B.E. (1980). The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite: the influence of deformation history. *Journal of Structural Geology*, **2**, 355-371.
- LISTER, G.S. & PATERSON, M.S. (1979). The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite: fabric transitions. *Journal of Structural Geology*, **1**, 99-115.
- LISTER, G.S. & PRICE, G.P. (1978). Fabric development in a Quartz-feldspar mylonite. *Tectonophysics*, **49**, 37-78.
- LISTER, G.S., PATERSON, M.S. & HOBBS, B.E. (1978). The simulation of fabric development in plastic deformation and its application to quartzite: the model. *Tectonophysics*, **45**, 107-158.
- LOFGREN, G.E. (1974). An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization. *American Journal of Science*, **274**, 243-273.
- LOFGREN, G.E. & DONALSON, C.H. (1975). Curved branching crystals and differentiation in comb-layered rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **49**, 309-319.
- LÓPEZ, S. & CASTRO, A. (2001). Determination of the fluid-absent *solidus* and *supersolidus* phase relationships of MORB-derived amphibolites in the range 4-14 kbar. *American Mineralogist*, **86**, 1396-1403.
- LOTZE, F. (1945). Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotekt. Forsch.*, **6**, 78-92.
- LUAN, F.C. & PATERSON, M.S. (1992). Preparation and deformation of synthetic aggregates of quartz. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 301-320.
- LUNDSTRÖM, I. (1971). Width of albite twin lamellae. Part II. A pegmatite oligoclase and a volcanic labradorite. *Lithos*, **4**, 57-62.
- McLAREN, A.C. (1973). The domain structure of a transitional anorthite; a study by direct lattice-resolution electron microscopy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **41**, 47-52.
- MAINPRICE, D. & NICOLAS, A. (1989). Development of shape and lattice preferred orientations: applications to the seismic anisotropy of the lower crust. *Journal of Structural Geology*, **11**, 175-190.
- MARSH, B.D. (1988). Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **99**, 277-291.
- MARSAHALL, D.B. & McLAREN, A.C. (1974). The structure of Albite and Pericline twin boundaries in anorthite. *8th International Congress of Electrical Microscopy. Canberra, I*, 490-491.
- MARSHALL, D.B. & McLAREN, A.C. (1976). Deformation of plagioclase. *Abstracts-Congres Geologique Internationale Resumes*, **25**, vol. 2, Section. 14, Mineralogy, 581.
- MARSHALL, D.B. & McLAREN, A.C. (1977a). Deformation mechanisms in experimentally deformed plagioclase feldspars. *Physics and Chemistry of Minerals*, **1**, 351-370.

- MARSHALL, D.B. & McLAREN, A.C. (1977b). The direct observation and analysis of dislocations in experimentally deformed plagioclase feldspar. *Journal of Material Science*, **12**, 893-903.
- MARTELAT, J.E., SCHULMANN, K., LARDEAUX, J.M., NICOLLET, C. & CARDON, H. (1999). Granulite microfabrics and deformation mechanisms in southern Madagascar. *Journal of Structural Geology*, **21**, 671-688.
- MARUYAMA, S., SUZUKI, K. & LIOU, J.G. (1983). Greenschist-amphibolite transition equilibria at low pressures. *Journal of Petrology*, **24**, 583-604.
- MEANS, W.D. & REE, J.H. (1988). Seven types of subgrain boundaries in octachloropropane. *Journal of Structural Geology*, **10**, 765-770.
- MITRA, G. (1978). Ductile deformation zones and mylonites. *Tectonophysics*, **278**, 1057-1084.
- MIYASHIRO, A. (1973). Metamorphism and metamorphic belts. George Allen & Unwin Ltd., London, 492 pp.
- MOLLI, G. (1994). Microstructural features of high temperature zones in gabbros of Northern Apennine Ophiolites. *Journal of Structural Geology*, **16**, 1535-1541.
- MONTARDI, Y. & MAINPRICE, D. (1987). A transmission electron microscopic study of the natural plastic deformation of calcic plagioclases (An 68-70). *Bulletin of Mineralogie*, **110**, 1-14.
- MOODY, J.B.M.D. & JENKINS, J.E. (1983). Experimental characterization of the greenschist/amphibolite boundary in mafic systems. *American Journal of Science*, **283** (1), 48-92.
- MÜGGE, O. (1888). *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, **1**, 131f.
- MÜGGE, O. & HEIDE, F. (1931). Einfache Schiebung am Anorthit. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, **64**, 161-170.
- MUIR, I.D. (1955). Transitional optics of some andesines and labradorites. *Mineralogical Magazine*, **30**, 545-568.
- MÜLLER, W.F. & WENK, H.R. (1973). Changes in the domain structure of anorthites induced by heating. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 17-26.
- MUNHÁ, J.M. (1979). Blue amphiboles, metamorphic regime and plate tectonic modelling in the Iberian Pyrite Belt. *Contributions to. Mineralogy and Petrology*, **69**, 279-289.
- MUNHÁ, J.M., OLIVEIRA, J.T., RIBEIRO, A., OLIVEIRA, V., QUESADA, C. & KERRICH, R. (1986). Beja Acebuches ophiolite: Characterization and geodynamic significance. *Maleo*, **2**, 30.
- NICOLAS, A. & POIRIER, J.P. (1976). Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks. John Wiley & Sons. London. 444 pp.
- NICOLAS, A., BOUDIER, F. & BOULLIER, A.M. (1973). Mechanism of flow in naturally and experimentally deformed peridotites. *American Journal of Science*, **273**, 853-876.
- OLIVEIRA, J.T. (1980). The Devonian-Carboniferous stratigraphy and geodynamics of southern Portugal: some comments. *Rundgesprach "Subsidenz-Entwicklung" Tübingen*, **20**, 276-284.
- OLSEN, T.S. & KOHLSTEDT, D.L. (1984). Analysis of dislocations in some deformed plagioclase feldspar. *Physics and Chemistry of Minerals*, **11**, 153-160.

- OLSEN, T.S., KOHLSTEDT, D.L. (1985). Natural deformation and recrystallization of some intermediate plagioclase feldspars. *Tectonophysics*, **111**, 107-131.
- OLESEN, N.Ø. (1987). Plagioclase fabric development in a high-grade shear zone, Jotunheimen, Norway. *Tectonophysics*, **142**, 291-308.
- ORD, A. & CHRISTIE, J.M. (1984). Flow stresses from microstructures in mylonitic quartzites of the Moine thrust zone, Saint area, Scotland. *Journal of Structural Geology*, **6**, 639-655.
- ORD, A. & HOBBS, B.E. (1989). The strength of the continental crust, detachment zones and the development of plastic instabilities. *Tectonophysics*, **158**, 269-289.
- PACHECO-SANTOS, J.F.H., MATA, J., GONÇALVES, F. & MUNHÁ, J. (1985). Hercynian magmatism in the Santa Susana region (Alacer do Sal, south Portugal): Identification of Carboniferous convergent plate margin in the southern branch of the Iberian Hercynian Chain. *Resumen Reunion GOM*.
- PADMANABHAN, K.A. & DAVIES, G.J. (1980). Superplasticity. Materials Research and Engineering. Springer, Berlin.
- PASSCHIER, C.W. (1982). Mylonitic deformation in the Saint-Barthélemy Massif, French Pyrenees, with emphasis on the genetic relationship between ultramylonite and pseudotachylyte. *GUA Pap. Geol. Ser.*, **116**, 1-173.
- PASSCHIER, C.W. & SIMPSON, C. (1986). Porphyroclasts system as kinematic indicators. *Journal of Structural Geology*, **8**, 831-843.
- PASSCHIER, C.W. & TROUW, R.A.J. (1996). Micro-tectonics. Springer-Verlag, Berlin. 289 pp.
- PASSCHIER, C.W. & WILLIAMS, P.R. (1996). Conflicting shear indicator in shear zones; the problem of non-ideal sections. *Journal of Structural Geology*, **18**, 1281-1284.
- PATERSON, M.S. & WEISS, L.F. (1961). Symmetry concepts in the structural analysis of deformed rocks. *Geological Society of America Bulletin*, **72**, 841-882.
- PHILLIPS, B.L. & KIRKPATRICK, R.J. (1995). High-temperature ^{29}Si MAS NMR spectroscopy of anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) and its $\text{P}\bar{1}$ - $\text{I}\bar{1}$ structural phase transition. *Physics and Chemistry of Minerals*, **22**, 168-176.
- PHILLIPS, M.W., COLVILLE, A.A. & RIBBE, P.H. (1971). The crystal structure of two oligoclases: A comparison with low and high albite. *Zeitschrift für Kristallographie*, **133**, 43-65.
- PLYUSNINA, L.P. (1982). Geothermometry and geobarometry of plagioclase-hornblende bearing assemblages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **80**, 140-146.
- PREWITT, C.T., SUENO, S. & PARPIKE, J.J. (1976). The crystal structures of high albite and monalbite at high temperatures. *American Mineralogist*, **61**, 1213-1225.
- PRYER, L.L. (1993). Microstructures in feldspars from a major crustal shear thrust zone: the Grenville Front, Ontario, Canada. *Journal of Structural Geology*, **15**, 21-36.
- QUESADA, C. (1991). Geological constraints on the Paleozoic tectonic evolution of tectonostratigraphic terranes in the Iberian Massif. *Tectonophysics*, **185**, 225-245.
- QUESADA, C. & MUNHÁ, J. (1990). Part V: Ossa Morena zone. Metamorphism. In: Dallmayer, R.D. & Martínez García, E. (Eds.), Pre-mesozoic geology of Iberia. Springer-Verlag, Berlin, 315-320.

- QUESADA, C. & RIBEIRO, A. (1989). Paleozoic terrane of the Iberian Peninsula. In: Keppie, J.D. & Dallmeyer, R.D. (Eds.), Tectonic map of the Pre-Mesozoic terranes in circum-Atlantic Phanerozoic orogens. IGPC Project 233: Terranes in circum-atlantic paleozoic orogens.
- QUESADA, C., FONSECA, P.E., MUNHÁ, J., OLIVEIRA, J.T. & RIBEIRO, A. (1994). The Beja-Acebuches Ophiolite (Southern Iberia Variscan fold belt): Geological characterization and geodynamic significance. *Boletín Geológico y Minero*, **105**, 3-49.
- RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. (1983). The techniques of modern structural geology, vol.1: Strain Analysis. Academic Press, London. 307 pp.
- REE, J.H. (1990). High temperature deformation of octachloropropane – dynamic grain growth and lattice reorientation. *Geological Society of America. Special Publication*, **54**, 363-368.
- RIBEIRO, A. & SILVA, J.B. (1983). Structure of the South Portuguese Zone. In: Sousa, A. & Oliveira, J.T. (Eds.), The Carboniferous of Portugal. *Serviços geológicos de Portugal*, 91-97.
- RIBEIRO, A., QUESADA, C. & DALLMEYER, R.D. (1987a). Tectonostratigraphic terranes and the geodynamic evolution of the Iberian Variscan fold Belt. Deformation and plate tectonics, Gijón, España. 60-61.
- RIBEIRO, A., OLIVEIRA, J.T., RAMALHO, M. & RIBEIRO, L. (1987b). Carta geológica de Portugal. E. 1:150.000. Folha 48-D: Bordeira. *Serviços geológicos de Portugal*.
- RIBBE, P.H. (1983). Exsolution textures in ternary and plagioclase feldspar; interference colours. In: Reviews in Mineralogy (2nd. Edition), vol.2, Ribbe, P.H. (Ed.), *Mineral Society of America*, Washington D.C., 241-270.
- ROBIN, P.Y.F. & JOWETT, E.C. (1986). Computerized density contouring and statistical evaluation of orientation data using counting circles and continuous weighting functions. *Tectonophysics*, **121**, 207-223.
- RONOV, A.B. & YAROSHERVSKY, A.A. (1969). Chemical composition of Earth's crust. In: The Earth's Crust and Upper Mantle. Hart, P.J. (Ed.), *American Geophysical Union Monograph*, **13**, 37-57.
- ROSE, G. (1923). Über den Feldspath, Albit, Labrador and Anorthit. *Ann. Phys. Chem. Poggendorff*, **73**, 173-208.
- ROSENBERG, C.L. & STÜNITZ, H. (2003). Deformation and recrystallization of plagioclase along temperature gradient: an example from Bergell tonalite. *Journal of Structural Geology*, **25**, 389-408.
- RUSHMER, T. (1995). An experimental deformation study of partially molten amphibolite: application to low-fraction melt segregation. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 15681-15696.
- SANTOS, J.F.H.P., MATA, J., GONÇALVES, F. & MUNHÁ, J. (1987). Contribuição para o conhecimento da região de Santa Susana: o complexo vulcano-sedimentar da Toca da Moura. *Serviços geológicos de Portugal*, **73**, 29-78.
- SCANDALE, E., GANDAIS, M. & WILLAIME, C. (1983). TEM study of experimentally deformed K-feldspar single crystal. *Physics and Chemistry of Minerals*, **9**, 182-187.
- SCHEIDEGGER, A.E. (1965). On the statics of the orientation of bedding planes, grain axes and similar sedimentological data. *U.S. Geological Survey Prof. Paper* **525C**, 164-167.

- SCHERMERHORN, J.L.G, (1971). An outline of stratigraphy of the Iberian Pyrite Belt. *Boletín Geológico y Minero*, **82**, 239-268.
- SCHERMERHORN, J.L.G, (1975). Spilite, regional metamorphism and subduction in the Iberian Pyrite Belt: some comments. *Geologie en Mijnbouw*. **54**, 23-35.
- SCHMID, S.M. (1994). Textures of geological materials: computer model predictions versus empirical interpretations based on rocks deformation experiments and field studies. In: Bunge, H.L., Siegesmund, S., Skrotzki, W. & Webe, K. (Eds.), Textures of Geological Materials. Deutsch Gesellschaft für Materialkunde, Oberusel, 279-301.
- SCHMID, S.M.& CASEY, M (1986). Complete fabric analysis of some commonly observed quartz c-axis patterns. In: Mineral and rock deformation: Laboratory studies. The Paterson volume. *Geophysical monographs*, **36**, 263-286.
- SCHMID, S.M., CASEY, M. & STARKEY, J. (1981). The microfabric of calcite tectonites from the Helvetic Nappes (Swiss Alps). In: McClay, K. & Price, N.J. (Eds.), Thrust and Nappe Tectonics. *Special Publication. Geological Society of London*, **9**, 151-158.
- SCHULMANN, K., MLCOCH, B, & MELKA, R. (1996). High-temperature and reology of deformed granite, Erzgebirge, Bohemian Massif. *Journal of Structural Geology*, **18**, vol.6, 719-733.
- SIMANCAS, J.F. (1983). Geología de la extremidad oriental de la Zona Sur-portuguesa. *Tesis Doctoral, Universidad de Granada*, 439 pp.
- SEIFERT, K.E. (1964). The genesis of plagioclase twinning in the Nonewaug granite. *American Mineralogist*, **49**, 297-320.
- SEIFERT, K.E. & VER PLOEG, A.J. (1977). Deformation characteristics of experimentally deformed Adirondack anorthosite. *Canadian Journal of Earth Science*, **14**, 2706-2717.
- SELVERSONE, J. (1993). Micro- to macroscale interactions between deformational and metamorphic processes, Tauern Window, eastern Alps. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **73**, 229-239.
- SERONT, B., MAINPRICE, D. & CHRISTENSEN, N.I. (1993). A determination of the three-dimensional seismic proprieties of anorthosite: comparison between values calculated from petrofabric and direct laboratory measurements. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 2209-2221.
- SHELLEY, D. (1977). Plagioclase preferred orientation in Haast schist, New Zealand. *Journal of Geology*, **85**, 635-644.
- SHELLEY, D. (1979). Plagioclase preferred orientation, Foreshore Group metasediments, Bluff, New Zealand. *Tectonophysics*, **58**, 279-290.
- SHELLEY, D. (1986). Natural deformartion and recrystallisation of some intermediate plagioclase feldspar – a discussion on preferred orientation development. *Tectonophysics*, **124**, 359-362.
- SHELLEY, D. (1989). Plagioclase and quartz preferred orientations in a low-grade schist: the roles of primary growth and plastic deformation. *Journal of Structural Geology*, **11**, 1029-1038.
- SHELLEY, D. (1994). Spider texture and amphibolite preferred orientations. *Journal of Structural Geology*, **16**, 709-717.

- SHERRIFF, B.L. & HARTMAN, J.S. (1985). Solid-state high resolution ^{29}Si NMR of feldspar: Al-Si disorder and the effects of paramagnetic centres. *Canadian Mineralogist*, **23**, 205-212.
- SHIGEMATSU, N. (1999). Dynamic recrystallization in deformed plagioclase during progressive shear deformation. *Tectonophysics*, **305**, 437-452.
- SHIGEMATSU, N., TANAKA, H. (2000). Dislocation creep of fine-grained recrystallized plagioclase under low-temperature conditions. *Journal of Structural Geology*, **22**, 65-79.
- SHORE, H. (1982). Simple approximations for the inverse cumulative function, the density function and the loss integral of the normal distribution. *Applied Statistics*, **31**, 108-114.
- SIEGESMUND, S. & KRUHL, J.H. (1991). The effect of plagioclase textures on velocity anisotropy and shear wave splitting at deeper crustal levels. *Tectonophysics*, **191**, vol. 1-2, 147-154.
- SIEGESMUND, S., HELMING, K., KRUSE, R. (1994). Complete texture analysis of a deformed amphibolite: comparison between neutron diffraction and U-stage data. *Journal of Structural Geology*, **16** (1), 131-142.
- SILVA, J.B., OLIVEIRA, J.T. & RIBEIRO, A. (1990). Part VI: South Portuguese zone. Structural outline. In : Dallmeyer, R.D. & Martínez García, E. (Eds.), Pre-Mesozoic geology of Iberia. Springer-Verlag, Berlin, 348-362.
- SMITH, J.V. (1958). The effect of composition and structural state on the rhombic section and pericline twins of plagioclase feldspars. *Mineralogical Magazine*, **31**, 914-918.
- SMITH, J.V. (1962). Genetic aspects of twinning in feldspars. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, **42**, 244-263.
- SMITH, J.V. (1974). Feldspar minerals I. Crystal Structure and Physical Properties. Heidelberg (Springer).
- SMITH, J.V. & BROWN, W.L. (1988). Feldspar Minerals. Crystal Structures, Physical, Chemical and Microtextural Properties. Vol.1 (2nd Edition). Springer, New York.
- STAEHLI, J.L. & BRINKMANN, D. (1974a). A nuclear magnetic resonance study of the phase transition in anorthite. $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. *Zeitschrift Kristallographie*, **140**, 360-373.
- STAEHLI, J.L. & BRINKMANN, D. (1974b). Assignment and structural dependence of electric field gradients in anorthite and simple field gradient calculations in some aluminosilicates. *Zeitschrift Kristallographie*, **140**, 374-392.
- STARKEY, J. (1963). Glide twinning in the plagioclase feldspars. In: Redd-Hill *et al.* (Eds.), Deformation Twinning. *Metallurgical Society Conference*, **25**, 177-1991.
- STARKEY, J. (1967). On the relationship of pericline and albite twinning to the composition and structural state of plagioclase feldspars. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **47**, 257-268.
- STARKEY, J. & BROWN, W.L. (1964). Künstliche Erzeugung mechanischer Zwillinge in Anorthit. *Zeitschrift Kristallographie*, **120**, 388-192.
- STEACY, H.R. & ROSE, E.R. (1982). Bytownite - a legacy of early Ottawa, a Montreal doctor, and a Royal engineer. *Mineralogical Record*, **13**, 101-105.

- STEWART, D.B. & VON LIMBACH, T.L. (1967). Al /Si order and symmetry of natural alkali feldspars and the relationship of strained cell parameters to bulk composition. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et Cristallographie*, **97**, 356-377.
- STÜNITZ, H. (1998). Syndeformational recrystallization – dynamic or compositionally induced. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **131**, 219-236.
- SUWA, K., MIZUTANI, S. & TSUZUKI, Y. (1974). Proposed optical method of determining the twinning laws of plagioclase. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **11**, 167-250.
- TAKAHASHI, Y., TAINOSHO, Y., OSANAI, Y. & TSUCHIYA, N. (1997). Relationships between geological occurrences and twinning laws of plagioclase in granitic and metamorphic rocks in the Sør Rondane Mountains, Antarctica. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **48**, 305-312.
- TAYLOR, G.I. (1955). Strains in crystalline aggregates. Proc. Colloquium on Deformation and Flow of solids (Madrid, 1955). Springer, Berlin, 3-12.
- TAYLOR, W.H. (1933). The structure of sanidine and other feldspars. *Zeitschrift Kristallographie*, **85**, 425-442.
- TAYLOR, W.H., DARBYSHIRE, J.A. & STRUNZ, H. (1934). An X-ray investigation of the feldspars. *Zeitschrift Kristallographie*, **87**, 464
- THOMPSON, A.B. & ENGLAND, P.C. (1984). Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism, II. Their interference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *Journal of Petrology*, **25**, 928-955.
- THOMPSON, J.B. & HOVIS, G.L. (1978). Triclinic feldspar: angular relations and the representations of feldspar series. *American Mineralogist*, **63**, 981-990.
- THOMPSON, J.B., WALDBAUM, D.R. & HOVIS, G.L. (1974). Thermodynamic properties related to ordering in end-members alkali feldspars. In: The Feldspars. MacKenzie, W.S. & Zussman, J. (Eds.), Manchester. Univ. Press Manchester, 218-248.
- TREPIED, L., DOUKHAN, J.C. & PAQUET, J. (1980). Subgrain boundaries in quartz: theoretical analysis and microscopic observations. *Physics and Chemistry of Minerals*, **5**, 201-218.
- TRÖGER, W.E. (1971). Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. Teil 1. Bestimmungstabellen. 4. Neu bearbeitete Auflage von Bambauer, H.U., Taborszky, F., Trochim, H.D. 188 pp. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. English translation: 1979. Fifth German edition: 1982.
- TULLIS, J. (1979). High temperature deformation of rocks and minerals. In: U. S. National Committee report, 17th General Assembly, IUGG. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **17**, vol. 6, 1137-1154.
- TULLIS, J. (1983). Deformation of feldspars. In: Ribbe, P.H. (Ed.), Feldspar mineralogy. *Mineralogical Society. American Review in Mineralogy.*, **2**, 197-323.
- TULLIS, J. & YUND, R.A. (1980). Hydrolytic weakening of experimentally deformed Westerly granite and Hale albite rock. *Journal of Structural Geology*, **2**, 439-451.
- TULLIS, J. & YUND, R.A. (1985). Dynamic recrystallization of feldspar: a mechanism for ductile shear zone formation. *Geology*, **13**, 238-241.

- TULLIS, J. & YUND, R.A. (1987). Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspar: Mechanisms and microstructures. *Geology*, **15**, 606-609.
- TULLIS, J. & YUND, R.A. (1991). Diffusion creep in feldspar aggregates: experimental evidence. *Journal of Structural Geology*, **13**, 987-1000.
- TULLIS, J., CHRISTIE, J.M. & GRIGGS, D.T. (1973). Microstructures and preferred orientations of experimentally deformation quartzites. *Bulletin of Geological Society of America*, **84**, 297-314.
- TULLIS, J., DELL'ANGELO, L. & YUND, R.A. (1990). Ductile shear zones from brittle precursors in feldspathic rocks: The role of dynamic recrystallization. In: Hobbs, B.E. & Heard, H.C. (Eds.), Mineral and rock deformation: laboratory studies. *AGU, Geophysical Monograph*, **56**, 67-81.
- TULLIS, J., YUND, D. & FARVER, J. (1996). Deformation-enhanced fluid distribution in feldspar aggregates and implications for ductile shear zones. *Geology*, **24**, 63-66.
- TURNER, F.J. (1951). Observations on twinning of plagioclase in metamorphic rocks. *American Mineralogist*, **36**, 581-589.
- TURNER, F.J. & WEISS, L.E. (1963). Structural analysis of metamorphic tectonites. McGraw Hill, New York. 554 pp.
- ULLEMEYER, K., HELMING, K. & SIEGESMUND, S. (1994). Quantitative textural analysis of plagioclase. In: Bunge, H.J., Siegesmund, S., Skrotzki, S. & Weber, K. (Eds.), Texture of geological materials. DGM Informationsges, Oberursel, 83-92.
- URAI, J.L., JEANS, W.D. & LISTER, G.S. (1986). Dynamic recrystallization of minerals. In: Hobbs, B.E. (Ed.), Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies, The Paterson Volume. *Geophysical monograph* **36**, 161-199.
- VANCE, J.A. (1961). Polysynthetic twinning in plagioclase. *American Mineralogist*, **46**, 1097-1119.
- VEGAS, R. (1980). Carboniferous subduction complex in the Southportuguese zone coeval with basement reactivation and uplift in the Iberian Massif. *Cuad. Lab. Geol. Laxe*, **1**, 187-202.
- VEGAS, R. & MUÑOZ, M. (1976). El contacto entre las zonas Surportuguesa y Ossa-Morena en el SW de España. Una nueva interpretación. *Serviços geológicos de Portugal*, **60**, 31-51.
- VERNON, R.H. (1965). Plagioclase twins in some mafic gneisses from Broken Hill, Australia. *Mineralogical Magazine*, **35**, 488-507.
- VERNON, R.H. (1975). Deformation and recrystallization of plagioclase grain. *American Mineralogist*, **60**, 884-888.
- VIDAL, J.L., KUBIN, L., DEBAT, P. & SOULA, J.L. (1980). Deformation and dynamic recrystallization of K-feldspar augen in ortho-gneiss from Montagne Noir, Occitania. *Lithos*, **13**, 247-257.
- VON MISES, R. (1928). Mechanik der plastischen formänderung von kristallen. *Z. Angew. Math. Mech.*, **8**, 161-184.
- VOGEL, T.A. & SIEFTER, K.E. (1969). Deformation twinning in ordered plagioclase. *American Mineralogist*, **50**, 514-518.
- WATTS, M.J. & WILLIAMS, G.D. (1983). Strain geometry, microstructure and mineral chemistry in metagabbro shear zones: a study of softening mechanisms during progressive mylonitization. *Journal of Structural Geology*, **5**, 507-517.

- WENK, E. (1937). Zur Genese der Bändergneisi von Orno Huvud. *Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala*, **26**, 53-91.
- WENK, E., AGUE, D., WENK, H.-R. (1990). Deformation Microstructures and Lattice Orientations of Plagioclase in Gabbros from Central Australia. *Geophysical. Monograph*, **56**, 173-186.
- WENK, H.-R. (1979). Superstructure variation in metamorphic intermediate plagioclase. *American Mineralogist*, **64**, 71-76.
- WENK, H.-R., MÜLLER, W.F. & THOMAS, G. (1973). Antiphase domains in lunar plagioclase. *Geochimica and Cosmochimica Acta, Suppl.* 4, **1**, 909-923.
- WENK, H.-R., BUNGE, H.J., JANSEN, E., PANNETIER, J. (1986). Preferred orientation of plagioclase – neutron diffraction and U-stage data. *Tectonophysics*, **126**, 271-284.
- WENK, H.-R., TAKESHITA, T., BECHLER, E., ERSKINE, B.G. & MATTHIES, S. (1987). Pure shear and simple shear calcite textures. Comparison of experimental, theoretical and natural data. *Journal of Structural Geology. Society of London*, **144**, 731-746.
- WERNER, A.G. (1780). Cronstedt's Versuch einer Mineralogie, übersetzt von A.G. Werner. Freiberg. See Chester (1886).
- WHITE, J.C. (1980). Albite deformation within a basal ophiolite shear zone. In: Knipe, R.J. & Rutter, E.H. (Eds.), Deformation Mechanism, Rheology and Tectonics. *Geological Society. Special Publication*, **54**, 327-333.
- WHITE, S.H. (1975). Tectonic deformation and recrystallization of oligoclase. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **50**, 287-304.
- WHITE, S.H. (1979). Grain and sub-grain size variations across a mylonite zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **70**, 193-202.
- WICKMAN, F.E. & LUNDSTRÖM, I. (1939). Width of albite twin lamellae. Part 1. An oligoclase from a pegmatite, Bamble, Norway. *Lithos*, **2**, 197-213.
- WILLAIME, C. & GANDAIS, M. (1977). Electron microscope study of plastic defects in experimentally deformed alkali feldspar. *Bulletin of Mineralogic*, **100**, 263-271.
- WINTER, J.K., GHOSE, S. & OKAMURA, F.P. (1977). A high temperature study of the thermal expansion and the anisotropy of the sodium atom in low albite. *American Mineralogist*, **62**, 921-931.
- WOODCOCK, N.H. (1977). Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geological Society of America Bulletin*, **88**, vol.9, 1231-1236.
- WOOSTER, W.A. (1981). Atomic arrangements on the twin boundaries in orthoclase twins. *Mineralogical Magazine*, **44**, 351-353.
- YUND, R.A. & TULLIS, J. (1991). Compositional changes of minerals associated with dynamic recrystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **108**, 346-355.
- ZELEN, M. & SEVERO, N.C. (1964). Probability functions. Handbook of Mathematical Functions. Abramowitz, M. & Stegun, I.A. (Eds.), U.S. Department of Commerce. *Applied Mathematical Series*, **55**. 925-995.

ZHENG, Y. & GANDAI, M. (1987). Fine structure of (010)[001] dislocations in K-feldspars. *Philosophical Magazine*, **A55**, 329-338.

APÉNDICE A

Listado y funcionamiento del programa *PLAG-9*



Luis Ángel Zarazaga Garcés
Director de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación
(OTRI) de la Universidad de Huelva

CERTIFICA

Que según consta en los libros y archivos obrantes en la documentación oficial de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación de la Universidad de Huelva, la **Universidad de Huelva** ha solicitado en el Registro Provincial de la Propiedad Intelectual de Huelva, la inscripción de la obra: **"PLAG-9, Programa para la determinación de la orientación cristalográfica preferente (O.C.P.) de las Plagioclasas"**, con fecha 9 de enero de 2003; constando como autora de la misma, **Dña. Begoña Duclós Bautista**, con DNI nº 29.053.622-E. El número de solicitud es el **H-03-2003**, habiendo transcurrido en la actualidad el plazo máximo para dictar resolución, por lo que la solicitud se entiende estimada según lo dispuesto en los artículos 42 y 43 de la Ley 4/1999, de 13 de enero (BOE nº 12 de 14-1-99)

El presente certificado se emite a petición del interesado y para que conste a los efectos oportunos.

Huelva, 1 de abril de 2004

Fdo: Luis Ángel Zarazaga Garcés

' **DETERMINACION de la O.C.P. COMPLETA de las PLAGIOCLASAS**

' **Programa PLAG-9 (Autora: Begoña Duclos Bautista) ©**

' **1ª parte del Programa (PLAG-9-1)**

```

1 CLS : PROG$ = "PLAG-9-1"
' Lectura de Llave
X1$ = CHR$(36) + CHR$(49) + CHR$(36)
OPEN "LAM" FOR RANDOM AS #1 LEN = 3
FIELD #1, 3 AS XA$
GET #1, 1
CL1$ = XA$
CLOSE #1
IF CL1$ = X1$ THEN GOTO 5 ELSE GOTO 10
' Anulacion de la Llave
5 CARR$ = "NO"
XZ$ = CHR$(90) + CHR$(90) + CHR$(90)
OPEN "LAM" FOR RANDOM AS #1 LEN = 3
FIELD #1, 3 AS XA$
LSET XA$ = XZ$
PUT #1, 1
CLOSE #1
GOTO 80
10 Llave$ = CHR$(100) + CHR$(117) + CHR$(99) + CHR$(54) + CHR$(49) + CHR$(49)
15 COLOR 15, 0
FOR LIN = 2 TO 20: LOCATE LIN, 7: PRINT "||": NEXT LIN
FOR LIN = 6 TO 23: LOCATE LIN, 73: PRINT "||": NEXT LIN
FOR COL = 2 TO 72: LOCATE 5, COL: PRINT "=": NEXT COL
FOR COL = 8 TO 79: LOCATE 20, COL: PRINT "=": NEXT COL
LOCATE 5, 7: PRINT "┌┐"
LOCATE 5, 73: PRINT "┌┐"
LOCATE 20, 7: PRINT "┌┐"
LOCATE 20, 73: PRINT "┌┐"
COLOR 12, 0
FOR LIN = 7 TO 9: LOCATE LIN, 10: PRINT STRING$(61, 219): NEXT LIN
COLOR 15, 0
LOCATE 8, 12
PRINT " DETERMINACION de la O.C.P. COMPLETA de las PLAGIOCLASAS "
COLOR 1, 0
FOR LIN = 12 TO 18: LOCATE LIN, 41: PRINT STRING$(30, 219): NEXT LIN
COLOR 11, 0
LOCATE 13, 43: PRINT "      Begoña Duclos      "
LOCATE 15, 43: PRINT " Dpto. Geodinamica y Paleontologia  "
LOCATE 16, 43: PRINT "      Universidad de HUELVA      "
LOCATE 17, 43: PRINT "      duclos@uhu.es      "
COLOR 3, 0
FOR LIN = 13 TO 17: LOCATE LIN, 10: PRINT STRING$(26, 219): NEXT LIN
COLOR 9, 0: LOCATE 14, 12: PRINT " Programa: "; "PLAG-9"; " "
LOCATE 15, 12: PRINT " (Version 9.2) "
LOCATE 16, 12: PRINT " Abril de 2002 "
18 TEC$ = INKEY$: IF LEN(TEC$) = 0 THEN GOTO 18
20 CLS : COLOR 9, 0
LOCATE 1, 1: PRINT "┌┐"; STRING$(78, 205); "┐┐"
LOCATE 2, 1: PRINT "┌┐"; TAB(80); "┐┐"
LOCATE 3, 1: PRINT "┌┐"; STRING$(78, 205); "┐┐"

```

```

COLOR 15, 0: LOCATE 2, 3
PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
50 ' Peticion Clave
COLOR 12, 0
FOR LIN = 10 TO 14: LOCATE LIN, 30: PRINT STRING$(20, 219): NEXT LIN
COLOR 14, 0: LOCATE 11, 32: PRINT " Entre la CLAVE "
K = 0
60 COLOR 14, 0: LOCATE 13, 37: PRINT STRING$(6, 177)
COLOR 0, 0: LOCATE 13, 37: INPUT "", CCC$
K = K + 1: IF K = 4 THEN GOTO 70
IF CCC$ = Llave$ THEN GOTO 80
GOTO 60
70 END
SYSTEM
80 CLS : CLOSE
DIM CORTE$(3), GL(24, 3), CLAVE$(24, 3), CLVM$(3, 24), NTG(24)
DIM TGC(3), PL$(20)
U20$ = "##": U22$ = "##.##": U23$ = "##.###": U24$ = "##.####"
U30$ = "###": U32$ = "###.##": U40$ = "###.###": U43$ = "###.####"
85 GOSUB 8000
200 ' MENU ENTRADA DATOS y OPCIONES
CLS : COLOR 9, 0
LOCATE 1, 1: PRINT "┌"; STRING$(78, 205); "┐"
LOCATE 2, 1: PRINT "│"; TAB(80); "│"
LOCATE 3, 1: PRINT "└"; STRING$(78, 205); "┘"
COLOR 15, 0: LOCATE 2, 3
PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
COLOR 7, 0
LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
FOR LIN = 5 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
LOCATE 24, 1: PRINT SPACE$(80);
COLOR 15, 0
LOCATE 5, 21: PRINT "┌"; STRING$(37, 205); "┐"
FOR LIN = 6 TO 21: LOCATE LIN, 21: PRINT "│"; TAB(59); "│": NEXT LIN
LOCATE 22, 21: PRINT "└"; STRING$(37, 205); "┘"
COLOR 14, 1: FOR LIN = 6 TO 8: LOCATE LIN, 23: PRINT SPACE$(35): NEXT LIN
LOCATE 7, 23: PRINT "  M E N U  P R I N C I P A L  "
COLOR 11, 1: FOR LIN = 10 TO 21: LOCATE LIN, 23: PRINT SPACE$(35): NEXT LIN
LOCATE 11, 23: PRINT " 1. Introducir Datos de Granos  "
LOCATE 13, 23: PRINT " 2. Otras Opciones: "
COLOR 3, 1: LOCATE 14, 23: PRINT "   - Test de Uniformidad de Ajne"
LOCATE 15, 23: PRINT "   - Resumen estadistico  "
LOCATE 16, 23: PRINT "   - Mostrar Granos en pantalla "
LOCATE 17, 23: PRINT "   - Imprimir Granos archivados "
LOCATE 18, 23: PRINT "   - Borrar Archivos          "
COLOR 11, 1: LOCATE 20, 23: PRINT " 3. SALIR          "
220 COLOR 11, 0: LOCATE 23, 28: INPUT " Indique lo que desea: ", IWW$
IW = VAL(IWW$): IF IW > 0 AND IW < 4 THEN GOTO 250
SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 23, 47: PRINT "   ": GOTO 220
250 ON IW GOTO 275, 380, 70
275 ' OPCION de PRESENTAR las PANTALLAS de ANGULOS y el RESUMEN
COLOR 15, 0
FOR LIN = 5 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(78): NEXT LIN
LOCATE 5, 7: PRINT "┌"; STRING$(67, 205); "┐"
FOR LIN = 6 TO 20: LOCATE LIN, 7: PRINT "│"; TAB(75); "│": NEXT LIN

```

```

LOCATE 20, 7: PRINT "L"; STRING$(67, 205); "J"
COLOR 14, 1
FOR LIN = 6 TO 8: LOCATE LIN, 9: PRINT SPACE$(65): NEXT LIN
FOR LIN = 10 TO 19: LOCATE LIN, 9: PRINT SPACE$(65): NEXT LIN
LOCATE 7, 24: PRINT "Al finalizar la ENTRADA de GRANOS : "
COLOR 11, 1
LOCATE 11, 19: PRINT "OPCIONES de PRESENTACION de PANTALLAS: "
COLOR 3, 1
LOCATE 14, 9: PRINT " 1. No presentar ninguna"
LOCATE 16, 9: PRINT " 2. Presentar las 2 finales de Ajuste del E.H a Burri "; ""
LOCATE 18, 9: PRINT " 3. Presentar Ajustes angulares segun posiciones de E.H"
COLOR 11, 0
280 LOCATE 22, 24: INPUT "Elija opcion: ", WW$
IF WW$ = "" THEN GOTO 280
W = VAL(WW$): IF W > 0 AND W < 4 THEN GOTO 285
SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 22, 38: PRINT " ": GOTO 280
COLOR 15, 0
285 ON W GOTO 300, 310, 320
300 PANT$ = "0": GOTO 330
310 PANT$ = "2": GOTO 335
320 PANT$ = "6": GOTO 340
330 LOCATE 22, 22: PRINT "No se presentaran las Pantallas": GOTO 360
335 LOCATE 22, 19: PRINT "Se presentaran las 2 Pantallas resumen": GOTO 360
340 LOCATE 22, 24: PRINT "Se presentaran las 6 Pantallas "
360 COLOR 7, 0: LOCATE 23, 40: INPUT "", YY$
GOTO 400
380 ' Llave para PLAG-9-2
X2$ = CHR$(38) + CHR$(50) + CHR$(38)
OPEN "LAM" FOR RANDOM AS #1 LEN = 3
FIELD #1, 3 AS XA$
LSET XA$ = X2$
PUT #1, 2
CLOSE #1
RUN "PLAG-9-2"
' ENTRADA de GRANOS
400 CLS : COLOR 9, 0
LOCATE 1, 1: PRINT "L"; STRING$(78, 205); "J"
LOCATE 2, 1: PRINT "L"; TAB(80); "J"
LOCATE 3, 1: PRINT "L"; STRING$(78, 205); "J"
COLOR 15, 0: LOCATE 2, 3
PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
COLOR 7, 0
LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
410 FOR LIN = 4 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
LOCATE 24, 1: PRINT SPACE$(79);
CORTE$(1) = "Almonaster": CORTE$(2) = "Veredas": CORTE$(3) = "Aracena"
COLOR 14, 4: LOCATE 6, 35: PRINT " ENTRADA DE DATOS "
COLOR 15, 4: LOCATE 6, 35: PRINT " Corte 1: Almonaster "
LOCATE 7, 35: PRINT " Corte 2: Veredas "
LOCATE 8, 35: PRINT " Corte 3: Aracena "
440 COLOR 11, 0: LOCATE 24, 40: PRINT "-T- TERMINA";
LOCATE 23, 36: INPUT "Seleccione el Corte: ", CW$
IF CW$ = "T" OR CW$ = "t" THEN GOTO 80
C = VAL(CW$): IF C = 0 OR C > 3 THEN GOTO 455 ELSE GOTO 457
455 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 23, 55: PRINT " ": GOTO 440
457 COLOR 7, 4: FOR LIN = 6 TO 10: LOCATE LIN, 34: PRINT SPACE$(38): NEXT LIN

```

```

LOCATE 6, 35: PRINT " Corte : "
COLOR 15, 4: LOCATE 6, 45: PRINT C; " - "; CORTE$(C)
460 GOSUB 3000
470 RG = TGC(C)
COLOR 11, 0
500 LOCATE 23, 35: INPUT "Indique n° de Muestra: ", MWW$
IF MWW$ = "T" OR MWW$ = "t" THEN GOTO 410
MW = VAL(MWW$): IF MW = 0 OR MW > 24 THEN GOTO 520 ELSE GOTO 525
520 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 23, 58: PRINT " ": GOTO 500
525 COLOR 15, 1: IF MW > 12 THEN GOTO 530
LOCATE 9 + MW, 2: PRINT USING U20$; MW
GOTO 535
530 LOCATE MW - 3, 17: PRINT USING U20$; MW
535 COLOR 7, 4: LOCATE 7, 35: PRINT " Muestra: "
COLOR 15, 4: LOCATE 7, 45: PRINT MW
540 COLOR 11, 0: LOCATE 23, 35: PRINT SPACE$(40)
LOCATE 23, 35: INPUT "Indique n° de Lamina: ", LWW$
IF LWW$ = "T" OR LWW$ = "t" THEN GOTO 410
LW = VAL(LWW$): IF LW = 0 OR LW > 3 THEN GOTO 560 ELSE GOTO 565
560 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 23, 46: PRINT " ": GOTO 540
565 COLOR 7, 4: LOCATE 8, 35: PRINT " Lamina : "
COLOR 15, 4: LOCATE 8, 45: PRINT LW
COLOR 15, 1
580 NG = GL(MW, LW): CLV$ = CLAVE$(MW, LW)
IF MW < 13 THEN GOTO 595
ON LW GOTO 640, 650, 660
595 ON LW GOTO 600, 610, 620
600 LOCATE 9 + MW, 6: PRINT USING U20$; NG
GOTO 670
610 LOCATE 9 + MW, 10: PRINT USING U20$; NG
GOTO 670
620 LOCATE 9 + MW, 14: PRINT USING U20$; NG
GOTO 670
640 LOCATE MW - 3, 21: PRINT USING U20$; NG
GOTO 670
650 LOCATE MW - 3, 25: PRINT USING U20$; NG
GOTO 670
660 LOCATE MW - 3, 29: PRINT USING U20$; NG
670 IF NG = 0 THEN GOTO 680 ELSE GOTO 745
680 MM$ = STR$(MW): LAW$ = STR$(LW)
COLOR 7, 4: FOR LIN = 9 TO 10: LOCATE LIN, 34: PRINT SPACE$(38): NEXT LIN
M = MW
LOCATE 9, 45: PRINT "███"
682 LOCATE 9, 35: INPUT "Clave : ", RW$
IF LEN(RW$) > 2 THEN GOTO 685
IF LEN(RW$) = 1 THEN R$ = RW$ + "ú"
GOTO 687
SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 9, 45: PRINT SPACE$(Y): GOTO 682
685 R$ = LEFT$(RW$, 2)
687 LOCATE 9, 45: PRINT R$; " "
LOCATE 10, 45: PRINT "mmaa"
ANN$ = RIGHT$(DATE$, 2): AN = VAL(ANN$)
690 LOCATE 10, 35: INPUT "Fecha : ", FW$
Z = LEN(FW$): IF Z = 4 THEN GOTO 695
SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 10, 45: PRINT SPACE$(Z): GOTO 690
695 F1W$ = LEFT$(FW$, 2): F1 = VAL(F1W$)

```

```

IF F1 = 0 OR F1 > 12 THEN GOTO 700
F2W$ = RIGHT$(FW$, 2): F2 = VAL(F2W$)
IF F2 >= 0 AND F2 < AN + 2 THEN GOTO 720
700 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 10, 45: PRINT "      ": GOTO 690
720 CLV$ = R$ + "." + FW$ + "-" + MM$ + "-" + LAW$
CLAVE$(MW, LW) = CLV$: CLVM$(C, MW) = R$ + "." + FW$ + "-" + MM$
745 COLOR 7, 0: FOR LIN = 9 TO 10: LOCATE LIN, 33: PRINT SPACE$(39): NEXT LIN
COLOR 15, 4: LOCATE 8, 49: PRINT CLV$
G = NG: CLVM$(C, MW) = LEFT$(CLV$, 10)
' Nuevo Grano
1000 G = G + 1: NTG(MW) = NTG(MW) + 1: TG = NTG(MW): RG = RG + 1
' n° registro
COLOR 7, 1: FOR LIN = 12 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
COLOR 7, 0: LOCATE 24, 1: PRINT SPACE$(80);
COLOR 15, 1: LOCATE 12, 1
PRINT "N°"; TAB(6); "DIREC."; TAB(13); "BUZ."; TAB(18); "COD."
LOCATE 12, 22: PRINT "EJE"; TAB(33); "L"; TAB(42); "M"; TAB(51); "N  "
LOCATE 12, 54: PRINT "  AZIM."; TAB(67); "MOD"; TAB(74); "ANGULO "
LOCATE 13, 1: PRINT STRING$(80, 196)
1020 GOSUB 3500
1030 COLOR 15, 3
' G = Grano a meter
GU = G
1050 COL = 1 + 4 * LW
LOCATE 9, COL: PRINT USING U30$; GU: GL(MW, LW) = GU
1070 COLOR 7, 4: LOCATE 7, 61: PRINT "Grano:"
COLOR 15, 4: LOCATE 7, 66: PRINT G
1080 COLOR 7, 1
1100 I = 1: E = 1 ' Eje 1
GOSUB 3600
GOSUB 4000
E = 2
GOSUB 3650
GOSUB 4050
GOSUB 4400
E = 3
GOSUB 4500
COLOR 27, 1: LOCATE 23, 28: INPUT "Si quiere corregir entre -S-: ", YY$
COLOR 7, 1: IF YY$ = "S" THEN GOTO 1200 ELSE GOTO 1210
1200 FOR L = 14 TO 16: LOCATE L, 1: PRINT SPACE$(79): NEXT L
LOCATE 23, 28: PRINT SPACE$(50)
GOTO 1100
1210 LOCATE 23, 28: PRINT SPACE$(50)
I = 2: E = 1
GOSUB 3700
GOSUB 4100
E = 2
GOSUB 3750
GOSUB 4150
GOSUB 4450
E = 3
GOSUB 4600
COLOR 27, 1
LOCATE 23, 28: INPUT "Si quiere corregir entre -S-: ", YY$
COLOR 7, 1: IF YY$ = "S" THEN GOTO 1295 ELSE GOTO 1300
1295 LOCATE 23, 28: PRINT SPACE$(50)

```

```

FOR L = 18 TO 20: LOCATE L, 1: PRINT SPACE$(79): NEXT L
LOCATE 23, 28: PRINT SPACE$(50)
GOTO 1210
1300 LOCATE 23, 28: PRINT SPACE$(50)
1900 ' P.A.
    LOCATE 22, 2: PRINT "PA"
1910 LOCATE 22, 6: INPUT "", DPWW$
    IF DPWW$ = "0" THEN GOTO 1911
    DPW = VAL(DPWW$): IF DPW = 0 OR DPW > 360 THEN GOTO 1912 ELSE GOTO 1915
1911 DPW = 0: GOTO 1915
1912 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
1913 LOCATE 22, 6: PRINT " "; TAB(13); " "
    GOTO 1910
1915 LOCATE 22, 6: PRINT USING U30$; DPW
1920 LOCATE 22, 12: INPUT "", BPWW$
    IF BPWW$ = "R" THEN GOTO 1913
    IF BPWW$ = "0" THEN GOTO 1925
    BPW = VAL(BPWW$): IF BPW = 0 OR BPW > 360 THEN GOTO 1930 ELSE GOTO 1945
1925 BPW = 0: GOTO 1945
1930 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
1932 LOCATE 22, 13: PRINT " "; TAB(18); " "
    GOTO 1920
1945 LOCATE 22, 12: PRINT USING U40$; BPW
1950 LOCATE 22, 19: INPUT "", CPWW$
    IF CPWW$ = "R" THEN GOTO 1932
    CPW$ = LEFT$(CPWW$, 1): IF CPW$ = "D" OR CPW$ = "I" THEN GOTO 1960
1955 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 22, 18: PRINT " "; TAB(24); " "
    GOTO 1950
1960 LOCATE 22, 19: PRINT CPW$
1970 DP = DPW: BP = BPW: CP$ = CPW$

2000 ' Azimut P.A.
    IF DP >= 0 AND DP <= 90 THEN GOTO 2035
    IF DP >= 271 AND DP <= 360 THEN GOTO 2050
    IF CP$ = "I" THEN AP = 270 - DP
    IF CP$ = "D" THEN AP = 450 - DP
    GOTO 2110
2035 IF CP$ = "I" THEN AP = 270 - DP
    IF CP$ = "D" THEN AP = 90 - DP
    GOTO 2110
2050 IF CP$ = "I" THEN AP = 630 - DP
    IF CP$ = "D" THEN AP = 450 - DP
    ' Coordenadas cartesianas P.A.
2110 PI = 3.141592654#
    AR = AP * PI / 180: BR = BP * PI / 180
    LP = COS(AR) * COS(BR): MP = SIN(AR) * COS(BR): NP = SIN(BR)
    MODP = SQR(LP ^ 2 + MP ^ 2 + NP ^ 2)
    LP = LP / MODP: MP = MP / MODP: NP = NP / MODP
    LP = CINT(LP * 10000) / 10000: MP = CINT(MP * 10000) / 10000
    NP = CINT(NP * 10000) / 10000
2200 LOCATE 22, 12: PRINT USING U40$; BP
    LOCATE 22, 30: PRINT USING U24$; LP; TAB(39); MP; TAB(48); NP
    LOCATE 22, 58: PRINT USING U40$; AP
    LOCATE 22, 66: PRINT USING U22$; MODP
    COLOR 27, 1: LOCATE 23, 28: INPUT "Si quiere corregir entre -S-: ", YY$
    COLOR 7, 1: IF YY$ <> "S" THEN GOTO 2260

```

```

2250 LOCATE 23, 28: PRINT SPACE$(50)
      LOCATE 21, 1: PRINT SPACE$(78)
      GOTO 1900
2260 LOCATE 23, 28: PRINT SPACE$(50)
      ' REORDENAMIENTO de EJES
2280 GOSUB 5010
2300 ' E.H.
      LX = MR11 * NR21 - NR11 * MR21: MX = NR11 * LR21 - LR11 * NR21
      NX = LR11 * MR21 - MR11 * LR21
      MODX = SQR(LX ^ 2 + MX ^ 2 + NX ^ 2)
      LXM = LX / MODX: MXM = MX / MODX: NXM = NX / MODX
      LY = MR12 * NR22 - NR12 * MR22: MY = NR12 * LR22 - LR12 * NR22
      NY = LR12 * MR22 - MR12 * LR22
      MODY = SQR(LY ^ 2 + MY ^ 2 + NY ^ 2)
      LYM = LY / MODY: MYM = MY / MODY: NYM = NY / MODY
      LZ = MR13 * NR23 - NR13 * MR23: MZ = NR13 * LR23 - LR13 * NR23
      NZ = LR13 * MR23 - MR13 * LR23
      MODZ = SQR(LZ ^ 2 + MZ ^ 2 + NZ ^ 2)
      LZM = LZ / MODZ: MZM = MZ / MODZ: NZM = NZ / MODZ
      NUMA1 = (LX * MX + LY * MY + LZ * MZ) * (MX * NX + MY * NY + MZ * NZ)
      NUMA2 = (LX * NX + LY * NY + LZ * NZ) * (MX * MX + MY * MY + MZ * MZ)
      DENA1 = (LX * LX + LY * LY + LZ * LZ) * (MX * MX + MY * MY + MZ * MZ)
      DENA2 = (LX * MX + LY * MY + LZ * MZ) * (LX * MX + LY * MY + LZ * MZ)
      NUMB1 = (LX * MX + LY * MY + LZ * MZ) * (LX * NX + LY * NY + LZ * NZ)
      NUMB2 = (MX * NX + MY * NY + MZ * NZ) * (LX * LX + LY * LY + LZ * LZ)
      IF DENA1 - DENA2 = 0 THEN GOTO 2400
      AA = (NUMA1 - NUMA2) / (DENA1 - DENA2): BB = (NUMB1 - NUMB2) / (DENA1 - DENA2)
      DD = SQR(1 + AA ^ 2 + BB ^ 2)
      LH = AA / DD: MH = BB / DD: NH = 1 / DD
      MODH = SQR(LH ^ 2 + MH ^ 2 + NH ^ 2)
      LH = LH / MODH: MH = MH / MODH: NH = NH / MODH
      LH = CINT(LH * 10000) / 10000: MH = CINT(MH * 10000) / 10000
      NH = CINT(NH * 10000) / 10000
      L3 = LH: M3 = MH: N3 = NH
      GOTO 2485
2400 COLOR 12, 1: LOCATE 22, 5
      INPUT "ERROR en calculos. Denominador = 0.  Modifique algun dato", Y$
      COLOR 7, 1: G = G - 1: GOTO 1000
      ' Azimut E.H.
2485 GOSUB 5700
2500 LOCATE 23, 2: PRINT "EH"
      LOCATE 23, 12: PRINT USING U40$; BH
      LOCATE 23, 30: PRINT USING U24$; LH; TAB(39); MH; TAB(48); NH
      LOCATE 23, 58: PRINT USING U40$; AH
2600 ' Angulo P.A - E.H
      ARG = LH * LP + MH * MP + NH * NP
      IF ARG > .9999 THEN GOTO 2624
      ANG = ATN(ARG / SQR(1 - ARG ^ 2)) + PI / 2
      ANGULO = ANG * 180 / PI: GOTO 2625
      GOTO 2625
2624 ANGULO = 0
2625 IF ANGULO <= 90 THEN GOTO 2630
      ANGULO = 180 - ANGULO
2630 LOCATE 23, 64: PRINT "Ang.PA/EH:"
      LOCATE 23, 73: PRINT USING U32$; ANGULO
      ANG = CINT(ANGULO * 100) / 100

```

```
' Apertura de Archivos
GOSUB 8000
' ARCHIVADO
2637 ON C GOTO 2640, 2670, 2700
2640 ON LW GOTO 2650, 2655, 2660
2650 GL1 = GL(MW, 1): CL1$ = CLAVE$(MW, 1): CM$ = CLVM$(1, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C1"
      WRITE #1, MW, GL1, CL1$, CM$
      CLOSE #1
      GOTO 2750
2655 GL2 = GL(MW, 2): CL2$ = CLAVE$(MW, 2): CM$ = CLVM$(1, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C1"
      WRITE #1, MW, GL2, CL2$, CM$
      CLOSE #1
      GOTO 2750
2660 GL3 = GL(MW, 3): CL3$ = CLAVE$(MW, 3): CM$ = CLVM$(1, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C1"
      WRITE #1, MW, GL3, CL3$, CM$
      CLOSE #1
      GOTO 2750
2670 ON LW GOTO 2680, 2685, 2690
2680 GL1 = GL(MW, 1): CL1$ = CLAVE$(MW, 1): CM$ = CLVM$(2, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C2"
      WRITE #1, MW, GL1, CL1$, CM$
      CLOSE #1
      GOTO 2750
2685 GL2 = GL(MW, 2): CL2$ = CLAVE$(MW, 2): CM$ = CLVM$(2, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C2"
      WRITE #1, MW, GL2, CL2$, CM$
      CLOSE #1
      GOTO 2750
2690 GL3 = GL(MW, 3): CL3$ = CLAVE$(MW, 3): CM$ = CLVM$(2, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C2"
      WRITE #1, MW, GL3, CL3$, CM$
      CLOSE #1
      GOTO 2750
2700 ON LW GOTO 2710, 2715, 2720
2710 GL1 = GL(MW, 1): CL1$ = CLAVE$(MW, 1): CM$ = CLVM$(3, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C3"
      WRITE #1, MW, GL1, CL1$, CM$
      CLOSE #1
      GOTO 2750
2715 GL2 = GL(MW, 2): CL2$ = CLAVE$(MW, 2): CM$ = CLVM$(3, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C3"
      WRITE #1, MW, GL2, CL2$, CM$
      CLOSE #1
      GOTO 2750
2720 GL3 = GL(MW, 3): CL3$ = CLAVE$(MW, 3): CM$ = CLVM$(3, MW)
      OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C3"
      WRITE #1, MW, GL3, CL3$, CM$
      CLOSE #1
' Archivado
2750 MLG = MW * 100 + GU
      ON C GOTO 2800, 2830, 2860
2800 ON LW GOTO 2810, 2815, 2820
2810 OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C1"
```



```

GOTO 2900
2815 OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C1"
GOTO 2900
2820 OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C1"
GOTO 2900
' Archivado Corte 2
2830 ON LW GOTO 2840, 2845, 2850
2840 OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C2"
GOTO 2900
2845 OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C2"
GOTO 2900
2850 OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C2"
GOTO 2900
' Archivado Corte 3
2860 ON LW GOTO 2870, 2875, 2880
2870 OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C3"
GOTO 2900
2875 OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C3"
GOTO 2900
2880 OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C3"
GOTO 2900
' ARCHIVADO de GRANOS
2900 WRITE #2, MLG
WRITE #2, LR11, MR11, NR11, LR12, MR12, NR12, LR13, MR13, NR13
WRITE #2, LR21, MR21, NR21, LR22, MR22, NR22, LR23, MR23, NR23
WRITE #2, AR11, BR11, CR11$, DR11, ER11$
WRITE #2, AR12, BR12, CR12$, DR12, ER12$
WRITE #2, AR13, BR13, CR13$, DR13, ER13$
WRITE #2, AR21, BR21, CR21$, DR21, ER21$
WRITE #2, AR22, BR22, CR22$, DR22, ER22$
WRITE #2, AR23, BR23, CR23$, DR23, ER23$
WRITE #2, LP, MP, NP, AP, BP, CP$, DP, LH, MH, NH, AH, BH, ANG
CLOSE #2
LOCATE 23, 1: INPUT "", YW$
' ROTACIONES del E.H. y ANGULO MENOR
2950 GOTO 6000
2980 COLOR 11, 0
LOCATE 24, 28: PRINT "Para continuar, pulse INTRO. -T- TERMINA ";
COLOR 7, 1: LOCATE 22, 79: INPUT "", YW$
IF YW$ = "t" OR YW$ = "T" THEN GOTO 2990 ELSE GOTO 2995
2990 COLOR 7, 0: LOCATE 25, 1: PRINT SPACE$(79);
GOTO 80
2995 GOTO 1000
3000 ' ESTADILLO
COLOR 2, 1
LOCATE 5, 1: PRINT "
LOCATE 6, 1: PRINT "
LOCATE 7, 1: PRINT "
LOCATE 8, 1: PRINT "
LOCATE 9, 1: PRINT "
FOR LIN = 10 TO 21
LOCATE LIN, 1: PRINT "||"; TAB(4); "|"; TAB(16); "||"; TAB(19); "|"; TAB(31); "||"
NEXT LIN
LOCATE 22, 1: PRINT "
LOCATE 23, 1: PRINT "
FOR M = 1 TO 12: LOCATE 9 + M, 2: PRINT USING U20$; M: NEXT M

```

```

FOR M = 13 TO 24: LOCATE M - 3, 17: PRINT USING U20$; M: NEXT M
GOSUB 5000
GOSUB 8500
3030 ON C GOTO 3040, 3060, 3080
' Corte 1
3040 OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C1"
GOSUB 3150
3045 OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C1"
GOSUB 3200
3050 OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C1"
GOSUB 3250
' Nº Granos NTG(M)
FOR M = 1 TO 24: NTG(M) = GL(M, 1) + GL(M, 2) + GL(M, 3): NEXT M
' Nº Granos Corte 1 - TGC(1)
TGC(1) = 0
FOR M = 1 TO 24: TGC(1) = TGC(1) + NTG(M): NEXT M
LOCATE 23, 2: PRINT "Total Granos Corte "; C; ": "; TGC(1)
RG = TGC(1) + 1
RETURN
' Corte 2
3060 OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C2"
GOSUB 3150
3065 OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C2"
GOSUB 3200
3070 OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C2"
GOSUB 3250
' Nº Granos Muestra - NTG(M)
FOR M = 1 TO 24: NTG(M) = GL(M, 1) + GL(M, 2) + GL(M, 3): NEXT M
' Nº Granos en Corte - TGC(2)
TGC(2) = 0
FOR M = 1 TO 24: TGC(2) = TGC(2) + NTG(M): NEXT M
LOCATE 23, 2: PRINT "Total Granos Corte "; C; ": "; TGC(2)
RG = TGC(2) + 1
RETURN
' Corte 3
3080 OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C3"
GOSUB 3150
3085 OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C3"
GOSUB 3200
3090 OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C3"
GOSUB 3250
' Nº Granos Muestra - NTG(M)
FOR M = 1 TO 24: NTG(M) = GL(M, 1) + GL(M, 2) + GL(M, 3): NEXT M
' Nº Granos Corte - TGC(3)
TGC(3) = 0
FOR M = 1 TO 24: TGC(3) = TGC(3) + NTG(M): NEXT M
LOCATE 23, 2: PRINT "Total Granos Corte "; C; ": "; TGC(3)
RG = TGC(3) + 1
RETURN
' Lectura Lamina 1
3150 FOR M = 1 TO 24
IF EOF(1) THEN 3160
INPUT #1, M, GL1, CL1$, CM$
GL(M, 1) = GL1: CLAVE$(M, 1) = CL1$: CLVM$(C, MW) = CM$
IF M > 12 THEN GOTO 3155
LOCATE 9 + M, 5: PRINT USING U30$; GL(M, 1)

```

```

        GOTO 3157
3155 LOCATE M - 3, 20: PRINT USING U30$; GL(M, 1)
3157 NEXT M
3160 CLOSE #1
        RETURN
' Lectura Lamina 2
3200 FOR M = 1 TO 24
        IF EOF(1) THEN 3220
        INPUT #1, M, GL2, CL2$, CM$
        GL(M, 2) = GL2: CLAVE$(M, 2) = CL2$: CLVM$(C, MW) = CM$
        IF M > 12 THEN GOTO 3215
        LOCATE 9 + M, 9: PRINT USING U30$; GL(M, 2)
        GOTO 3217
3215 LOCATE M - 3, 24: PRINT USING U30$; GL(M, 2)
3217 NEXT M
3220 CLOSE #1
        RETURN
' Lectura Lamina 3
3250 FOR M = 1 TO 24
        IF EOF(1) THEN 3280
        INPUT #1, M, GL3, CL3$, CM$
        GL(M, 3) = GL3: CLAVE$(M, 3) = CL3$: CLVM$(C, MW) = CM$
        IF M > 12 THEN GOTO 3275
        LOCATE 9 + M, 13: PRINT USING U30$; GL(M, 3)
        GOTO 3277
3275 LOCATE M - 3, 28: PRINT USING U30$; GL(M, 3)
3277 NEXT M
3280 CLOSE #1
        RETURN
' RECUADRO
3300 LOCATE 5, 1: PRINT "
LOCATE 6, 1: PRINT "
LOCATE 7, 1: PRINT "
LOCATE 8, 1: PRINT "
LOCATE 9, 1: PRINT "
LOCATE 10, 1: PRINT "
LOCATE 9, 2: PRINT USING U20$; MW
LOCATE 9, 6: PRINT USING U20$; GL(MW, 1)
LOCATE 9, 10: PRINT USING U20$; GL(MW, 2)
LOCATE 9, 14: PRINT USING U20$; GL(MW, 3)
        RETURN
3500 ' CABECERA EJE 1° y 2°
        COLOR 7, 1: FOR LIN = 22 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
        COLOR 7, 0: FOR LIN = 4 TO 11: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(34): NEXT LIN
        COLOR 1, 3
        GOSUB 3300
3580 COLOR 7, 1
        RETURN
3600 ' ENTRADA I 1, E 1
        COLOR 10, 0: LOCATE 25, 1
        PRINT "Para corregir una entrada, entre -R- en la siguiente";
        COLOR 7, 1: LOCATE 14, 1: PRINT 1
3602 LOCATE 14, 6: INPUT "", D1W$
        IF D1W$ = "T" OR D1W$ = "t" THEN GOTO 3610
        IF D1W$ = "0" THEN GOTO 3605
        D11 = VAL(D1W$): IF D11 = 0 OR D11 > 360 THEN GOTO 3606 ELSE GOTO 3608

```

```
3605 D11 = 0: GOTO 3608
3606 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
3607 LOCATE 14, 6: PRINT " "; TAB(13); " "
      GOTO 3602
3608 LOCATE 14, 6: PRINT USING U30$; D11
      GOTO 3620
3610 CLS : COLOR 7, 0: GOTO 400
3620 LOCATE 14, 13: INPUT "", B1W$
      IF B1W$ = "R" THEN GOTO 3607
      IF B1W$ = "0" THEN GOTO 3621
      B11 = VAL(B1W$): IF B11 = 0 OR B11 > 90 THEN GOTO 3622 ELSE GOTO 3625
3621 B11 = 0: GOTO 3625
3622 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
3623 LOCATE 14, 13: PRINT " "; TAB(18); " "
      GOTO 3620
3625 LOCATE 14, 13: PRINT USING U30$; B11
3630 LOCATE 14, 19: INPUT "", C1W$
      IF C1W$ = "R" THEN GOTO 3623
      C11$ = LEFT$(C1W$, 1): IF C11$ = "D" OR C11$ = "I" THEN GOTO 3635
3632 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 14, 18: PRINT " "; TAB(24); " "
      GOTO 3630
3635 LOCATE 14, 19: PRINT C11$
      LOCATE 14, 24: INPUT "", E1W$
      IF E1W$ = "R" THEN GOTO 3632
      E11$ = LEFT$(E1W$, 1)
      IF E11$ = "X" OR E11$ = "Y" OR E11$ = "Z" THEN GOTO 3645
3640 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 14, 18: PRINT " "; TAB(24); " "
      GOTO 3635
3645 LOCATE 14, 24: PRINT E11$
      RETURN
3650 ' ENTRADA I 1, E 2
      LOCATE 15, 1: PRINT 2
3652 LOCATE 15, 6: INPUT "", D2W$
      IF D2W$ = "T" THEN GOTO 3660
      IF D2W$ = "0" THEN GOTO 3655
      D12 = VAL(D2W$): IF D12 = 0 OR D12 > 360 THEN GOTO 3656 ELSE GOTO 3658
3655 D12 = 0: GOTO 3658
3656 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
3657 LOCATE 15, 6: PRINT " "; TAB(13); " "
      GOTO 3652
3658 LOCATE 15, 6: PRINT USING U30$; D12
      GOTO 3670
3660 CLS : COLOR 7, 0: GOTO 400
3670 LOCATE 15, 10: INPUT " ", B2W$
      IF B2W$ = "R" THEN GOTO 3657
      IF B2W$ = "0" THEN GOTO 3671
      B12 = VAL(B2W$): IF B12 = 0 OR B12 > 90 THEN GOTO 3672 ELSE GOTO 3675
3671 B12 = 0: GOTO 3675
3672 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
3673 LOCATE 15, 13: PRINT " "; TAB(18); " "
      GOTO 3670
3675 LOCATE 15, 13: PRINT USING U30$; B12
3680 LOCATE 15, 19: INPUT "", C2W$
      IF C2W$ = "R" THEN GOTO 3673
      C12$ = LEFT$(C2W$, 1): IF C12$ = "D" OR C12$ = "I" THEN GOTO 3683
3682 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 15, 18: PRINT " "; TAB(24); " "
```

```

        GOTO 3680
3683 LOCATE 15, 19: PRINT C12$
3685 LOCATE 15, 24: INPUT "", E2W$
        IF E2W$ = "R" THEN GOTO 3682
        E12$ = LEFT$(E2W$, 1): IF E12$ = E11$ THEN GOTO 3690
        IF E12$ = "X" OR E12$ = "Y" OR E12$ = "Z" THEN GOTO 3695
3690 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 15, 24: PRINT " ": GOTO 3685
3695 LOCATE 15, 24: PRINT E12$
        RETURN
3700 ' ENTRADA I 2, E 1
        LOCATE 18, 1: PRINT 1
3702 LOCATE 18, 6: INPUT "", D4W$
        IF D4W$ = "T" THEN GOTO 3710
        IF D4W$ = "0" THEN GOTO 3705
        D21 = VAL(D4W$): IF D21 = 0 OR D21 > 360 THEN GOTO 3706 ELSE GOTO 3708
3705 D21 = 0: GOTO 3708
3706 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
3707 LOCATE 18, 6: PRINT " "; TAB(13); " "
        GOTO 3702
3708 LOCATE 18, 6: PRINT USING U30$; D21
        GOTO 3720
3710 CLS : COLOR 7, 0: GOTO 400
3720 LOCATE 18, 13: INPUT "", B4W$
        IF B4W$ = "R" THEN GOTO 3707
        IF B4W$ = "0" THEN GOTO 3721
        B21 = VAL(B4W$): IF B21 = 0 OR B21 > 90 THEN GOTO 3722 ELSE GOTO 3725
3721 B21 = 0: GOTO 3725
3722 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
3723 LOCATE 18, 13: PRINT " "; TAB(18); " "
        GOTO 3720
3725 LOCATE 18, 13: PRINT USING U30$; B21
3730 LOCATE 18, 19: INPUT "", C4W$
        IF C4W$ = "R" THEN GOTO 3723
        C21$ = LEFT$(C4W$, 1): IF C21$ = "D" OR C21$ = "T" THEN GOTO 3733
3732 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 18, 18: PRINT " "; TAB(24); " "
        GOTO 3730
3733 LOCATE 18, 19: PRINT C21$
3735 LOCATE 18, 24: INPUT "", E4W$
        IF E4W$ = "R" THEN GOTO 3732
        E21$ = LEFT$(E4W$, 1)
        IF E21$ = "X" OR E21$ = "Y" OR E21$ = "Z" THEN GOTO 3740
3737 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 18, 24: PRINT " ": GOTO 3735
3740 LOCATE 18, 24: PRINT E21$
        RETURN
3750 ' ENTRADA I 2, E 2
        LOCATE 19, 1: PRINT 2
3752 LOCATE 19, 6: INPUT "", D5W$
        IF D5W$ = "T" THEN GOTO 3760
        IF D5W$ = "0" THEN GOTO 3755
        D22 = VAL(D5W$): IF D22 = 0 OR D22 > 360 THEN GOTO 3756 ELSE GOTO 3758
3755 D22 = 0: GOTO 3758
3756 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
3757 LOCATE 19, 6: PRINT " "; TAB(13); " "
        GOTO 3752
3758 LOCATE 19, 6: PRINT USING U30$; D22
        GOTO 3770

```

```

3760 CLS : COLOR 7, 0: GOTO 400
3770 LOCATE 19, 13: INPUT "", B5W$
    IF B5W$ = "R" THEN GOTO 3757
    IF B5W$ = "0" THEN GOTO 3771
    B22 = VAL(B5W$): IF B22 = 0 OR B22 > 90 THEN GOTO 3772 ELSE GOTO 3775
3771 B22 = 0: GOTO 3775
3772 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
3773 LOCATE 19, 13: PRINT " "; TAB(18); " "
    GOTO 3770
' Control de coincidencias especiales que pueden plantear error
3775 IF B21 = B11 AND D21 = D11 THEN B21 = B21 + 1
    IF B22 = B12 AND D22 = D12 THEN GOTO 3777
    IF B12 <> B11 THEN GOTO 3778
    IF B21 <> B12 THEN GOTO 3778
    IF B22 <> B21 THEN GOTO 3778
3777 B22 = B22 + 1
3778 LOCATE 19, 13: PRINT USING U30$; B22
3780 LOCATE 19, 19: INPUT "", C5W$
    IF C5W$ = "R" THEN GOTO 3773
    C22$ = LEFT$(C5W$, 1): IF C22$ = "D" OR C22$ = "T" THEN GOTO 3783
3782 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 19, 18: PRINT " "; TAB(24); " "
    GOTO 3780
3783 LOCATE 19, 19: PRINT C22$
3785 LOCATE 19, 24: INPUT "", E5W$
    IF E5W$ = "R" THEN GOTO 3782
    E22$ = LEFT$(E5W$, 1): IF E22$ = "E" THEN GOTO 3787
    IF E22$ = "X" OR E22$ = "Y" OR E22$ = "Z" THEN GOTO 3790
3787 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 19, 24: PRINT " ": GOTO 3785
3790 LOCATE 19, 24: PRINT E22$
    RETURN
4000 ' Azimut y coordenadas I 1, E 1
    IF D11 >= 0 AND D11 <= 90 THEN GOTO 4010
    IF D11 >= 271 AND D11 <= 360 THEN GOTO 4015
    IF C11$ = "T" THEN A11 = 270 - D11
    IF C11$ = "D" THEN A11 = 450 - D11
    GOTO 4020
4010 IF C11$ = "T" THEN A11 = 270 - D11
    IF C11$ = "D" THEN A11 = 90 - D11
    GOTO 4020
4015 IF C11$ = "T" THEN A11 = 630 - D11
    IF C11$ = "D" THEN A11 = 450 - D11
4020 PI = 3.141592654#
    ARD11 = A11 * PI / 180: BRD11 = B11 * PI / 180
    L11 = COS(ARD11) * COS(BRD11): M11 = SIN(ARD11) * COS(BRD11)
    N11 = SIN(BRD11)
    MOD11 = SQR(L11 ^ 2 + M11 ^ 2 + N11 ^ 2)
    L11 = L11 / MOD11: M11 = M11 / MOD11: N11 = N11 / MOD11
    L11 = CINT(L11 * 10000) / 10000: M11 = CINT(M11 * 10000) / 10000
    N11 = CINT(N11 * 10000) / 10000
4030 LOCATE 14, 30
    PRINT USING U24$; L11; TAB(39); M11; TAB(48); N11
    LOCATE 14, 58: PRINT USING U40$; A11
    RETURN
4050 ' Azimut y coordenadas I 1, E 2
    IF D12 >= 0 AND D12 <= 90 THEN GOTO 4060
    IF D12 >= 271 AND D12 <= 360 THEN GOTO 4065

```

```

        IF C12$ = "I" THEN A12 = 270 - D12
        IF C12$ = "D" THEN A12 = 450 - D12
        GOTO 4070
4060 IF C12$ = "I" THEN A12 = 270 - D12
        IF C12$ = "D" THEN A12 = 90 - D12
        GOTO 4070
4065 IF C12$ = "I" THEN A12 = 630 - D12
        IF C12$ = "D" THEN A12 = 450 - D12
4070 PI = 3.141592654#
        ARD12 = A12 * PI / 180
        IF B11 = 0 AND B12 = 0 THEN GOTO 4072
        GOTO 4075
4072 B12 = 1
4075 BRD12 = B12 * PI / 180
        L12 = COS(ARD12) * COS(BRD12): M12 = SIN(ARD12) * COS(BRD12)
        N12 = SIN(BRD12)
        MOD12 = SQR(L12 ^ 2 + M12 ^ 2 + N12 ^ 2)
        L12 = L12 / MOD12: M12 = M12 / MOD12: N12 = N12 / MOD12
        L12 = CINT(L12 * 10000) / 10000: M12 = CINT(M12 * 10000) / 10000
        N12 = CINT(N12 * 10000) / 10000
4080 LOCATE 15, 30
        PRINT USING U24$: L12; TAB(39); M12; TAB(48); N12
        LOCATE 15, 58: PRINT USING U40$: A12
        RETURN
4100 ' Azimut y coordenadas I 2, E 1
        IF D21 >= 0 AND D21 <= 90 THEN GOTO 4110
        IF D21 >= 271 AND D21 <= 360 THEN GOTO 4115
        IF C21$ = "I" THEN A21 = 270 - D21
        IF C21$ = "D" THEN A21 = 450 - D21
        GOTO 4120
4110 IF C21$ = "I" THEN A21 = 270 - D21
        IF C21$ = "D" THEN A21 = 90 - D21
        GOTO 4120
4115 IF C21$ = "I" THEN A21 = 630 - D21
        IF C21$ = "D" THEN A21 = 450 - D21
4120 PI = 3.141592654#
        ARD21 = A21 * PI / 180: BRD21 = B21 * PI / 180
        L21 = COS(ARD21) * COS(BRD21): M21 = SIN(ARD21) * COS(BRD21)
        N21 = SIN(BRD21)
        MOD21 = SQR(L21 ^ 2 + M21 ^ 2 + N21 ^ 2)
        L21 = L21 / MOD21: M21 = M21 / MOD21: N21 = N21 / MOD21
        L21 = CINT(L21 * 10000) / 10000: M21 = CINT(M21 * 10000) / 10000
        N21 = CINT(N21 * 10000) / 10000
4130 LOCATE 18, 30
        PRINT USING U24$: L21; TAB(39); M21; TAB(48); N21
        LOCATE 18, 58: PRINT USING U40$: A21
        RETURN
4150 ' Azimut y coordenadas I 2, E 2
        IF D22 >= 0 AND D22 <= 90 THEN GOTO 4160
        IF D22 >= 271 AND D22 <= 360 THEN GOTO 4165
        IF C22$ = "I" THEN A22 = 270 - D22
        IF C22$ = "D" THEN A22 = 450 - D22
        GOTO 4170
4160 IF C22$ = "I" THEN A22 = 270 - D22
        IF C22$ = "D" THEN A22 = 90 - D22
        GOTO 4170

```

```

4165 IF C22$ = "I" THEN A22 = 630 - D22
      IF C22$ = "D" THEN A22 = 450 - D22
4170 PI = 3.141592654#
      ARD22 = A22 * PI / 180
      IF B21 = 0 AND B22 = 0 THEN GOTO 4172
      GOTO 4175
4172 B22 = 1
4175 BRD22 = B22 * PI / 180
      L22 = COS(ARD22) * COS(BRD22): M22 = SIN(ARD22) * COS(BRD22)
      N22 = SIN(BRD22)
      MOD22 = SQR(L22 ^ 2 + M22 ^ 2 + N22 ^ 2)
      L22 = L22 / MOD22: M22 = M22 / MOD22: N22 = N22 / MOD22
      L22 = CINT(L22 * 10000) / 10000: M22 = CINT(M22 * 10000) / 10000
      N22 = CINT(N22 * 10000) / 10000
4180 LOCATE 19, 30
      PRINT USING U24$: L22; TAB(39); M22; TAB(48); N22
      LOCATE 19, 58: PRINT USING U40$: A22
      RETURN
4400 ' PROD. ESCALAR I 1
      COSENO1 = L11 * L12 + M11 * M12 + N11 * N12
      IF COSENO1 = 0 THEN GOTO 2400
      SENO1 = SQR(1 - COSENO1 ^ 2): TANGENTE1 = SENO1 / COSENO1
      ANGULO1 = ATN(TANGENTE1): ANG1 = CSNG(ANGULO1 * 180 / PI)
      LOCATE 15, 73: PRINT USING U32$: ANG1
      RETURN
4450 ' PROD. ESCALAR I 2
      COSENO2 = L21 * L22 + M21 * M22 + N21 * N22
      IF COSENO2 = 0 THEN GOTO 2400
      SENO2 = SQR(1 - COSENO2 ^ 2): TANGENTE2 = SENO2 / COSENO2
      ANGULO2 = ATN(TANGENTE2): ANG2 = CSNG(ANGULO2 * 180 / PI)
      LOCATE 19, 73: PRINT USING U32$: ANG2
      RETURN
4500 ' COORD. EJE 3°, I 1
      IF E11$ = "X" AND E12$ = "Y" THEN GOTO 4510
      IF E11$ = "Y" AND E12$ = "X" THEN GOTO 4510
      IF E11$ = "X" AND E12$ = "Z" THEN GOTO 4515
      IF E11$ = "Z" AND E12$ = "X" THEN GOTO 4515
      IF E11$ = "Y" AND E12$ = "Z" THEN GOTO 4520
      IF E11$ = "Z" AND E12$ = "Y" THEN GOTO 4520
4510 E13$ = "Z": GOTO 4530
4515 E13$ = "Y": GOTO 4530
4520 E13$ = "X"
4530 L13 = M11 * N12 - N11 * M12
      M13 = N11 * L12 - L11 * N12
      N13 = L11 * M12 - M11 * L12
      IF N13 >= 0 THEN GOTO 4540
      L13 = -L13: M13 = -M13: N13 = -N13
4540 MOD13 = SQR((L13) ^ 2 + (M13) ^ 2 + (N13) ^ 2)
      L13 = L13 / MOD13: M13 = M13 / MOD13: N13 = N13 / MOD13
      L13 = CINT(L13 * 10000) / 10000: M13 = CINT(M13 * 10000) / 10000
      N13 = CINT(N13 * 10000) / 10000
      L3 = L13: M3 = M13: N3 = N13
4550 GOSUB 5700
      A13 = A3: B13 = B3
      LOCATE 16, 13: PRINT USING U30$: B13
      LOCATE 16, 24: PRINT E13$: TAB(30); USING U24$: L13

```



```

LOCATE 16, 39: PRINT USING U24$; M13
LOCATE 16, 48: PRINT USING U24$; N13
LOCATE 16, 58: PRINT USING U40$; A13
LOCATE 16, 66: PRINT USING U24$; MOD13
RETURN
4600 ' COORD. EJE 3º, I 2
IF E21$ = "X" AND E22$ = "Y" THEN GOTO 4610
IF E21$ = "Y" AND E22$ = "X" THEN GOTO 4610
IF E21$ = "X" AND E22$ = "Z" THEN GOTO 4615
IF E21$ = "Z" AND E22$ = "X" THEN GOTO 4615
IF E21$ = "Y" AND E22$ = "Z" THEN GOTO 4620
IF E21$ = "Z" AND E22$ = "Y" THEN GOTO 4620
4610 E23$ = "Z": GOTO 4630
4615 E23$ = "Y": GOTO 4630
4620 E23$ = "X"
4630 L23 = M21 * N22 - N21 * M22
M23 = N21 * L22 - L21 * N22
N23 = L21 * M22 - M21 * L22
IF N23 >= 0 THEN GOTO 4640
L23 = -L23: M23 = -M23: N23 = -N23
4640 MOD23 = SQR(L23 ^ 2 + M23 ^ 2 + N23 ^ 2)
L23 = L23 / MOD23: M23 = M23 / MOD23: N23 = N23 / MOD23
L23 = CINT(L23 * 10000) / 10000: M23 = CINT(M23 * 10000) / 10000
N23 = CINT(N23 * 10000) / 10000
' Az. y Dir. I 2, Eje 3º
L3 = L23: M3 = M23: N3 = N23
4650 GOSUB 5700
A23 = A3: B23 = B3
LOCATE 20, 13: PRINT USING U30$; B23
LOCATE 20, 24: PRINT E23$; TAB(30); USING U24$; L23
LOCATE 20, 39: PRINT USING U24$; M23
LOCATE 20, 48: PRINT USING U24$; N23
LOCATE 20, 58: PRINT USING U40$; A23
LOCATE 20, 66: PRINT USING U24$; MOD23
4680 RETURN
' Puesta a 0 de Variables
5000 V$ = SPACE$(14)
FOR M = 1 TO 24
GL(M, 1) = 0: GL(M, 2) = 0: GL(M, 3) = 0
NTG(M) = 0
CLAVE$(M, 1) = V$: CLAVE$(M, 2) = V$: CLAVE$(M, 2) = V$
NEXT M
RETURN
' REORDENAMIENTO Ejes
5010 IF E11$ = "X" THEN GOTO 5020
IF E11$ = "Y" THEN GOTO 5035
IF E11$ = "Z" THEN GOTO 5050
5020 LR11 = L11: MR11 = M11: NR11 = N11
AR11 = A11: BR11 = B11: CR11$ = C11$: DR11 = D11: ER11$ = E11$
GOTO 5080
5035 LR12 = L11: MR12 = M11: NR12 = N11
AR12 = A11: BR12 = B11: CR12$ = C11$: DR12 = D11: ER12$ = E11$
GOTO 5080
5050 LR13 = L11: MR13 = M11: NR13 = N11
AR13 = A11: BR13 = B11: CR13$ = C11$: DR13 = D11: ER13$ = E11$
5080 IF E12$ = "X" THEN GOTO 5100

```

```

      IF E12$ = "Y" THEN GOTO 5115
      IF E12$ = "Z" THEN GOTO 5130
5100  LR11 = L12: MR11 = M12: NR11 = N12
      AR11 = A12: BR11 = B12: CR11$ = C12$: DR11 = D12: ER11$ = E12$
      GOTO 5150
5115  LR12 = L12: MR12 = M12: NR12 = N12
      AR12 = A12: BR12 = B12: CR12$ = C12$: DR12 = D12: ER12$ = E12$
      GOTO 5150
5130  LR13 = L12: MR13 = M12: NR13 = N12
      AR13 = A12: BR13 = B12: CR13$ = C12$: DR13 = D12: ER13$ = E12$
5150  IF E13$ = "X" THEN GOTO 5170
      IF E13$ = "Y" THEN GOTO 5180
      IF E13$ = "Z" THEN GOTO 5190
5170  LR11 = L13: MR11 = M13: NR11 = N13: AR11 = A13: BR11 = B13
      CR11$ = " ": DR11 = 0: ER11$ = E13$: GOTO 5200
5180  LR12 = L13: MR12 = M13: NR12 = N13: AR12 = A13: BR12 = B13
      CR12$ = " ": DR12 = 0: ER12$ = E13$: GOTO 5200
5190  LR13 = L13: MR13 = M13: NR13 = N13: AR13 = A13: BR13 = B13
      CR13$ = " ": DR13 = 0: ER13$ = E13$
5200  IF E21$ = "X" THEN GOTO 5220
      IF E21$ = "Y" THEN GOTO 5235
      IF E21$ = "Z" THEN GOTO 5250
5220  LR21 = L21: MR21 = M21: NR21 = N21
      AR21 = A21: BR21 = B21: CR21$ = C21$: DR21 = D21: ER21$ = E21$
      GOTO 5280
5235  LR22 = L21: MR22 = M21: NR22 = N21
      AR22 = A21: BR22 = B21: CR22$ = C21$: DR22 = D21: ER22$ = E21$
      GOTO 5280
5250  LR23 = L21: MR23 = M21: NR23 = N21
      AR23 = A21: BR23 = B21: CR23$ = C21$: DR23 = D21: ER23$ = E21$
5280  IF E22$ = "X" THEN GOTO 5300
      IF E22$ = "Y" THEN GOTO 5315
      IF E22$ = "Z" THEN GOTO 5330
5300  LR21 = L22: MR21 = M22: NR21 = N22
      AR21 = A22: BR21 = B22: CR21$ = C22$: DR21 = D22: ER21$ = E22$
      GOTO 5350
5315  LR22 = L22: MR22 = M22: NR22 = N22
      AR22 = A22: BR22 = B22: CR22$ = C22$: DR22 = D22: ER22$ = E22$
      GOTO 5350
5330  LR23 = L22: MR23 = M22: NR23 = N22
      AR23 = A22: BR23 = B22: CR23$ = C22$: DR23 = D22: ER23$ = E22$
5350  IF E23$ = "X" THEN GOTO 5370
      IF E23$ = "Y" THEN GOTO 5380
      IF E23$ = "Z" THEN GOTO 5390
5370  LR21 = L23: MR21 = M23: NR21 = N23: AR21 = A23: BR21 = B23
      CR21$ = " ": DR21 = 0: ER21$ = E23$
      GOTO 5395
5380  LR22 = L23: MR22 = M23: NR22 = N23: AR22 = A23: BR22 = B23
      CR22$ = " ": DR22 = 0: ER22$ = E23$
      GOTO 5395
5390  LR23 = L23: MR23 = M23: NR23 = N23: AR23 = A23: BR23 = B23
      CR23$ = " ": DR23 = 0: ER23$ = E23$
5395  RETURN
5700  ' Azimet EJE 3° y E.H.
      IF N3 > .9999# THEN GOTO 5715 ELSE GOTO 5730
5715  BR3 = PI / 2

```

```

A3 = 0: GOTO 5740
5730 BR3 = ATN(N3 / SQR(1 - N3 ^ 2))
5740 B3 = CINT(BR3 * 180 / PI)
      K = M3 / L3: DR3 = ATN(K): D3 = DR3 * 180 / PI
      IF L3 >= 0 AND M3 >= 0 THEN GOTO 5800
      IF L3 < 0 AND M3 >= 0 THEN GOTO 5805
      IF L3 <= 0 AND M3 < 0 THEN GOTO 5805
      IF L3 > 0 AND M3 < 0 THEN GOTO 5810
5800 A3 = D3: GOTO 5870
5805 A3 = 180 + D3: GOTO 5870
5810 A3 = 360 + D3
5870 AH = A3: BH = B3
      A3 = CINT(A3): B3 = CINT(B3): AH = CINT(AH): BH = CINT(BH)
      RETURN
6000 ' ROTACIONES E.H.
      CLS
      PI = 3.14116
      DIM DR(20), BZ(20), AN(4, 13, 20), AM(4, 13), PR(4)
      DIM A(20), AR(4), QR(4), AZI(16), BUZ(16), QM(16), MEN(13)
      DIM CLP(13), CMP(13), CNP(13), PLN$(13), PLAN$(4), PCN(20), PCNOR(20)
      DIM LL(13), MM(13), NN(13), PW$(16)
      DIM KM(13), KR(4)
      D$ = MID$(DATE$, 4, 2): M$ = LEFT$(DATE$, 2): AN$ = RIGHT$(DATE$, 2)
      DATE1$ = D$ + "-" + M$ + "-" + AN$: PRINT TAB(60); DATE1$
      RESTORE 6020
      CORTE$(1) = "Almonaster": CORTE$(2) = "Veredas": CORTE$(3) = "Aracena"
      FOR P = 1 TO 13: READ PLN$(P): NEXT P
6020 DATA " (001) Kb", " (010) AcIPl", " (100) Ala", "(100) Ab-Ala"
      DATA "Á(001) Ab-Kb", " (010) Ab", " (001) Maneb", " (021) Bno.D"
      DATA " (0-21) Bno.I", " (100)", " (110)", " (1-10)", " (-201)"
      ' % Anortita
      FOR Q = 1 TO 20: READ PCN(Q): NEXT Q
      DATA 0, 2.5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65
      DATA 70, 75, 80, 85, 90, 92.5
      L11 = LR11: M11 = MR11: N11 = NR11: L12 = LR12: M12 = MR12: N12 = NR12
      L13 = LR13: M13 = MR13: N13 = NR13
      CL11 = L11: CM11 = M11: CN11 = N11: CL12 = L12: CM12 = M12: CN12 = N12
      CL13 = L13: CM13 = M13: CN13 = N13
      APAEH = ANG
      CLS
      IF APAEH >= 0 AND APAEH <= 45 THEN GOTO 6030 ELSE GOTO 6040
6030 P1 = 6: P2 = 9: GOTO 6100
6040 P1 = 1: P2 = 5
6100 ' POSICION 1
      LH1 = L11 * LH + L12 * MH + L13 * NH
      MH1 = (-N11 * LH) + (-N12 * MH) + (-N13 * NH)
      NH1 = M11 * LH + M12 * MH + M13 * NH
      IF NH1 > 0 THEN GOTO 6101 ELSE 6102
6101 LH1 = -LH1: MH1 = -MH1: NH1 = -NH1
6102 MODU1 = SQR(LH1 ^ 2 + MH1 ^ 2 + NH1 ^ 2)
      LH1 = LH1 / MODU1: MH1 = MH1 / MODU1: NH1 = NH1 / MODU1
      LH1 = CINT(LH1 * 10000) / 10000: MH1 = CINT(MH1 * 10000) / 10000
      NH1 = CINT(NH1 * 10000) / 10000
      R = 1
      FOR P = P1 TO P2
      FOR Q = 1 TO 20: READ DR(Q): NEXT Q

```

```

FOR Q = 1 TO 20: READ BZ(Q): NEXT Q
6110 FOR Q = 1 TO 20
    DA = DR(Q) * PI / 180
    BA = BZ(Q) * PI / 180
    L1 = COS(DA) * COS(BA): M1 = SIN(DA) * COS(BA): N1 = -SIN(BA)
    MOD1 = SQR(L1 ^ 2 + M1 ^ 2 + N1 ^ 2)
    L1 = L1 / MOD1: M1 = M1 / MOD1: N1 = N1 / MOD1
    A1 = LH1 * L1 + MH1 * M1 + NH1 * N1
    IF A1 > .9999# THEN GOTO 6111 ELSE GOTO 6112
6111 A(Q) = 0: GOTO 6115
6112 A(Q) = (ATN(A1 / SQR(1 - A1 ^ 2)) + PI / 2) * 180 / PI
    IF A(Q) > 90 THEN A(Q) = 180 - A(Q)
    AN(R, P, Q) = A(Q)
6115 IF Q > 1 THEN GOTO 6120
    ME = A(1): Q1 = 1
    GOTO 6130
6120 IF A(Q) > ME THEN GOTO 6130
    ME = A(Q): Q1 = Q
6130 NEXT Q
    MEN(P) = ME: AM(R, P) = ME: QM(P) = Q1
    NEXT P
' Ang menor Pos. 1
FOR P = P1 TO P2
    IF P > P1 THEN GOTO 6140
    MENOR = MEN(P1): PMEN = P1: QMEN = QM(P1)
    GOTO 6150
6140 IF MEN(P) > MENOR THEN GOTO 6150
    MENOR = MEN(P): PMEN = P: QMEN = QM(P)
6150 NEXT P
    AR(1) = MENOR: PR(1) = PMEN: PR1 = PMEN: QR(1) = QMEN: QR1 = QMEN
' Present Pantalla - POS 1
    IF PANT$ = "6" THEN GOTO 6190 ELSE GOTO 6200
6190 CLS
6195 GOSUB 6600
    LOCATE 23, 1: INPUT "", YY$
6200 ' POSICION 2
    RESTORE 7610
    LH2 = (-L11 * LH) + (-L12 * MH) + (-L13 * NH)
    MH2 = (-N11 * LH) + (-N12 * MH) + (-N13 * NH)
    NH2 = (-M11 * LH) + (-M12 * MH) + (-M13 * NH)
    IF NH2 > 0 THEN GOTO 6201 ELSE 6202
6201 LH2 = -LH2: MH2 = -MH2: NH2 = -NH2
6202 MODU2 = SQR(LH2 ^ 2 + MH2 ^ 2 + NH2 ^ 2)
    LH2 = LH2 / MODU2: MH2 = MH2 / MODU2: NH2 = NH2 / MODU2
    LH2 = CINT(LH2 * 10000) / 10000: MH2 = CINT(MH2 * 10000) / 10000
    NH2 = CINT(NH2 * 10000) / 10000
    R = 2
    FOR P = P1 TO P2
        FOR Q = 1 TO 20: READ DR(Q): NEXT Q
        FOR Q = 1 TO 20: READ BZ(Q): NEXT Q
6210 FOR Q = 1 TO 20
            DA = DR(Q) * PI / 180
            BA = BZ(Q) * PI / 180
            L2 = COS(DA) * COS(BA): M2 = SIN(DA) * COS(BA): N2 = -SIN(BA)
            MOD2 = SQR(L2 ^ 2 + M2 ^ 2 + N2 ^ 2)
            L2 = L2 / MOD2: M2 = M2 / MOD2: N2 = N2 / MOD2

```

```

    A1 = LH2 * L2 + MH2 * M2 + NH2 * N2
    IF A1 > .9999# THEN GOTO 6211 ELSE GOTO 6212
6211 A(Q) = 0: GOTO 6215
6212 A(Q) = (ATN(A1 / SQR(1 - A1 ^ 2)) + PI / 2) * 180 / PI
    IF A(Q) > 90 THEN A(Q) = 180 - A(Q)
    AN(R, P, Q) = A(Q)
6215 IF Q > 1 THEN GOTO 6220
    ME = A(1): Q1 = 1
    GOTO 6230
6220 IF A(Q) > ME THEN GOTO 6230
    ME = A(Q): Q1 = Q
6230 NEXT Q
    MEN(P) = ME: AM(R, P) = ME: QM(P) = Q1
    NEXT P
' Ang menor Pos. 2
FOR P = P1 TO P2
    IF P > P1 THEN GOTO 6240
    MENOR = MEN(P1): PMEN = P1: QMEN = QM(P1)
    GOTO 6250
6240 IF MEN(P) > MENOR THEN GOTO 6250
    MENOR = MEN(P): PMEN = P: QMEN = QM(P)
6250 NEXT P
    AR(2) = MENOR: PR(2) = PMEN: PR2 = PMEN: QR(2) = QMEN: QR2 = QMEN
' Present Pantalla - POS 2
    IF PANT$ = "6" THEN GOTO 6290 ELSE GOTO 6300
6290 CLS
6295 GOSUB 6600
    LOCATE 23, 1: INPUT "", YY$
6300 ' POSICION 3
    RESTORE 7610
    LH3 = L11 * LH + L12 * MH + L13 * NH
    MH3 = N11 * LH + N12 * MH + N13 * NH
    NH3 = (-M11 * LH) + (-M12 * MH) + (-M13 * NH)
    IF NH3 > 0 THEN GOTO 6301 ELSE 6302
6301 LH3 = -LH3: MH3 = -MH3: NH3 = -NH3
6302 MODU3 = SQR(LH3 ^ 2 + MH3 ^ 2 + NH3 ^ 2)
    LH3 = LH3 / MODU3: MH3 = MH3 / MODU3: NH3 = NH3 / MODU3
    LH3 = CINT(LH3 * 10000) / 10000: MH3 = CINT(MH3 * 10000) / 10000
    NH3 = CINT(NH3 * 10000) / 10000
    R = 3
    FOR P = P1 TO P2
        FOR Q = 1 TO 20: READ DR(Q): NEXT Q
        FOR Q = 1 TO 20: READ BZ(Q): NEXT Q
6310 FOR Q = 1 TO 20
            DA = DR(Q) * PI / 180
            BA = BZ(Q) * PI / 180
            L3 = COS(DA) * COS(BA): M3 = SIN(DA) * COS(BA): N3 = -SIN(BA)
            MOD3 = SQR(L3 ^ 2 + M3 ^ 2 + N3 ^ 2)
            L3 = L3 / MOD3: M3 = M3 / MOD3: N3 = N3 / MOD3
            A1 = LH3 * L3 + MH3 * M3 + NH3 * N3
            IF A1 > .9999# THEN GOTO 6311 ELSE GOTO 6312
6311 A(Q) = 0: GOTO 6315
6312 A(Q) = (ATN(A1 / SQR(1 - A1 ^ 2)) + PI / 2) * 180 / PI
            IF A(Q) > 90 THEN A(Q) = 180 - A(Q)
            AN(R, P, Q) = A(Q)
6315 IF Q > 1 THEN GOTO 6320

```

```

    ME = A(1): Q1 = 1
    GOTO 6330
6320 IF A(Q) > ME THEN GOTO 6330
    ME = A(Q): Q1 = Q
6330 NEXT Q
    MEN(P) = ME: AM(R, P) = ME: QM(P) = Q1
    NEXT P
    ' Ang menor Pos 3
    FOR P = P1 TO P2
    IF P > P1 THEN GOTO 6340
    MENOR = MEN(P1): PMEN = P1: QMEN = QM(P1)
    GOTO 6350
6340 IF MEN(P) > MENOR THEN GOTO 6350
    MENOR = MEN(P): PMEN = P: QMEN = QM(P)
6350 NEXT P
    AR(3) = MENOR: PR(3) = PMEN: PR3 = PMEN: QR(3) = QMEN: QR3 = QMEN
    ' Present Pantalla - POS 3
    IF PANT$ = "6" THEN GOTO 6390 ELSE GOTO 6400
6390 CLS
6395 GOSUB 6600
    LOCATE 23, 1: INPUT "", YY$
6400 ' POSICION 4
    RESTORE 7610
    LH4 = (-L11 * LH) + (-L12 * MH) + (-L13 * NH)
    MH4 = N11 * LH + N12 * MH + N13 * NH
    NH4 = M11 * LH + M12 * MH + M13 * NH
    IF NH4 > 0 THEN GOTO 6401 ELSE 6402
6401 LH4 = -LH4: MH4 = -MH4: NH4 = -NH4
6402 MODU4 = SQR(LH4 ^ 2 + MH4 ^ 2 + NH4 ^ 2)
    LH4 = LH4 / MODU4: MH4 = MH4 / MODU4: NH4 = NH4 / MODU4
    LH4 = CINT(LH4 * 10000) / 10000: MH4 = CINT(MH4 * 10000) / 10000
    NH4 = CINT(NH4 * 10000) / 10000
    R = 4
    FOR P = P1 TO P2
    FOR Q = 1 TO 20: READ DR(Q): NEXT Q
    FOR Q = 1 TO 20: READ BZ(Q): NEXT Q
6410 FOR Q = 1 TO 20
    DA = DR(Q) * PI / 180
    BA = BZ(Q) * PI / 180
    L4 = COS(DA) * COS(BA): M4 = SIN(DA) * COS(BA): N4 = -SIN(BA)
    MOD4 = SQR(L4 ^ 2 + M4 ^ 2 + N4 ^ 2)
    L4 = L4 / MOD4: M4 = M4 / MOD4: N4 = N4 / MOD4
    A1 = LH4 * L4 + MH4 * M4 + NH4 * N4
    IF A1 > .9999# THEN GOTO 6411 ELSE GOTO 6412
6411 A(Q) = 0: GOTO 6415
6412 A(Q) = (ATN(A1 / SQR(1 - A1 ^ 2)) + PI / 2) * 180 / PI
    IF A(Q) > 90 THEN A(Q) = 180 - A(Q)
    AN(R, P, Q) = A(Q)
6415 IF Q > 1 THEN GOTO 6420
    ME = A(1): Q1 = 1
    GOTO 6430
6420 IF A(Q) > ME THEN GOTO 6430
    ME = A(Q): Q1 = Q
6430 NEXT Q
    MEN(P) = ME: AM(R, P) = ME: QM(P) = Q1
    NEXT P

```

```

' Ang menor Pos 4
FOR P = P1 TO P2
IF P > P1 THEN GOTO 6440
MENOR = MEN(P1): PMEN = P1: QMEN = QM(P1)
GOTO 6450
6440 IF MEN(P) > MENOR THEN GOTO 6450
MENOR = MEN(P): PMEN = P: QMEN = QM(P)
6450 NEXT P
AR(4) = MENOR: PR(4) = PMEN: PR4 = PMEN: QR(4) = QMEN: QR4 = QMEN
' Present Pantalla - POS 4
IF PANT$ = "6" THEN GOTO 6455 ELSE GOTO 6460
6455 CLS
GOSUB 6600
' ANG MENOR FINAL
' PR = nº Plano Ang menor (1 a 13)
6460 FOR R = 1 TO 4
IF R > 1 THEN GOTO 6480
ANGM = AR(1): POSIC = R: QRM = QR(1): PR = PR(1)
GOTO 6490
6480 IF AR(R) > ANGM THEN GOTO 6490
ANGM = AR(R): POSIC = R: QRM = QR(R): PR = PR(R)
6490 NEXT R
PLANO$ = PLN$(PR): PNORTITA = PCN(QRM)
IF PANT$ = "6" THEN GOTO 6500 ELSE GOTO 6890
6500 COLOR 15, 1: LOCATE 25, 1: PRINT SPACE$(47);
LOCATE 25, 2: PRINT " Ang. menor final:"; USING U32$; ANGM;
LOCATE 25, 30: PRINT "- "; "POSIC."; POSIC; " - "; PLANO$; " - "; "An"; PNORTITA; " ";
PRINT "Q: "; QRM;
COLOR 7, 0: LOCATE 23, 1: INPUT "", YY$
GOTO 6900
6600 ' PRESENT PANTALLA
COLOR 7, 0: CLS
COLOR 15, 0
LOCATE 1, 1: PRINT CLAV$; TAB(15); "Grano "; G; TAB(32); "Posicion "; R; TAB(55); "Ang. PA/EH:"; APAEH
LOCATE 2, 5: PRINT "Kb"; TAB(10); "Acl-Pcl"; TAB(22); "Ala"; TAB(29); "Ab-Ala";
LOCATE 2, 38: PRINT "Ab-Kb"; TAB(49); "Ab"; TAB(56); "Maneb"; TAB(65); "Bno.D"; TAB(74); "Bno.I"
COLOR 7, 0
FOR Q = 1 TO 20
IF APAEH >= 0 AND APAEH <= 45 THEN GOTO 6610 ELSE GOTO 6620
6610 LOCATE Q + 2, 46: PRINT USING U32$; AN(R, 6, Q); TAB(55); AN(R, 7, Q);
PRINT USING U32$; TAB(64); AN(R, 8, Q); TAB(73); AN(R, 9, Q)
GOTO 6630
6620 LOCATE Q + 2, 1: PRINT USING U32$; AN(R, 1, Q); TAB(10); AN(R, 2, Q);
PRINT USING U32$; TAB(19); AN(R, 3, Q); TAB(28); AN(R, 4, Q);
PRINT USING U32$; TAB(37); AN(R, 5, Q)
6630 NEXT Q
COLOR 9, 0
IF APAEH >= 0 AND APAEH <= 45 THEN GOTO 6640 ELSE GOTO 6650
6640 LOCATE 23, 46: PRINT USING U32$; AM(R, 6); TAB(55); AM(R, 7);
PRINT USING U32$; TAB(64); AM(R, 8); TAB(73); AM(R, 9)
GOTO 6660
6650 LOCATE 23, 1: PRINT USING U32$; AM(R, 1); TAB(10); AM(R, 2); TAB(19); AM(R, 3);
LOCATE 23, 28: PRINT USING U32$; AM(R, 4); TAB(37); AM(R, 5);
6660 COLOR 15, 0: LOCATE 24, 3: PRINT "Ang. menor Posic."; R; "=";
LOCATE 24, 23: PRINT USING U32$; AR(R);
COLOR 7, 0
RETURN

```

```

6890 IF PANT$ = "2" THEN GOTO 6900 ELSE GOTO 6905
' PRESENT PANTALLA DATOS obtenidos. Pant 5
6900 CLS : COLOR 7, 0
LOCATE 1, 1: PRINT "┌"; STRING$(78, 205); "┐"
LOCATE 2, 1: PRINT "├"; TAB(80); "┤"
LOCATE 3, 1: PRINT "└"; STRING$(78, 205); "┘"
LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
FOR LIN = 4 TO 25: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80); : NEXT LIN
COLOR 15, 0
LOCATE 2, 3
PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
COLOR 15, 1
LOCATE 4, 1: PRINT " C. CARTESIANAS de E.H. ROTADO y PLANOS de BURRI "
FOR LIN = 6 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(51): NEXT LIN
LOCATE 6, 6: PRINT "EH1"
LOCATE 7, 6: PRINT "EH2"
LOCATE 8, 6: PRINT "EH3"
LOCATE 9, 6: PRINT "EH4"
FOR J = 1 TO 13: LOCATE J + 10, 4: PRINT PLN$(J): NEXT J
COLOR 7, 1
LOCATE 6, 19: PRINT USING U43$; LH1; TAB(30); MH1; TAB(42); NH1
LOCATE 7, 19: PRINT USING U43$; LH2; TAB(30); MH2; TAB(42); NH2
LOCATE 8, 19: PRINT USING U43$; LH3; TAB(30); MH3; TAB(42); NH3
LOCATE 9, 19: PRINT USING U43$; LH4; TAB(30); MH4; TAB(42); NH4
6902 GOSUB 7400
LOCATE 11, 19: PRINT USING U43$; CLP(1); TAB(30); CMP(1); TAB(42); CNP(1)
LOCATE 12, 19: PRINT USING U43$; CLP(2); TAB(30); CMP(2); TAB(42); CNP(2)
LOCATE 13, 19: PRINT USING U43$; CLP(3); TAB(30); CMP(3); TAB(42); CNP(3)
LOCATE 14, 19: PRINT USING U43$; CLP(4); TAB(30); CMP(4); TAB(42); CNP(4)
LOCATE 15, 19: PRINT USING U43$; CLP(5); TAB(30); CMP(5); TAB(42); CNP(5)
LOCATE 16, 19: PRINT USING U43$; CLP(6); TAB(30); CMP(6); TAB(42); CNP(6)
LOCATE 17, 19: PRINT USING U43$; CLP(7); TAB(30); CMP(7); TAB(42); CNP(7)
LOCATE 18, 19: PRINT USING U43$; CLP(8); TAB(30); CMP(8); TAB(42); CNP(8)
LOCATE 19, 19: PRINT USING U43$; CLP(9); TAB(30); CMP(9); TAB(42); CNP(9)
LOCATE 20, 19: PRINT USING U43$; CLP(10); TAB(30); CMP(10); TAB(42); CNP(10)
LOCATE 21, 19: PRINT USING U43$; CLP(11); TAB(30); CMP(11); TAB(42); CNP(11)
LOCATE 22, 19: PRINT USING U43$; CLP(12); TAB(30); CMP(12); TAB(42); CNP(12)
LOCATE 23, 19: PRINT USING U43$; CLP(13); TAB(30); CMP(13); TAB(42); CNP(13)
COLOR 7, 0
FOR LIN = 4 TO 23: LOCATE LIN, 53: PRINT "O": NEXT LIN
COLOR 15, 4
LOCATE 4, 55: PRINT " AJUSTE de E.H. a BURRI "
FOR LIN = 6 TO 23: LOCATE LIN, 55: PRINT SPACE$(26): NEXT LIN
COLOR 7, 4
LOCATE 7, 57: PRINT "C:"; TAB(63); "M:"; TAB(69); "L:"; TAB(75); "G:"
COLOR 3, 4
LOCATE 7, 59: PRINT C
LOCATE 7, 65: PRINT MW
LOCATE 7, 71: PRINT LW
LOCATE 7, 77: PRINT G
COLOR 15, 4
LOCATE 9, 57: PRINT "Posic. E.H.:"
LOCATE 11, 57: PRINT "Ang. Ajuste:";
LOCATE 13, 57: PRINT "Plano:"
LOCATE 15, 57: PRINT "% An:"; TAB(70); "Q:"
LOCATE 18, 60: PRINT "Indicatriz Optica:"

```



```

LOCATE 20, 57: PRINT "X"
LOCATE 21, 57: PRINT "Y"
LOCATE 22, 57: PRINT "Z"
COLOR 3, 4
LOCATE 9, 70: PRINT POSIC
LOCATE 11, 67: PRINT USING U43$; ANGM
LOCATE 13, 64: PRINT PLANO$
LOCATE 15, 64: PRINT PNORTITA
LOCATE 15, 74: PRINT QRM
LOCATE 20, 60: PRINT USING U23$; CL11; TAB(67); CM11; TAB(74); CN11
LOCATE 21, 60: PRINT USING U23$; CL12; TAB(67); CM12; TAB(74); CN12
LOCATE 22, 60: PRINT USING U23$; CL13; TAB(67); CM13; TAB(74); CN13
COLOR 7, 4
LOCATE 23, 79: INPUT "", YY$
GOTO 6910
6905 GOSUB 7400
' TRANSF CART. a ANGULARES
6910 L3 = LH1: M3 = MH1: N3 = NH1
GOSUB 6920
AZH1 = A3: BUH1 = B3
L3 = LH2: M3 = MH2: N3 = NH2
GOSUB 6920
AZH2 = A3: BUH2 = B3
L3 = LH3: M3 = MH3: N3 = NH3
GOSUB 6920
AZH3 = A3: BUH3 = B3
L3 = LH4: M3 = MH4: N3 = NH4
GOSUB 6920
AZH4 = A3: BUH4 = B3
6912 FOR P = 1 TO 13
L3 = CLP(P): M3 = CMP(P): N3 = CNP(P)
GOSUB 6920
AZI(P) = A3: BUZ(P) = B3
NEXT P
AZI(14) = AR11: BUZ(14) = BR11
AZI(15) = AR12: BUZ(15) = BR12
AZI(16) = AR13: BUZ(16) = BR13
GOTO 6985
' Calculo Angulares
6920 IF N3 > .9999# THEN GOTO 6925 ELSE GOTO 6930
6925 BR3 = PI / 2
A3 = 0: GOTO 6940
6930 BR3 = ATN(N3 / SQR(1 - N3 ^ 2))
6940 B3 = CINT(BR3 * 180 / PI)
K = M3 / L3: DR3 = ATN(K): D3 = DR3 * 180 / PI
IF L3 >= 0 AND M3 >= 0 THEN GOTO 6960
IF L3 < 0 AND M3 >= 0 THEN GOTO 6965
IF L3 <= 0 AND M3 < 0 THEN GOTO 6965
IF L3 > 0 AND M3 < 0 THEN GOTO 6970
6960 A3 = D3: GOTO 6980
6965 A3 = 180 + D3: GOTO 6980
6970 A3 = 360 + D3
6980 A3 = CINT(A3): B3 = CINT(B3)
6984 RETURN
6985 IF PANT$ = "0" THEN GOTO 7000

```

' **INCLUSION COORD. ANG. en PANT. 5**

```

COLOR 11, 1
LOCATE 4, 1: PRINT "  AZIM. y BUZ. de E.H. ROTADO y PLANOS de BURRI "
COLOR 3, 1: FOR LIN = 6 TO 23: LOCATE LIN, 19: PRINT SPACE$(31): NEXT LIN
LOCATE 6, 26: PRINT USING U30$; AZH1; TAB(36); BUH1
LOCATE 7, 26: PRINT USING U30$; AZH2; TAB(36); BUH2
LOCATE 8, 26: PRINT USING U30$; AZH3; TAB(36); BUH3
LOCATE 9, 26: PRINT USING U30$; AZH4; TAB(36); BUH4
GOSUB 6920
FOR P = 1 TO 13
LOCATE P + 10, 26: PRINT USING U30$; AZI(P); TAB(36); BUZ(P)
NEXT P
COLOR 3, 4: FOR LIN = 20 TO 22: LOCATE LIN, 60: PRINT SPACE$(20): NEXT LIN
LOCATE 20, 63: PRINT USING U30$; AR11; TAB(70); BR11
LOCATE 21, 63: PRINT USING U30$; AR12; TAB(70); BR12
LOCATE 22, 63: PRINT USING U30$; AR13; TAB(70); BR13
INPUT "", YY$

```

7000 ' **ARCHIVADO para STERONET**

```

ON C GOTO 7010, 7020, 7030
7010 A1$ = "A-": GOTO 7050
7020 A1$ = "B-": GOTO 7050
7030 A1$ = "C-"
7050 M = VAL(MWW$): IF LEN(MWW$) = 1 THEN GOTO 7055 ELSE GOTO 7060
7055 A2$ = "0" + MWW$ + "-": GOTO 7070
7060 A2$ = MWW$ + "-"
7070 FOR P = 1 TO 16
  PW$ = STR$(P): AA3$ = RIGHT$(PW$, 2)
  IF P < 10 THEN GOTO 7080 ELSE GOTO 7085
7080 A3$ = " " + AA3$: GOTO 7090
7085 A3$ = AA3$
7090 AR$ = A1$ + A2$ + A3$
  OPEN "A", #4, AR$
  PRINT #4, AZI(P), BUZ(P)
  CLOSE #4
NEXT P

```

' **ARCHIVADO para ESTADISTICA**

' **MWA\$= n° de Muestra - PRA\$= n° del Plano - PCA\$= % de An. - CLMA\$= Clave**

MW

```

ON C GOTO 7091, 7092, 7093
7091 ARCH$ = "ESTADI-1": GOTO 7094
7092 ARCH$ = "ESTADI-2": GOTO 7094
7093 ARCH$ = "ESTADI-3"
7094 OPEN ARCH$ FOR RANDOM AS #5 LEN = 25
7095 FIELD #5, 3 AS MWA$, 2 AS PRA$, 2 AS PCA$, 11 AS CLMA$, 7 AS AUX$
  LSET MWA$ = MKI$(MW): LSET PRA$ = MKI$(PR): LSET PCA$ = MKI$(PNORTITA)
  LSET CLMA$ = CLVM$(C, MW)
  PUT #5, RG
  CLOSE #5
7350 GOTO 7500

```

' **ROTACION EJES a POS. ORIGINAL E.H.**

```

7400 ON POSIC GOTO 7410, 7420, 7430, 7440
7410 L11 = L11: N11 = -N11: M11 = M11
  L12 = L12: N12 = -N12: M12 = M12
  L13 = L13: N13 = -N13: M13 = M13
  GOTO 7450
7420 L11 = -L11: N11 = -N11: M11 = -M11

```

```

    L12 = -L12: N12 = -N12: M12 = -M12
    L13 = -L13: N13 = -N13: M13 = -M13
    GOTO 7450
7430 L11 = L11: N11 = N11: M11 = -M11
    L12 = L12: N12 = N12: M12 = -M12
    L13 = L13: N13 = N13: M13 = -M13
    GOTO 7450
7440 L11 = -L11: N11 = N11: M11 = M11
    L12 = -L12: N12 = N12: M12 = M12
    L13 = -L13: N13 = N13: M13 = M13
' PLANOS GRAFICO E.H DE BURRI
' Coord. Planos p/Q menor
7450 QQ = QMEN
    RESTORE 7610
    FOR P = 1 TO 13
    FOR Q = 1 TO 20: READ DR(Q): NEXT Q
    FOR Q = 1 TO 20: READ BZ(Q): NEXT Q
    DA = DR(QQ) * PI / 180
    BA = BZ(QQ) * PI / 180
    LL(P) = COS(DA) * COS(BA): MM(P) = SIN(DA) * COS(BA)
    NN(P) = -SIN(BA)
    NEXT P
' Coord. Planos
    FOR P = 1 TO 13
    CLP(P) = L11 * LL(P) + N11 * MM(P) + M11 * NN(P)
    CMP(P) = L12 * LL(P) + N12 * MM(P) + M12 * NN(P)
    CNP(P) = L13 * LL(P) + N13 * MM(P) + M13 * NN(P)
    NEXT P
' Cambio signo a Coord. si N es negativa ( CNP(P)<0 )
    FOR P = 1 TO 13
    IF CNP(P) >= 0 THEN GOTO 7480
    CLP(P) = -CLP(P): CMP(P) = -CMP(P): CNP(P) = -CNP(P)
7480 NEXT P
    RETURN
' VUELTA a ENTRADA de GRANOS
' Reposicion cabecera pantalla Entrada Datos
7500 CLS : COLOR 9, 0
    LOCATE 25, 1: PRINT SPACE$(80);
    LOCATE 1, 1: PRINT "┌"; STRING$(78, 205); "┐"
    LOCATE 2, 1: PRINT "├"; TAB(80); "┤"
    LOCATE 3, 1: PRINT "└"; STRING$(78, 205); "┘"
    COLOR 15, 0: LOCATE 2, 3
    PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
    LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
    COLOR 7, 0
    FOR LIN = 4 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
    COLOR 7, 4
    FOR LIN = 6 TO 8: LOCATE LIN, 34: PRINT SPACE$(38): NEXT LIN
    LOCATE 6, 36: PRINT "Corte : "
    LOCATE 7, 36: PRINT "Muestra: "; TAB(61); "Grano:"
    LOCATE 8, 36: PRINT "Lamina : "
    COLOR 15, 4
    LOCATE 6, 45: PRINT C; " - "; CORTE$(C)
    LOCATE 7, 45: PRINT MW
    LOCATE 8, 45: PRINT LW; TAB(49); CLV$
    LOCATE 7, 66: PRINT G

```

```

GOTO 1000
' DIR 1
7610 DATA 291, 294, 315, 337, 357, 16, 28, 29, 29, 29, 29, 31
DATA 33, 34, 35, 36, 206, 216, 216
' BUZ 1
DATA 72, 73, 74, 72, 68, 63, 59, 54, 48, 41, 34, 27, 20, 13
DATA 7, 5, 0, 2, 3, 4
' DIR 2
DATA 89, 89, 89, 90, 270, 271, 272, 273, 276, 280, 284, 289
DATA 293, 298, 302, 304, 308, 309, 311, 313
' BUZ 2
DATA 12, 10, 7, 2, 3, 11, 19, 22, 24, 26, 27, 28, 30, 30, 31
DATA 31, 32, 32, 32, 30
' DIR 3
DATA 355, 356, 357, 358, 358, 0, 180, 180, 180, 180, 181, 180
DATA 178, 176, 174, 174, 172, 171, 169, 168
' BUZ 3
DATA 20, 20, 16, 11, 6, 1, 1, 6, 12, 18, 24, 31, 37, 42, 47
DATA 48, 51, 53, 56, 56
' DIR 4
DATA 217, 217, 215, 210, 183, 98, 86, 76, 65, 57, 52, 49, 48
DATA 48, 48, 49, 50, 50, 50, 50
' BUZ 4
DATA 63, 64, 70, 77, 84, 82, 74, 71, 66, 60, 55, 49, 42, 36
DATA 30, 28, 24, 21, 19, 18
' DIR 5
DATA 182, 182, 182, 181, 179, 176, 172, 170, 168, 166, 164
DATA 160, 152, 144, 135, 133, 123, 120, 119, 119
' BUZ 5
DATA 6, 7, 11, 16, 21, 25, 27, 30, 36, 42, 48, 53, 56, 59
DATA 61, 61, 61, 61, 62, 61
' DIR 6
DATA 91, 91, 90, 89, 89, 269, 270, 271, 274, 278, 282, 287
DATA 290, 294, 299, 301, 304, 307, 308, 309
' BUZ 6
DATA 17, 16, 11, 7, 1, 8, 15, 18, 21, 22, 24, 24, 26, 28, 28
DATA 29, 29, 29, 28, 27
' DIR 7
DATA 210, 210, 205, 198, 154, 99, 89, 78, 69, 59, 56, 52, 51
DATA 51, 51, 51, 53, 53, 53, 53
' BUZ 7
DATA 66, 67, 72, 78, 84, 79, 71, 68, 63, 58, 53, 47, 40, 34
DATA 28, 26, 23, 19, 18, 17
' DIR 8
DATA 116, 116, 108, 101, 95, 92, 90, 88, 86, 85, 84, 84, 83
DATA 84, 265, 266, 267, 267, 268, 269
' BUZ 8
DATA 56, 55, 53, 50, 44, 36, 28, 25, 22, 18, 16, 12, 8, 3
DATA 0, 1, 4, 5, 6, 6
' DIR 9
DATA 254, 254, 256, 259, 263, 267, 271, 281, 297, 312, 324
DATA 335, 343, 351, 356, 358, 1, 4, 4, 5
' BUZ 9
DATA 26, 28, 33, 38, 45, 54, 62, 64, 66, 64, 61, 56, 52
DATA 48, 43, 42, 40, 36, 34, 34
' DIR (100)

```

```

7700 DATA 183, 183, 183, 181, 179, 176, 172, 170, 168, 166, 163
    DATA 159, 151, 144, 136, 134, 129, 124, 121, 119
    ' BUZ (100)
    DATA 5, 6, 11, 16, 21, 25, 26, 30, 35, 40, 46, 52, 55, 58, 59
    DATA 59, 59, 58, 60, 60
    ' DIR (110)
    DATA 154, 154, 153, 151, 149, 146, 144, 142, 141, 140, 138
    DATA 136, 133, 131, 128, 127, 126, 126, 125, 125
    ' BUZ (110)
    DATA 13, 14, 16, 18, 19, 18, 15, 16, 19, 22, 25, 28, 30
    DATA 30, 30, 30, 30, 31, 31, 32
    ' DIR (1-10)
    DATA 31, 31, 212, 211, 211, 208, 205, 204, 204, 205, 208, 212
    DATA 211, 212, 212, 211, 208, 90, 48, 26
    ' BUZ (1-10)
    DATA 3, 2, 3, 10, 18, 25, 31, 36, 42, 59, 56, 62, 70, 76
    DATA 82, 84, 88, 88, 88, 88
    ' DIR (-201)
    DATA 354, 355, 358, 359, 1, 3, 4, 4, 185, 185, 186, 186
    DATA 185, 185, 183, 181, 180, 181, 180, 180
    ' BUZ (-201)
    DATA 28, 28, 23, 19, 13, 9, 6, 2, 4, 10, 17, 24, 30, 35
    DATA 40, 44, 46, 49, 50, 51
    ' DEF. de ARCH LAM y N° de GRANOS
8000 CLOSE
    OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C1"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C1"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C1"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C2"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C2"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C2"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C3"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C3"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C3"
    CLOSE #1
    OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C1"
    CLOSE #2
    OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C1"
    CLOSE #2
    OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C1"
    CLOSE #2
    OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C2"
    CLOSE #2
    OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C2"
    CLOSE #2
    OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C2"
    CLOSE #2
    OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C3"

```

```

CLOSE #2
OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C3"
CLOSE #2
OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C3"
CLOSE #2
RETURN
8500 CLOSE
OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C1"
CLOSE #1
OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C1"
CLOSE #1
OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C1"
CLOSE #1
OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C2"
CLOSE #1
OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C2"
CLOSE #1
OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C2"
CLOSE #1
OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C3"
CLOSE #1
OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C3"
CLOSE #1
OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C3"
CLOSE #1
OPEN "I", #2, "DATOS-L1.C1"
CLOSE #2
OPEN "I", #2, "DATOS-L2.C1"
CLOSE #2
OPEN "I", #2, "DATOS-L3.C1"
CLOSE #2
OPEN "I", #2, "DATOS-L1.C2"
CLOSE #2
OPEN "I", #2, "DATOS-L2.C2"
CLOSE #2
OPEN "I", #2, "DATOS-L3.C2"
CLOSE #2
OPEN "I", #2, "DATOS-L1.C3"
CLOSE #2
OPEN "I", #2, "DATOS-L2.C3"
CLOSE #2
OPEN "I", #2, "DATOS-L3.C3"
CLOSE #2
RETURN

```

' **2ª parte del Programa (PLAG-9-1)**

' **Presentacion en Pantalla, Impresion, Borrado Archivos. Estadistica y Test Ajne**

10 CLS

' **Lectura Llave**

```

X2$ = CHR$(38) + CHR$(50) + CHR$(38)
OPEN "LAM" FOR RANDOM AS #1 LEN = 3
FIELD #1, 3 AS XA$
GET #1, 2
CL2$ = XA$

```

```

CLOSE #1
IF CL2$ = X2$ THEN GOTO 20 ELSE GOTO 30
' Anulacion Llave
20 XZ$ = CHR$(90) + CHR$(90) + CHR$(90)
OPEN "LAM" FOR RANDOM AS #1 LEN = 3
FIELD #1, 3 AS XA$
LSET XA$ = XZ$
PUT #1, 2
CLOSE #1
GOTO 50
30 END: SYSTEM
50 PROG$ = "PLAG-9-2"
CLOSE : COLOR 9, 0: Z = 1
LOCATE 1, 1: PRINT "┌"; STRING$(78, 205); "┐"
LOCATE 2, 1: PRINT "├"; TAB(80); "┤"
LOCATE 3, 1: PRINT "└"; STRING$(78, 205); "┘"
COLOR 15, 0
LOCATE 2, 3
PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
COLOR 15, 0
LOCATE 7, 15: PRINT "┌"; STRING$(47, 205); "┐"
FOR LIN = 8 TO 13: LOCATE LIN, 15: PRINT "├"; TAB(63); "┤": NEXT LIN
LOCATE 13, 15: PRINT "└"; STRING$(47, 205); "┘"
COLOR Z, 0: LOCATE 25, 71: PRINT PROG$;
COLOR 14, 1
FOR LIN = 8 TO 12: LOCATE LIN, 17: PRINT SPACE$(45): NEXT LIN
LOCATE 9, 18: PRINT "LISTADO de GRANOS por Pantalla o Impresora,"
LOCATE 11, 19: PRINT "BORRADO de ARCHIVOS y RESUMEN ESTADISTICO"
DIM CORTE$(3)
FOR C = 1 TO 3: READ CORTE$(C): NEXT C
DATA "Almonaster", "Veredas", "Aracena"
U20$ = "##": U22$ = "##.##": U23$ = "##.###": U24$ = "##.####": U30$ = "###"
U32$ = "###.##": U40$ = "####": U43$ = "####.###"
DIM GL1(24), GL2(24), GL3(24), CLAVE$(24, 3), CLVM$(3, 24), PLN$(16)
DIM GL(24, 3), NG(24, 3), NGP(9), NGA(6), TGC(3), PCA(6), PCP(9)
DIM TGM(3, 24)
1000 ' PANTALLA INICIAL
CLS
COLOR 7, 0
LOCATE 1, 1: PRINT "┌"; STRING$(78, 205); "┐"
LOCATE 2, 1: PRINT "├"; TAB(80); "┤"
LOCATE 3, 1: PRINT "└"; STRING$(78, 205); "┘"
COLOR 15, 0
LOCATE 2, 3
PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
1010 FOR LIN = 4 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
LOCATE 24, 1: PRINT SPACE$(80);
LOCATE 25, 1: PRINT SPACE$(80);
' Apertura de Archivos
GOSUB 11210
GOSUB 11220
GOSUB 11230
COLOR 15, 0
LOCATE 4, 21: PRINT "┌"; STRING$(37, 205); "┐"

```

```

FOR LIN = 5 TO 19: LOCATE LIN, 21: PRINT "||"; TAB(59); "||": NEXT LIN
LOCATE 20, 21: PRINT "L"; STRING$(37, 205); "J"
COLOR 14,1
FOR LIN = 5 TO 7: LOCATE LIN, 23: PRINT SPACE$(35): NEXT LIN
LOCATE 6, 27: PRINT "O T R A S   O P C I O N E S"
FOR LIN = 9 TO 21: LOCATE LIN, 23: PRINT SPACE$(35): NEXT LIN
LOCATE 10, 23: PRINT " 1.  Presentar Granos en pantalla "
LOCATE 12, 23: PRINT " 2.  Impresion de Granos           "
LOCATE 14, 23: PRINT " 3.  Borrado de Archivos           "
LOCATE 16, 23: PRINT " 4.  Resumen Estadistico           "
LOCATE 18, 23: PRINT " 5.  Test de Uniformidad de Ajne  "
LOCATE 20, 23: PRINT " 6.  MENU PRINCIPAL             "
COLOR 11, 0
1120 LOCATE 23, 28: INPUT " Indique lo que desea: ", IWW$
    IW = VAL(IWW$): IF IW > 0 AND IW < 7 THEN GOTO 1150
1130 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
    LOCATE 22, 47: PRINT "  ": GOTO 1120
1150 ON IW GOTO 3000, 4000, 7000, 9000, 12000, 1400
1400 X1$ = CHR$(36) + CHR$(49) + CHR$(36)
    OPEN "LAM" FOR RANDOM AS #1 LEN = 3
    FIELD #1, 3 AS XA$
    LSET XA$ = X1$
    PUT #1, 1
    CLOSE #1
    RUN "PLAG-9-1"
2000 ' ESTADILLOS
    CLOSE
2030 ON C GOTO 2040, 2060, 2080
    ' Corte 1
2040 OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C1"
    GOSUB 2150
2045 OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C1"
    GOSUB 2200
2050 OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C1"
    GOSUB 2250
    ' Granos en Muestras y Corte 1
    FOR M = 1 TO 24: TGM(1, M) = GL(M, 1) + GL(M, 2) + GL(M, 3): NEXT M
    TGC(1) = 0
    FOR M = 1 TO 24: TGC(1) = TGC(1) + TGM(1, M): NEXT M
    TGCO = TGC(1)
    IF CONTROL$ = "COMPLETO" THEN GOTO 2500
    IF CONTROL$ = "REDUCIDO" THEN GOTO 2600
    IF CONTROL$ = "BORRADO" THEN GOTO 2060
    ' Corte 2
2060 OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C2"
    GOSUB 2150
2065 OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C2"
    GOSUB 2200
2070 OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C2"
    GOSUB 2250
    ' Granos en Muestras y Corte 2
    FOR M = 1 TO 24: TGM(2, M) = GL(M, 1) + GL(M, 2) + GL(M, 3): NEXT M
    TGC(2) = 0
    FOR M = 1 TO 24: TGC(2) = TGC(2) + TGM(2, M): NEXT M
    TGCO = TGC(2)
    IF CONTROL$ = "COMPLETO" THEN GOTO 2500

```



```

        IF CONTROL$ = "REDUCIDO" THEN GOTO 2600
        IF CONTROL$ = "BORRADO" THEN GOTO 2080
' Corte 3
2080 OPEN "I", #1, "LAMINA-1.C3"
        GOSUB 2150
2085 OPEN "I", #1, "LAMINA-2.C3"
        GOSUB 2200
2090 OPEN "I", #1, "LAMINA-3.C3"
        GOSUB 2250
' Granos en Muestras y Corte 3
        FOR M = 1 TO 24: TGM(3, M) = GL(M, 1) + GL(M, 2) + GL(M, 3): NEXT M
        TGC(3) = 0
        FOR M = 1 TO 24: TGC(3) = TGC(3) + TGM(3, M): NEXT M
        TGCO = TGC(3)
        IF CONTROL$ = "COMPLETO" THEN GOTO 2500
        IF CONTROL$ = "REDUCIDO" THEN GOTO 2600
        IF CONTROL$ = "BORRADO" THEN GOTO 2690
' Lectura Laminas 1
2150 FOR M = 1 TO 24: GL(M, 1) = 0: NEXT M
        FOR M = 1 TO 24
            IF EOF(1) THEN GOTO 2160
            INPUT #1, M, GL1, CL1$, CM$
            GL(M, 1) = GL1: CLAVE$(M, 1) = CL1$: CLVM$(C, M) = CM$
            IF M < 10 THEN AA = 10 ELSE AA = 11
            CLVM$(C, M) = LEFT$(CL1$, AA)
        NEXT M
2160 CLOSE #1
        RETURN
' Lectura Laminas 2
2200 FOR M = 1 TO 24: GL(M, 2) = 0: NEXT M
        FOR M = 1 TO 24
            IF EOF(1) THEN GOTO 2220
            INPUT #1, M, GL2, CL2$, CM$
            GL(M, 2) = GL2: CLAVE$(M, 2) = CL2$: CLVM$(C, M) = CM$
            IF M < 10 THEN AA = 10 ELSE AA = 11
            CLVM$(C, M) = LEFT$(CL2$, AA)
        NEXT M
2220 CLOSE #1
        RETURN
' Lectura Laminas 3
2250 FOR M = 1 TO 24: GL(M, 3) = 0: NEXT M
        FOR M = 1 TO 24
            IF EOF(1) THEN 2280
            INPUT #1, M, GL3, CL3$, CM$
            GL(M, 3) = GL3: CLAVE$(M, 3) = CL3$: CLVM$(C, M) = CM$
            IF M < 10 THEN AA = 10 ELSE AA = 11
            CLVM$(C, M) = LEFT$(CL3$, AA)
        NEXT M
2280 CLOSE #1
2290 RETURN
2500 ' RECUADRO ESTADILLO COMPLETO
        COLOR 2, 1
        LOCATE 5, 1: PRINT "
        LOCATE 6, 1: PRINT "
        LOCATE 7, 1: PRINT "
        LOCATE 8, 1: PRINT "

```

MUESTRAS y GRANOS							
por LAMINAS							
M	L1	L2	L3	M	L1	L2	L3

```

LOCATE 9, 1: PRINT "||-----||"
FOR LIN = 10 TO 21
LOCATE LIN, 1: PRINT "||"; TAB(4); "|"; TAB(16); "||"; TAB(19); "|"; TAB(31); "||"
NEXT LIN
LOCATE 22, 1: PRINT "||-----||"
LOCATE 23, 1: PRINT "
"
FOR M = 1 TO 12: LOCATE 9 + M, 2: PRINT USING U20$; M: NEXT M
FOR M = 13 TO 24: LOCATE M - 3, 17: PRINT USING U20$; M: NEXT M
' Listado completo
' Laminas 1
FOR M = 1 TO 24
IF GL(M, 1) = 0 THEN GOTO 2520
IF M > 12 THEN GOTO 2510
LOCATE 9 + M, 5: PRINT USING U30$; GL(M, 1)
GOTO 2520
2510 LOCATE M - 3, 20: PRINT USING U30$; GL(M, 1)
2520 NEXT M
' Laminas 2
FOR M = 1 TO 24
IF GL(M, 2) = 0 THEN GOTO 2540
IF M > 12 THEN GOTO 2530
LOCATE 9 + M, 9: PRINT USING U30$; GL(M, 2)
GOTO 2540
2530 LOCATE M - 3, 24: PRINT USING U30$; GL(M, 2)
2540 NEXT M
' Laminas 3
FOR M = 1 TO 24
IF GL(M, 3) = 0 THEN GOTO 2560
IF M > 12 THEN GOTO 2550
LOCATE 9 + M, 13: PRINT USING U30$; GL(M, 3)
GOTO 2560
2550 LOCATE M - 3, 28: PRINT USING U30$; GL(M, 3)
2560 NEXT M
RETURN
' RECUADRO ESTADILLO REDUCIDO
2600 COLOR 2, 1
LOCATE 6, 1: PRINT "
"
LOCATE 7, 1: PRINT "
"
LOCATE 8, 1: PRINT "
"
LOCATE 9, 1: PRINT "
"
LOCATE 10, 1: PRINT "
"
FOR LIN = 11 TO 22
LOCATE LIN, 1: PRINT "||"; TAB(4); "|"; TAB(9); "||"; TAB(12); "|"; TAB(17); "||"
NEXT LIN
LOCATE 23, 1: PRINT "
"
FOR M = 1 TO 12: LOCATE 10 + M, 2: PRINT USING U20$; M: NEXT M
FOR M = 13 TO 24: LOCATE M - 2, 10: PRINT USING U20$; M: NEXT M
' Listado reducido
FOR M = 1 TO 12
IF TGM(C, M) = 0 THEN GOTO 2610
LOCATE 10 + M, 5: PRINT USING U40$; TGM(C, M)
2610 NEXT M
FOR M = 13 TO 24
IF TGM(C, M) = 0 THEN GOTO 2620
LOCATE M - 2, 13: PRINT USING U40$; TGM(C, M)
2620 NEXT M

```

```

2690 RETURN
3000 ' PRESENTACION de GRANOS
    LISTA$ = "   PRESENTACION de GRANOS   ": F = 4: OP$ = "PANTALLA"
3010 GOSUB 5500
    COLOR 11, 4
    FOR LIN = 11 TO 23: LOCATE LIN, 33: PRINT SPACE$(48): NEXT LIN
    LOCATE 11, 34: PRINT "Eje"; TAB(38); "Dir"; TAB(43); "Buz."; TAB(49); "Az."
    LOCATE 11, 57: PRINT "-L-"; TAB(66); "-M-"; TAB(75); "-N-"
    LOCATE 11, 69: PRINT
    COLOR 11, 4
    LOCATE 12, 34: PRINT STRING$(46, 196)
' Lectura de Archivos 2
3020 FOR X = 1 TO TGCO
3025 INPUT #2, MLG
    INPUT #2, L11, M11, N11, L12, M12, N12, L13, M13, N13
    INPUT #2, L21, M21, N21, L22, M22, N22, L23, M23, N23
    INPUT #2, A11, B11, C11$, D11, E11$
    INPUT #2, A12, B12, C12$, D12, E12$
    INPUT #2, A13, B13, C13$, D13, E13$
    INPUT #2, A21, B21, C21$, D21, E21$
    INPUT #2, A22, B22, C22$, D22, E22$
    INPUT #2, A23, B23, C23$, D23, E23$
    INPUT #2, LP, MP, NP, AP, BP, CP$, DP, LH, MH, NH, AH, BH, ANG
3050 IF MLG >= RG1 AND MLG <= RNG THEN GOTO 3100 ELSE GOTO 3460
3100 COLOR 3, 4
    LOCATE 13, 35
    IF C11$ = " " THEN GOTO 3101
    PRINT E11$; TAB(37); USING U40$; D11; TAB(42); B11;
    GOTO 3102
3101 PRINT E11$; TAB(42); USING U40$; B11;
3102 PRINT "-"; C11$; TAB(49); USING U40$; A11;
    PRINT USING U24$; TAB(55); L11; TAB(64); M11; TAB(73); N11
    LOCATE 14, 35
    IF C12$ = " " THEN GOTO 3111
    PRINT E12$; TAB(37); USING U40$; D12; TAB(42); B12;
    GOTO 3112
3111 PRINT E12$; TAB(42); USING U40$; B12;
3112 PRINT "-"; C12$; TAB(49); USING U40$; A12;
    PRINT USING U24$; TAB(55); L12; TAB(64); M12; TAB(73); N12
    LOCATE 15, 35
    IF C13$ = " " THEN GOTO 3121
    PRINT E13$; TAB(37); USING U40$; D13; TAB(42); B13;
    GOTO 3122
3121 PRINT E13$; TAB(42); USING U40$; B13;
3122 PRINT "-"; C13$; TAB(49); USING U40$; A13;
    PRINT USING U24$; TAB(55); L13; TAB(64); M13; TAB(73); N13
    LOCATE 17, 35
    IF C21$ = " " THEN GOTO 3131
    PRINT E21$; TAB(37); USING U40$; D21; TAB(42); B21;
    GOTO 3132
3131 PRINT E21$; TAB(42); USING U40$; B21;
3132 PRINT "-"; C21$; TAB(49); USING U40$; A21;
    PRINT USING U24$; TAB(55); L21; TAB(64); M21; TAB(73); N21
    LOCATE 18, 35
    IF C22$ = " " THEN GOTO 3141
    PRINT E22$; TAB(37); USING U40$; D22; TAB(42); B22;

```

```

        GOTO 3142
3141 PRINT E22$; TAB(42); USING U40$; B22;
3142 PRINT "-"; C22$; TAB(49); USING U40$; A22;
        PRINT USING U24$; TAB(55); L22; TAB(64); M22; TAB(73); N22
        LOCATE 19, 35
        IF C23$ = " " THEN GOTO 3151
        PRINT E23$; TAB(37); USING U40$; D23; TAB(42); B23;
        GOTO 3152
3151 PRINT E23$; TAB(42); USING U40$; B23;
3152 PRINT "-"; C23$; TAB(49); USING U40$; A23;
        PRINT USING U24$; TAB(55); L23; TAB(64); M23; TAB(73); N23
        LOCATE 21, 34
        PRINT "PA"; TAB(37); USING U40$; DP; TAB(42); BP;
        PRINT "-"; CP$; TAB(49); USING U40$; AP;
        PRINT USING U24$; TAB(55); LP; TAB(64); MP; TAB(73); NP
        LOCATE 22, 34
        PRINT "EH"; TAB(42); USING U40$; BH; TAB(49); AH;
        PRINT USING U24$; TAB(55); LH; TAB(64); MH; TAB(73); NH
        LOCATE 23, 59: PRINT " ";
        LOCATE 23, 59: PRINT " Ang.PA/EH: "; TAB(72); USING U32$; ANG;
        GP = GP + 1
        COLOR 11, 0
        LOCATE 24, 35: PRINT " ` CONTINUA ? - S/N - ";
        LOCATE 23, 1: INPUT "", TW$
        IF TW$ = "N" OR TW$ = "n" THEN GOTO 3470
3455 LOCATE 10, 76: PRINT GP
3460 IF MLG = RNG THEN GOTO 3470
        NEXT X
3470 CLOSE #2
3490 COLOR 7, 0: FOR LIN = 12 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
        GOTO 3000
4000 ' IMPRESION de GRANOS
        ME$ = LEFT$(DATE$, 2): DI$ = MID$(DATE$, 4, 2): An$ = RIGHT$(DATE$, 4)
        FECHA$ = DI$ + "-" + ME$ + "-" + An$
        LISTA$ = " IMPRESION de GRANOS ": F = 5: OP$ = "IMPRESORA"
        COLOR Z, 0: LOCATE 25, 71: PRINT PROG$;
        GOSUB 5500
        CG = 0: PG = 1
4060 LPRINT
        LPRINT TAB(12); "DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS"
        LPRINT TAB(12); STRING$(55, 205)
        LPRINT
        LPRINT TAB(10); "Corte : "; CORTE$(C); TAB(40); "Fecha lista: "; FECHA$;
        LPRINT TAB(74); "Pg."; 1
        LPRINT
        GP = 0
        CG = GG1 - 1
        FOR K = RG1 TO RNG
        CG = CG + 1: GP = GP + 1
        INPUT #2, MLG
        INPUT #2, L11, M11, N11, L12, M12, N12, L13, M13, N13
        INPUT #2, L21, M21, N21, L22, M22, N22, L23, M23, N23
        INPUT #2, A11, B11, C11$, D11, E11$
        INPUT #2, A12, B12, C12$, D12, E12$
        INPUT #2, A13, B13, C13$, D13, E13$
        INPUT #2, A21, B21, C21$, D21, E21$
        INPUT #2, A22, B22, C22$, D22, E22$

```

```

INPUT #2, A23, B23, C23$, D23, E23$
INPUT #2, LP, MP, NP, AP, BP, CP$, DP, LH, MH, NH, AH, BH, ANG
LPRINT TAB(5); "Muestra:"; MW; TAB(25); "L mina:"; LW; TAB(37); CLAVE$(MW, LW);
LPRINT TAB(63); "Grano:"; CG
LPRINT
LPRINT TAB(9); STRING$(64, 196)
LPRINT TAB(10); "Eje"; TAB(16); "Dir."; TAB(23); "Buz."; TAB(31); "Az.";
LPRINT TAB(37); "Cod."; TAB(46); "- L -"; TAB(56); "- M - "; TAB(66); "- N -"
LPRINT TAB(9); STRING$(64, 196)
LPRINT TAB(11); E11$;
IF C11$ = " " THEN GOTO 4101
LPRINT USING U40$; TAB(16); D11; TAB(23); B11; TAB(30); A11;
GOTO 4102
4101 LPRINT USING U40$; TAB(23); B11; TAB(30); A11;
4102 LPRINT TAB(38); C11$;
LPRINT TAB(45); USING U24$; L11; TAB(55); M11; TAB(65); N11
LPRINT TAB(11); E12$;
IF C12$ = " " THEN GOTO 4111
LPRINT USING U40$; TAB(16); D12; TAB(23); B12; TAB(30); A12;
GOTO 4112
4111 LPRINT USING U40$; TAB(23); B12; TAB(30); A12;
4112 LPRINT TAB(38); C12$;
LPRINT TAB(45); USING U24$; L12; TAB(55); M12; TAB(65); N12
LPRINT TAB(11); E13$;
IF C13$ = " " THEN GOTO 4121
LPRINT USING U40$; TAB(16); D13; TAB(23); B13; TAB(30); A13;
GOTO 4122
4121 LPRINT USING U40$; TAB(23); B13; TAB(30); A13;
4122 LPRINT TAB(38); C13$;
LPRINT TAB(45); USING U24$; L13; TAB(55); M13; TAB(65); N13
LPRINT
LPRINT TAB(11); E21$;
IF C21$ = " " THEN GOTO 4131
LPRINT USING U40$; TAB(16); D21; TAB(23); B21; TAB(30); A21;
GOTO 4132
4131 LPRINT USING U40$; TAB(23); B21; TAB(30); A21;
4132 LPRINT TAB(38); C21$;
LPRINT TAB(45); USING U24$; L21; TAB(55); M21; TAB(65); N21
LPRINT TAB(11); E22$;
IF C22$ = " " THEN GOTO 4141
LPRINT USING U40$; TAB(16); D22; TAB(23); B22; TAB(30); A22;
GOTO 4142
4141 LPRINT USING U40$; TAB(23); B22; TAB(30); A22;
4142 LPRINT TAB(38); C22$;
LPRINT TAB(45); USING U24$; L22; TAB(55); M22; TAB(65); N22
LPRINT TAB(11); E23$;
IF C23$ = " " THEN GOTO 4151
LPRINT USING U40$; TAB(16); D23; TAB(23); B23; TAB(30); A23;
GOTO 4152
4151 LPRINT USING U40$; TAB(23); B23; TAB(30); A23;
4152 LPRINT TAB(38); C23$;
LPRINT TAB(45); USING U24$; L23; TAB(55); M23; TAB(65); N23
LPRINT
LPRINT TAB(10); "P.A.";
LPRINT USING U40$; TAB(16); DP; TAB(23); BP; TAB(30); AP;
LPRINT TAB(38); CP$;

```

```

LPRINT TAB(45); USING U24$; LP; TAB(55); MP; TAB(65); NP
LPRINT
LPRINT TAB(10); "E.H.";
LPRINT USING U40$; TAB(23); BH; TAB(30); AH;
LPRINT TAB(45); USING U24$; LH; TAB(55); MH; TAB(65); NH
LPRINT TAB(49); "Angulo PA/EH: "; TAB(64); USING U32$; ANG
LPRINT
LPRINT TAB(3); STRING$(77, 45)
LPRINT
K1 = GP / 3; K2 = INT(GP / 3)
IF K1 - K2 = 0 THEN GOTO 4240 ELSE GOTO 4260
4240 LPRINT CHR$(12)
IF K = RNG THEN GOTO 4270
LPRINT : LPRINT
LPRINT TAB(12); "DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS"
LPRINT TAB(12); STRING$(56, 205)
LPRINT
LPRINT TAB(10); "Corte : "; CORTE$(C); TAB(40); "Fecha lista: "; FECHA$;
PG = PG + 1: LPRINT TAB(74); "Pg."; PG
LPRINT
4260 NEXT K
4270 LPRINT CHR$(12)
GOTO 1000
5500 ' ELECCION de GRANOS
CORTE$(1) = "Almonaster": CORTE$(2) = "Veredas": CORTE$(3) = "Aracena"
5503 COLOR 7, 0
FOR LIN = 4 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
LOCATE 24, 1: PRINT SPACE$(80);
COLOR 15, 1
LOCATE 4, 40: PRINT LISTA$
COLOR 7, 4
FOR LIN = 6 TO 8: LOCATE LIN, 40: PRINT SPACE$(32): NEXT LIN
LOCATE 6, 41: PRINT " Corte 1: Almonaster "
LOCATE 7, 41: PRINT " Corte 2: Veredas  "
LOCATE 8, 41: PRINT " Corte 3: Aracena  "
COLOR 11, 0
5515 LOCATE 23, 34: INPUT " Seleccione el Corte (1,2,3). -T- TERMINA: ", CW$
IF CW$ = "t" OR CW$ = "T" THEN GOTO 1010
C = VAL(CW$)
IF C = 0 OR C > 3 THEN GOTO 5540 ELSE GOTO 5545
5540 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
LOCATE 9, 56: PRINT " ": GOTO 5503
5545 COLOR 15, 4
FOR LIN = 6 TO 8: LOCATE LIN, 40: PRINT SPACE$(32): NEXT LIN
COLOR 7, 4: LOCATE 6, 41: PRINT " Corte : "
COLOR 15, 4: LOCATE 6, 50: PRINT C; " - "; CORTE$(C)
CONTROL$ = "COMPLETO"
GOSUB 2000
LOCATE 23, 2: PRINT "Total Granos en Corte: "; TGCO
5600 COLOR 11, 0
LOCATE 23, 77: PRINT " ";
LOCATE 23, 35: INPUT "Indique el n° de la Muestra. -T- TERMINA: ", MWW$
IF MWW$ = "T" OR MWW$ = "t" THEN GOTO 5503
MW = VAL(MWW$)
IF MW = 0 OR MW > 24 THEN GOTO 5630 ELSE GOTO 5635
5630 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5

```

```

LOCATE 23, 77: PRINT " ": GOTO 5600
5635 COLOR 7, 0: LOCATE 25, 1: PRINT "Total Granos M"; MW; " "; TGM(C,MW);
    COLOR 7, 4
    LOCATE 7, 40: PRINT " Muestra:"; MW
    IF MW > 12 THEN GOTO 5640
    COLOR 15, 1: LOCATE 9 + MW, 2: PRINT USING U20$; MW
    GOTO 5645
5640 COLOR 15, 1: LOCATE MW - 3, 17: PRINT USING U20$; MW
5645 COLOR 7, 0: LOCATE 23, 34: PRINT SPACE$(45)
    COLOR 11, 0
5555 LOCATE 23, 40: INPUT "Entre el n° de Lamina: ", LWW$
    LW = VAL(LWW$)
    IF LW = 0 OR LW > 3 THEN GOTO 5665 ELSE GOTO 5667
5665 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
    LOCATE 23, 59: PRINT " ": GOTO 5555
5667 COLOR 7, 4: LOCATE 8, 40: PRINT " Lamina: "; LW
    ON LW GOTO 5680, 5690, 5700
5680 IF MW > 12 THEN GOTO 5682
    COLOR 15, 1: LOCATE 9 + MW, 5: PRINT USING U30$; GL(MW, 1)
    GOTO 5685
5682 COLOR 15, 1: LOCATE MW - 3, 20: PRINT USING U30$; GL(MW, 1)
5685 COLOR 7, 4: LOCATE 9, 40: PRINT SPACE$(32)
    LOCATE 9, 40: PRINT " Clave : "; CLAVE$(MW, 1)
    NG = GL(MW, 1)
    GOTO 5730
5690 IF MW > 12 THEN GOTO 5692
    COLOR 15, 1: LOCATE 9 + MW, 9: PRINT USING U30$; GL(MW, 2)
    GOTO 5695
5692 COLOR 15, 1: LOCATE MW - 3, 24: PRINT USING U30$; GL(MW, 2)
5695 COLOR 7, 4: LOCATE 9, 40: PRINT SPACE$(32)
    LOCATE 9, 40: PRINT " Clave : "; CLAVE$(MW, 2)
    NG = GL(MW, 2)
    GOTO 5730
5700 IF MW > 12 THEN GOTO 5702
    COLOR 15, 1: LOCATE 9 + MW, 13: PRINT USING U30$; GL(MW, 3)
    GOTO 5705
5702 COLOR 15, 1: LOCATE MW - 3, 28: PRINT USING U30$; GL(MW, 3)
5705 COLOR 7, 4: LOCATE 9, 40: PRINT SPACE$(32)
    LOCATE 9, 40: PRINT " Clave : "; CLAVE$(MW, 3); " "
    NG = GL(MW, 3)
5730 COLOR 11, 0
    IF NG = 0 THEN GOTO 5733
    LOCATE 23, 33: INPUT "Indique el Grano 1° que quiere relacionar: ", G1W$
    GG1 = VAL(G1W$): IF GG1 = 0 THEN GOTO 5732
    IF GG1 > 100 OR GG1 > NG THEN GOTO 5732 ELSE GOTO 5734
5732 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
    LOCATE 23, 76: PRINT " ": GOTO 5730
5733 COLOR 12, 0
    LOCATE 23, 33: PRINT SPACE$(45)
    LOCATE 23, 33: INPUT "Lamina VACIA, pulse INTRO", YL$
    LOCATE 23, 33: PRINT SPACE$(45)
    COLOR 7, 4: LOCATE 7, 50: PRINT " "
    LOCATE 8, 50: PRINT " "
    GOTO 5600
5734 IF MW > 12 THEN GOTO 5740
    COLOR 2, 1: LOCATE 9 + MW, 2: PRINT USING U20$; MW

```

```

GOTO 5745
5740 COLOR 2, 1: LOCATE MW - 3, 17: PRINT USING U20$; MW
5745 GP = GG1
COLOR 3, 0: LOCATE 10, 33: PRINT " Datos de Granos "
COLOR 11, 0: LOCATE 10, 50: PRINT GP; "al"; NG
COLOR 7, 0: LOCATE 10, 64: PRINT "GRANO actual: "
LOCATE 23, 33: PRINT SPACE$(46)
' Apertura de Archivos
5750 ON C GOTO 5760, 5765, 5770
5760 ON LW GOTO 5780, 5790, 5800
5765 ON LW GOTO 5810, 5820, 5830
5770 ON LW GOTO 5840, 5850, 5860
' Corte 1, Lamina 1
5780 OPEN "I", #2, "DATOS-L1.C1"
GOTO 5900
' Lamina 2
5790 OPEN "I", #2, "DATOS-L2.C1"
GOTO 5900
' Lamina 3
5800 OPEN "I", #2, "DATOS-L3.C1"
GOTO 5900
' Corte 2, Lamina 1
5810 OPEN "I", #2, "DATOS-L1.C2"
GOTO 5900
' Lamina 2
5820 OPEN "I", #2, "DATOS-L2.C2"
GOTO 5900
' Lamina 3
5830 OPEN "I", #2, "DATOS-L3.C2"
GOTO 5900
' Corte 3, Lamina 1
5840 OPEN "I", #2, "DATOS-L1.C3"
GOTO 5900
' Lamina 2
5850 OPEN "I", #2, "DATOS-L2.C3"
GOTO 5900
' Lamina 3
5860 OPEN "I", #2, "DATOS-L3.C3"
5900 IF OP$ = "PANTALLA" THEN GOTO 5980
PLAY "ABG<<<G>E."
COLOR 28, 0: LOCATE 16, 41: PRINT "██████"
COLOR 15, 4: LOCATE 16, 44: PRINT " PREPARE la IMPRESORA "
COLOR 28, 0: LOCATE 16, 70: PRINT "██████"
COLOR 11, 0: LOCATE 18, 50: PRINT "Pulse INTRO"
COLOR 15, 0: LOCATE 20, 35: INPUT "ESPERE. La Impresion tarda unos segundos", YY$
5980 LOCATE 10, 76: PRINT GP
RG1 = MW * 100 + GP
RNG = MW * 100 + NG
5990 RETURN
7000 ' BORRADO de ARCHIVOS
CONTROL$ = "BORRADO"
GOSUB 2000
7100 COLOR Z, 0: LOCATE 25, 71: PRINT PROG$;
COLOR 15, 5
FOR LIN = 1 TO 2: LOCATE LIN, 11: PRINT SPACE$(60): NEXT LIN
COLOR 9, 0

```



```

LOCATE 1, 1: PRINT "┌"; STRING$(78, 205); "┐"
LOCATE 2, 1: PRINT "│"; TAB(80); "│"
LOCATE 3, 1: PRINT "└"; STRING$(78, 205); "┘"
COLOR 15, 0
LOCATE 2, 3
PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
COLOR 7, 0
LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
7520 ' MENU de BORRADO
COLOR 7, 0
FOR LIN = 4 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
LOCATE 24, 1: PRINT SPACE$(80);
COLOR 15, 0
LOCATE 5, 30: PRINT "┌"; STRING$(23, 205); "┐"
FOR LIN = 6 TO 18: LOCATE LIN, 30: PRINT "│"; TAB(54); "│": NEXT LIN
LOCATE 19, 30: PRINT "└"; STRING$(23, 205); "┘"
COLOR 14, 1
FOR LIN = 6 TO 8: LOCATE LIN, 32: PRINT SPACE$(21): NEXT LIN
LOCATE 7, 32: PRINT "  B O R R A D O  "
COLOR 11, 1
FOR LIN = 10 TO 18: LOCATE LIN, 32: PRINT SPACE$(21): NEXT LIN
LOCATE 11, 32: PRINT " 1. Corte 1  "
LOCATE 13, 32: PRINT " 2. Corte 2  "
LOCATE 15, 32: PRINT " 3. Corte 3  "
LOCATE 17, 32: PRINT " 4. MENU INICIAL  "
COLOR 15, 4
LOCATE 20, 29: PRINT " Entre la CLAVE de Borrado "
COLOR 0, 0: LOCATE 20, 57: INPUT CCLL$
CCC$ = CHR$(54) + CHR$(49) + CHR$(49) + CHR$(100) + CHR$(117) + CHR$(99)
IF CCLL$ = CCC$ THEN GOTO 7620 ELSE GOTO 1000
7620 COLOR 11, 0: LOCATE 20, 30: PRINT SPACE$(30)
LOCATE 20, 29: INPUT " Indique el Corte: ", IWW$
IW = VAL(IWW$): IF IW > 0 AND IW < 5 THEN GOTO 7700
SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
LOCATE 22, 47: PRINT "  ": GOTO 7620
7700 ON IW GOTO 7750, 7800, 7850, 1000
7750 ' Borrado Corte 1
GOTO 8000
7760 LOCATE 23, 18: PRINT SPACE$(50)
IF TGC(1) = 0 THEN GOTO 7765
KILL "*.C1": KILL "ESTADI-1": KILL "A*"
7765 COLOR 12, 1: LOCATE 11, 32: PRINT " X X X X X X X X"
GOSUB 8100
GOTO 7620
7800 ' Borrado Corte 2
GOTO 8000
7810 LOCATE 23, 18: PRINT SPACE$(50)
IF TGC(2) = 0 THEN GOTO 7815
KILL "*.C2": KILL "ESTADI-2": KILL "B*"
7815 COLOR 12, 1: LOCATE 13, 32: PRINT " X X X X X X X X"
GOSUB 8100
GOTO 7620
7850 ' Borrado Corte 3
GOTO 8000
7860 LOCATE 23, 18: PRINT SPACE$(50)
IF TGC(3) = 0 THEN GOTO 7865

```

```

      KILL "*.C3": KILL "ESTADI-3": KILL "C*"
7865 COLOR 12, 1: LOCATE 15, 32: PRINT " X X X X X X X X"
      GOSUB 8100
      GOTO 7620
8000 ' Confirmacion Borrado
      COLOR 15, 0
8010 LOCATE 22, 23: INPUT "" Desea BORRAR TODO el Archivo ? -S/N- ", BW$
      IF BW$ = "s" THEN GOTO 8030 ELSE GOTO 8040
8030 LOCATE 21, 63: PRINT " "
      SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
      GOTO 8010
      FOR LIN = 21 TO 23: LOCATE LIN, 23: PRINT SPACE$(45): NEXT LIN
8040 IF BW$ = "S" THEN GOTO 8050
      GOTO 7520
      COLOR 7, 0: LOCATE 21, 23: PRINT SPACE$(45)
8050 SOUND 750, 10: SOUND 550, 30
      COLOR 15, 4
      LOCATE 23, 18: INPUT " " Esta SEGURO de BORRAR TODO este CORTE ? : -S/N- ", SW$
      IF SW$ = "S" THEN GOTO 8060 ELSE GOTO 7520
8060 ON IW GOTO 7760, 7810, 7860
8100 ' Reconfirmación Borrado
      COLOR 12, 0
      LOCATE 22, 18: PRINT SPACE$(58)
      LOCATE 23, 18: PRINT SPACE$(58)
      LOCATE 23, 28: INPUT " Archivo BORRADO - Pulse INTRO ", YW$
      COLOR 12, 1
      COLOR 7, 0: FOR LIN = 20 TO 23: LOCATE LIN, 18: PRINT SPACE$(54): NEXT LIN
      RETURN
9000 ' RESUMEN ESTADISTICO
      CLS : COLOR 9, 0
      DIM AZI(16), BUZ(16), POR(2400)
      LOCATE 1, 1: PRINT "┌"; STRING$(78, 205); "┐"
      LOCATE 2, 1: PRINT "├"; TAB(80); "┤"
      LOCATE 3, 1: PRINT "└"; STRING$(78, 205); "┘"
      COLOR 7, 0
      LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
      COLOR 15, 0
      LOCATE 2, 3
      PRINT " DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS "
      COLOR 10, 0
      LOCATE 5, 20
      PRINT " RESUMEN ESTADISTICO por MUESTRA: TIPOS de MACLA y % An "
9010 COLOR 7, 0: LOCATE 12, 32: PRINT SPACE$(35)
      LOCATE 12, 32: PRINT "Indique Corte:  -T- TERMINA "
      LOCATE 12, 47: INPUT "", CW$
      IF CW$ = "T" OR CW$ = "t" THEN GOTO 1000
      C = VAL(CW$): IF C = 0 OR C > 3 THEN GOTO 9020 ELSE GOTO 9030
9020 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
      LOCATE 12, 47: PRINT " ": GOTO 9010
9030 COLOR 15, 0
      LOCATE 12, 46: PRINT SPACE$(25)
      LOCATE 12, 46: PRINT C; " ("; CORTE$(C); ")"
      COLOR 7, 0
      FOR LIN = 10 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(11): NEXT LIN
      ON C GOTO 9031, 9032, 9033
9031 FOR M = 1 TO 24: TGM(2, M) = 0: NEXT M

```

```

FOR M = 1 TO 24: TGM(3, M) = 0: NEXT M
GOTO 9034
9032 FOR M = 1 TO 24: TGM(1, M) = 0: NEXT M
FOR M = 1 TO 24: TGM(3, M) = 0: NEXT M
GOTO 9034
9033 FOR M = 1 TO 24: TGM(1, M) = 0: NEXT M
FOR M = 1 TO 24: TGM(2, M) = 0: NEXT M
9034 CONTROL$ = "REDUCIDO"
' Obtencion nº total granos en Muestra y Corte elegidos- TGM(C,MW)/TGCO
GOSUB 2000 ' Estadillo reducido
COLOR 7, 0
9035 LOCATE 14, 32: PRINT "Nº de Muestra: -T- TERMINA "
LOCATE 14, 47: INPUT "", MWW$
F MWW$ = "t" OR MWW$ = "T" THEN GOTO 9037 ELSE GOTO 9038
9037 LOCATE 14, 47: PRINT " ": GOTO 9000
9038 MW = VAL(MWW$): IF MW = 0 OR MW > 24 THEN GOTO 9040 ELSE GOTO 9050
9040 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
LOCATE 14, 47: PRINT " ": GOTO 9035
9050 COLOR 15, 0
LOCATE 14, 46: PRINT MW; " "
IF TGM(C, MW) = 0 THEN GOTO 9060 ELSE GOTO 9080
9060 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
COLOR 12, 0: LOCATE 18, 22
INPUT " No hay Granos en esa Muestra - pulse una TECLA ", T$
COLOR 7, 0
LOCATE 18, 22: PRINT SPACE$(50)
LOCATE 14, 47: PRINT " "
GOTO 9035
9080 LOCATE 10, 20: PRINT SPACE$(20)
LOCATE 14, 51: PRINT "("; CLVM$(C, MW); ")"
COLOR 7, 0
LOCATE 16, 32: PRINT "Total Granos en la Muestra: "; TGM(C, MW)
COLOR 15, 0: LOCATE 16, 60: PRINT TGM(C, MW)
LOCATE 20, 32: INPUT "INTRO continua", YY$
FOR LIN = 5 TO 11: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(78): NEXT LIN
COLOR 10, 0
LOCATE 5, 12
PRINT " RESUMEN ESTADISTICO por MUESTRA: TIPOS de MACLA y % An "; ""
' LECTURA del ARCHIVO "ESTADI-C"
9150 GOSUB 9500
FOR LIN = 12 TO 20: LOCATE LIN, 4: PRINT SPACE$(50): NEXT LIN
LOCATE 7, 7: PRINT "Corte: "; CORTE$(C); TAB(33); "Clave: "; CLVM$(C, MW);
PRINT TAB(59); "Total Granos: "; TGM(C, MW)
COLOR 1, 0: LOCATE 8, 1: PRINT STRING$(80, 220)
COLOR 9, 1: FOR LIN = 9 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
LOCATE 24, 1: PRINT SPACE$(80);
LOCATE 25, 1: PRINT SPACE$(80);
COLOR 14, 1
LOCATE 9, 4: PRINT "PLANOS"; TAB(16); "Nº GRANOS"; TAB(29); "% TOTAL";
PRINT TAB(45); "% An"; TAB(56); "Nº GRANOS"; TAB(68); "% TOTAL"
LOCATE 10, 2: PRINT STRING$(78, 196)
COLOR 7, 1
LOCATE 11, 2: PRINT " (001) Kb"
LOCATE 12, 2: PRINT " (010) AclPcl"
LOCATE 13, 2: PRINT " (100) Ala"
LOCATE 14, 2: PRINT "⊥ (100) Ab-Ala"

```

```

LOCATE 15, 2: PRINT "┐ (001) Ab-Kb"
COLOR 15, 1
LOCATE 17, 2: PRINT "L.PARALELA o C."
COLOR 7, 1
LOCATE 19, 2: PRINT " (010) Ab"
LOCATE 20, 2: PRINT " (001) Mbach"
LOCATE 21, 2: PRINT " (021) Bno D"
LOCATE 22, 2: PRINT "(0-21) Bno I"
COLOR 15, 1
LOCATE 24, 3: PRINT "L.NORMAL";
COLOR 10, 1
GLN = 0
FOR P = 1 TO 5: GLN = GLN + NGP(P): NEXT P
FOR P = 1 TO 5
LOCATE 10 + P, 19: PRINT USING U30$; NGP(P)
LOCATE 10 + P, 29: PRINT USING U32$; PCP(P)
NEXT P
PLN = 0
FOR P = 1 TO 5: PLN = PLN + PCP(P): NEXT P
COLOR 14, 1
LOCATE 17, 19: PRINT USING U30$; GLN
LOCATE 17, 29: PRINT USING U32$; PLN
COLOR 10, 1
GLP = 0
FOR P = 6 TO 9: GLP = GLP + NGP(P): NEXT P
FOR P = 6 TO 9
LOCATE 13 + P, 19: PRINT USING U30$; NGP(P)
LOCATE 13 + P, 29: PRINT USING U32$; PCP(P)
NEXT P
PLP = 0
FOR P = 6 TO 9: PLP = PLP + PCP(P): NEXT P
COLOR 14, 1
LOCATE 24, 19: PRINT USING U30$; GLP;
PRINT TAB(29); USING U32$; PLP;
COLOR 2, 1
LOCATE 11, 39: PRINT "┐ 0"
LOCATE 12, 39: PRINT "┐ "
LOCATE 13, 39: PRINT "┐ 10"
LOCATE 14, 39: PRINT "┐ "
LOCATE 15, 39: PRINT "┐ 30"
LOCATE 16, 39: PRINT "┐ "
LOCATE 17, 39: PRINT "┐ 50"
LOCATE 18, 39: PRINT "┐ "
LOCATE 19, 39: PRINT "┐ 70"
LOCATE 20, 39: PRINT "┐ "
LOCATE 21, 39: PRINT "┐ 90"
LOCATE 22, 39: PRINT "┐ "
LOCATE 23, 39: PRINT "┐ 100"
COLOR 7, 1
LOCATE 12, 44: PRINT "Albita"
LOCATE 14, 44: PRINT "Oligoclase"
LOCATE 16, 44: PRINT "Andesina"
LOCATE 18, 44: PRINT "Labradorita"
LOCATE 20, 44: PRINT "Bytownita"
LOCATE 22, 44: PRINT "Anortita"
COLOR 10, 1

```

```

LOCATE 12, 59: PRINT USING U30$; NGA(1)
LOCATE 12, 69: PRINT USING U32$; PCA(1)
LOCATE 14, 59: PRINT USING U30$; NGA(2)
LOCATE 14, 69: PRINT USING U32$; PCA(2)
LOCATE 16, 59: PRINT USING U30$; NGA(3)
LOCATE 16, 69: PRINT USING U32$; PCA(3)
LOCATE 18, 59: PRINT USING U30$; NGA(4)
LOCATE 18, 69: PRINT USING U32$; PCA(4)
LOCATE 20, 59: PRINT USING U30$; NGA(5)
LOCATE 20, 69: PRINT USING U32$; PCA(5)
LOCATE 22, 59: PRINT USING U30$; NGA(6)
LOCATE 22, 69: PRINT USING U32$; PCA(6)
COLOR 12, 1
LOCATE 23, 52: INPUT "Si desea IMPRIMIR entre -I-", WW$
IF WW$ = "I" OR WW$ = "i" THEN GOTO 10000
9400 GOTO 1000
' LECTURA de DATOS ALMACENADOS
' TG= contador de Granos
' NGP(9)/NGA(6) = n° total G. en M/en Plano P y con cada tipo de % An
9500 TG = 0 ' TGM(C,M)= n° de Granos en MW. TGCO= n° total de Granos en Corte
' MWA$= n° de Muestra - PRA$= n° del Plano - PCA$= % de An. - CLMA$= Clave MW
ON C GOTO 9501, 9502, 9503
9501 ARCH$ = "ESTADI-1": GOTO 9504
9502 ARCH$ = "ESTADI-2": GOTO 9504
9503 ARCH$ = "ESTADI-3"
9504 OPEN ARCH$ FOR RANDOM AS #5 LEN = 25
9505 FIELD #5, 3 AS MWA$, 2 AS PRA$, 2 AS PCA$, 11 AS CLMA$, 7 AS AUX$
FOR P = 1 TO 9
TG = 0
FOR G = 1 TO TGCO
GET #5, G
M = CVI(MWA$)
IF M = MW THEN GOTO 9507 ELSE GOTO 9520
9507 PR = CVI(PRA$)
IF PR = P THEN GOTO 9510 ELSE GOTO 9520
9510 TG = TG + 1
9520 NEXT G
NGP(P) = TG
9550 NEXT P
FOR P = 1 TO 9: PCP(P) = (NGP(P) / TGM(C, MW)) * 100: NEXT P
FOR A = 1 TO 6: NGA(A) = 0: NEXT A
FOR G = 1 TO TGCO
GET #5, G
M = CVI(MWA$)
IF M = MW THEN GOTO 9600 ELSE GOTO 9700 ' NEXT G
9600 POR(G) = CVI(PCA$)
IF POR(G) >= 0 AND POR(G) <= 10 THEN GOTO 9660 ELSE GOTO 9610
9610 IF POR(G) > 10 AND POR(G) <= 30 THEN GOTO 9665 ELSE GOTO 9620
9620 IF POR(G) > 30 AND POR(G) <= 50 THEN GOTO 9670 ELSE GOTO 9630
9630 IF POR(G) > 50 AND POR(G) <= 70 THEN GOTO 9675 ELSE GOTO 9640
9640 IF POR(G) > 70 AND POR(G) <= 90 THEN GOTO 9680 ELSE GOTO 9650
9650 IF POR(G) > 90 AND POR(G) <= 100 THEN GOTO 9685 ELSE GOTO 9700
9660 NGA(1) = NGA(1) + 1: GOTO 9700
9665 NGA(2) = NGA(2) + 1: GOTO 9700
9670 NGA(3) = NGA(3) + 1: GOTO 9700
9675 NGA(4) = NGA(4) + 1: GOTO 9700

```

```

9680 NGA(5) = NGA(5) + 1: GOTO 9700
9685 NGA(6) = NGA(6) + 1
9700 NEXT G
      FOR A = 1 TO 6: PCA(A) = ((NGA(A) / TGM(C, MW)) * 10000) / 100: NEXT A
9800 CLOSE #5
      RETURN
10000 ' IMPRESION de los DATOS ESTADISTICOS
      PLAY "ABG<<<G>E."
      COLOR 7, 1: LOCATE 22, 79: PRINT " "
      COLOR 28, 0: LOCATE 23, 49: PRINT " ";
      COLOR 15, 4: LOCATE 23, 52: PRINT " PREPARE la IMPRESORA "
      COLOR 28, 0: LOCATE 23, 78: PRINT " ";
      COLOR 11, 1: LOCATE 24, 58: PRINT "Pulse INTRO";
      COLOR 15, 0: LOCATE 25, 49: PRINT " Deber ESPERAR unos segundos ";
      LOCATE 22, 78: INPUT "", YY$
      LPRINT TAB(6); "F"; STRING$(72, 205); "I"
      LPRINT TAB(6); "|| DETERMINACION de la O.C.P. COMPLETA de las PLAGIOCLASAS - B. Duclos "; TAB(79); "||"
      LPRINT TAB(6); "L"; STRING$(72, 205); "J"
      LPRINT
      LPRINT TAB(15); "RESUMEN ESTADISTICO por MUESTRA: TIPOS de MACLA y % An"
      LPRINT
      LPRINT TAB(7); "Corte: "; CORTE$(C); TAB(33); "Clave: "; CLVM$(C, MW);
      LPRINT TAB(59); "Total Granos: "; TGM(C, MW)
      LPRINT
      LPRINT TAB(6); STRING$(74, 205)
      LPRINT TAB(9); "PLANOS"; TAB(22); "Nº GRANOS"; TAB(32); "% TOTAL";
      LPRINT TAB(48); "% An"; TAB(56); "Nº GRANOS"; TAB(68); "% TOTAL"
      LPRINT TAB(6); STRING$(74, 196)
      LPRINT TAB(6); "F"; STRING$(72, 205); "I"
      LPRINT TAB(6); "|| DETERMINACION de la O.C.P. COMPLETA de las PLAGIOCLASAS - B. Duclos "; TAB(79); "||"
      LPRINT TAB(6); "L"; STRING$(72, 205); "J"
      LPRINT
      LPRINT TAB(15); "RESUMEN ESTADISTICO por MUESTRA: TIPOS de MACLA y % An"
      LPRINT
      LPRINT TAB(7); "Corte: "; CORTE$(C); TAB(33); "Clave: "; CLVM$(C, MW);
      LPRINT TAB(59); "Total Granos: "; TGM(C, MW)
      LPRINT
      LPRINT TAB(6); STRING$(74, 205)
      LPRINT TAB(9); "PLANOS"; TAB(22); "Nº GRANOS"; TAB(32); "% TOTAL";
      LPRINT TAB(48); "% An"; TAB(56); "Nº GRANOS"; TAB(68); "% TOTAL"
      LPRINT TAB(6); STRING$(74, 196)
      LPRINT
      LPRINT TAB(6); "[001] Kb"; TAB(21); USING U30$; NGP(1);
      LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(1);
      LPRINT TAB(42); "F 0"
      LPRINT TAB(42); "||"
      LPRINT TAB(6); "[010] AcIPcl"; TAB(21); USING U30$; NGP(2);
      LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(2);
      LPRINT TAB(42); "||"; TAB(47); "Albita";
      LPRINT TAB(59); USING U30$; NGA(1);
      LPRINT TAB(69); USING U32$; PCA(1)
      LPRINT TAB(42); "||"
      LPRINT TAB(6); "[100] Ala"; TAB(21); USING U30$; NGP(3);
      LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(3);
      LPRINT TAB(42); "|| 10"
      LPRINT TAB(42); "||"
      LPRINT TAB(6); "L[100] Ab-Ala"; TAB(21); USING U30$; NGP(4);

```

```

LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(4);
LPRINT TAB(42); "||"; TAB(47); "Oligoclase";
LPRINT TAB(59); USING U30$; NGA(2);
LPRINT TAB(69); USING U32$; PCA(2)
LPRINT TAB(42); "||"
LPRINT TAB(6); "└[001] Ab-Kb"; TAB(21); USING U30$; NGP(5);
LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(5);
LPRINT TAB(42); "||30"
LPRINT TAB(20); STRING$(19, 196); TAB(42); "||"
LPRINT TAB(42); "||"; TAB(47); "Andesina"; TAB(59); USING U30$; NGA(3);
LPRINT TAB(69); USING U32$; PCA(3)
LPRINT TAB(5); "L.PARALELA o C."; TAB(21); USING U30$; GLN;
LPRINT TAB(29); USING U32$; PLN;
LPRINT TAB(42); "||"
LPRINT TAB(42); "||50";
LPRINT TAB(42); "||"
LPRINT TAB(42); "||"; TAB(47); "Labradorita"; TAB(59); USING U30$; NGA(4);
LPRINT TAB(69); USING U32$; PCA(4)
LPRINT TAB(42); "||";
LPRINT TAB(6); " (010) Ab"; TAB(21); USING U30$; NGP(6);
LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(6);
LPRINT TAB(42); "||70"
LPRINT TAB(42); "||"
LPRINT TAB(6); " (001) Mbach"; TAB(21); USING U30$; NGP(7);
LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(7);
LPRINT TAB(42); "||"; TAB(47); "Bytownita";
LPRINT TAB(59); USING U30$; NGA(5);
LPRINT TAB(69); USING U32$; PCA(5)
LPRINT TAB(42); "||"
LPRINT TAB(6); " (021) Bno D"; USING U30$; NGP(8);
LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(8);
LPRINT TAB(42); "||90"
LPRINT TAB(42); "||"
LPRINT TAB(6); "(0-21) Bno I"; TAB(21); USING U30$; NGP(9);
LPRINT TAB(30); USING U32$; PCP(9);
LPRINT TAB(42); "||"; TAB(47); "Anortita";
LPRINT TAB(59); USING U30$; NGA(6);
LPRINT TAB(69); USING U32$; PCA(6)
LPRINT TAB(42); "||"
LPRINT TAB(20); STRING$(19, 196); TAB(42); "└100"
LPRINT TAB(7); "L.NORMAL"; TAB(21); USING U30$; GLP;
LPRINT TAB(29); USING U32$; PLP;
LPRINT
ME$ = LEFT$(DATE$, 2): DI$ = MID$(DATE$, 4, 2): An$ = RIGHT$(DATE$, 4)
FECHA$ = DI$ + "-" + ME$ + "-" + An$
LPRINT TAB(60); "Fecha: "; FECHA$
LPRINT CHR$(12)
GOTO 1000
' APERTURA de ARCHIVOS
' Ar. escritura Corte 1
11210 OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C1"
CLOSE #1
OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C1"
CLOSE #1
OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C1"
CLOSE #1

```

```

OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C1"
CLOSE #2
OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C1"
CLOSE #2
OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C1"
CLOSE #2
RETURN
' Ar. escritura Corte 2
11220 OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C2"
CLOSE #1
OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C2"
CLOSE #1
OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C2"
CLOSE #1
OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C2"
CLOSE #2
OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C2"
CLOSE #2
OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C2"
CLOSE #2
RETURN
' Ar. escritura Corte 3
11230 OPEN "A", #1, "LAMINA-1.C3"
CLOSE #1
OPEN "A", #1, "LAMINA-2.C3"
CLOSE #1
OPEN "A", #1, "LAMINA-3.C3"
CLOSE #1
OPEN "A", #2, "DATOS-L1.C3"
CLOSE #2
OPEN "A", #2, "DATOS-L2.C3"
CLOSE #2
OPEN "A", #2, "DATOS-L3.C3"
CLOSE #2
RETURN
12000 ' TEST DE UNIFORMIDAD DE AJNE
FOR P = 1 TO 16: READ PLN$(P): NEXT P
DATA " (001) Kb", " (010) AclPcl", " (100) Ala", "Á(100) Ab-Ala", "Á(001) Ab-Kb"
DATA " (010) Ab", " (001) Mbach", " (021) Bno D", "(0-21) Bno I", " (100)"
DATA " (110)", " (1-10)", " (-201)", " Eje X", " Eje Y", " Eje Z"
' MENU PREVIO
12005 COLOR 9, 0: CLS
LOCATE 1, 1: PRINT "┌"; STRING$(78, 205); "┐"
LOCATE 2, 1: PRINT "├"; TAB(80); "┤"
LOCATE 3, 1: PRINT "└"; STRING$(78, 205); "┘"
COLOR 7, 0
LOCATE 2, 64: PRINT " Begoña Duclos "
COLOR 15, 0
LOCATE 2, 4: PRINT "DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS  PLAGIOCLASAS"
COLOR 10, 0
LOCATE 5, 32: PRINT "TEST DE UNIFORMIDAD DE AJNE"
12010 COLOR 7, 0: LOCATE 8, 32: PRINT SPACE$(35)
LOCATE 8, 32: PRINT "Indique Corte:  -T- TERMINA "
LOCATE 8, 47: INPUT "", CW$
IF CW$ = "T" OR CW$ = "t" THEN GOTO 1000
C = VAL(CW$): IF C = 0 OR C > 3 THEN GOTO 12020 ELSE GOTO 12030
12020 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5

```



```

        LOCATE 8, 47: PRINT " ": GOTO 12010
12030 COLOR 15, 0
        LOCATE 8, 46: PRINT SPACE$(25)
        LOCATE 8, 46: PRINT C; " ("; CORTE$(C); ")"
        COLOR 7, 0
        FOR LIN = 6 TO 22: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(11): NEXT LIN
        ON C GOTO 12031, 12032, 12033
12031 FOR M = 1 TO 24: TGM(2, M) = 0: NEXT M
        FOR M = 1 TO 24: TGM(3, M) = 0: NEXT M
        GOTO 12034
12032 FOR M = 1 TO 24: TGM(1, M) = 0: NEXT M
        FOR M = 1 TO 24: TGM(3, M) = 0: NEXT M
        GOTO 12034
12033 FOR M = 1 TO 24: TGM(1, M) = 0: NEXT M
        FOR M = 1 TO 24: TGM(2, M) = 0: NEXT M
12034 CONTROL$ = "REDUCIDO"
        GOSUB 2000 ' Estadillo reducido
        COLOR 7, 0
12035 LOCATE 10, 32: PRINT "Nº de Muestra:  -T- TERMINA "
        LOCATE 10, 47: INPUT "", MWW$
        IF MWW$ = "t" OR MWW$ = "T" THEN GOTO 12037 ELSE GOTO 12038
12037 LOCATE 10, 47: PRINT " ": GOTO 12005
12038 MW = VAL(MWW$): IF MW = 0 OR MW > 24 THEN GOTO 12040 ELSE GOTO 12050
12040 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5
        LOCATE 10, 47: PRINT " ": GOTO 12035
12050 COLOR 15, 0: LOCATE 10, 46: PRINT MW; SPACE$(15)
        ' Obtencion de la primera parte del nombre de Archivo
        ON C GOTO 12051, 12052, 12053
12051 A1$ = "A-": GOTO 12054
12052 A1$ = "B-": GOTO 12054
12053 A1$ = "C-"
12054 IF MW < 10 THEN GOTO 12055 ELSE GOTO 12056
12055 A2$ = "0" + MWW$ + "-": GOTO 12060
12056 A2$ = MWW$ + "-"
12060 COLOR 7, 0
        NT = TGM(C, MW) ' Nº de granos Muestra M a estudiar
        COLOR 15, 0: LOCATE 10, 51: PRINT CLVM$(C, MW); TAB(65); NT
        COLOR 7, 0: LOCATE 10, 70: PRINT "Granos"
        LOCATE 22, 32: INPUT "" Desea TODOS los Planos ? - S/N ", T$
        IF T$ = "s" OR T$ = "S" THEN GOTO 12100
12062 LOCATE 22, 32: PRINT SPACE$(40)
        LOCATE 22, 32: PRINT "" Nº del Plano ?  -T- TERMINA"
        LOCATE 22, 49: INPUT "", TP$
        IF TP$ = "t" OR TP$ = "T" THEN GOTO 12063 ELSE GOTO 12064
12063 FOR LIN = 6 TO 23: LOCATE LIN, 31: PRINT SPACE$(48): NEXT LIN
        GOTO 12010
12064 LOCATE 22, 32: PRINT SPACE$(45)
        IF LEN(TP$) > 2 THEN TP$ = LEFT$(TP$, 2)
        NUMP = VAL(TP$): IF NUMP > 16 OR NUMP = 0 THEN GOTO 12065 ELSE GOTO 12068
12065 SOUND 1000, 5: SOUND 800, 5: LOCATE 22, 49: PRINT " ": GOTO 12062
12068 COLOR 7, 0: FOR LIN = 18 TO 21: LOCATE LIN, 31: PRINT SPACE$(47): NEXT LIN
        ' Obtencion de un solo Plano
12070 P = NUMP
        GOSUB 12500 ' Obtencion del nombre completo del Archivo y lectura del mismo
        LOCATE 12, 32: PRINT "Archivo: "; AR$

```

```

' Barra de progreso
Z = INT(NT / 10) ' Longitud para avances cada 10 Granos
COLOR 15, 0: LOCATE 15, 32: PRINT STRING$(Z, 176)
COLOR 7, 0: LOCATE 17, 32: PRINT "P: "; P
GOSUB 12800 ' Calculos y suma de los angulos formados
GOSUB 12900 ' Test Ajne
LOCATE 18, 31: PRINT " "; STRING$(42, 196); "⌈"
LOCATE 19, 31: PRINT "⌈"; TAB(74); "⌈"
LOCATE 20, 31: PRINT "⌈"; TAB(74); "⌈"
LOCATE 21, 31: PRINT "⌈"; STRING$(42, 196); "⌋"
COLOR 10, 0
LOCATE 19, 38: PRINT "PLANO"; TAB(51); "VALOR TEST"; TAB(65); "UNIFORME"
COLOR 7, 0
LOCATE 20, 32: PRINT P; TAB(37); PLN$(P); TAB(52); USING U32$; UNAJ(P);
PRINT TAB(68); UA$(P)
GOTO 12062
12100 NUMP = 0 ' Indica que se han elegido todos los Planos
LOCATE 22, 32: PRINT "Puede tardar unos minutos"
' Barra y elementos de progreso
LOCATE 14, 31: PRINT "██████████"
LOCATE 15, 31: PRINT "██████████"
LOCATE 16, 31: PRINT "██████████"
FOR P = 1 TO 16
COLOR 7, 0
LOCATE 17, 32: PRINT "P: "; P
GOSUB 12500 ' Obtencion del nombre completo del Archivo y lectura del mismo
GOSUB 12800 ' Calculos y suma de los angulos formados
COLOR 9, 0: LOCATE 15, 31 + P: PRINT "2"
COLOR 7, 0
NEXT P
LOCATE 22, 32: PRINT "Puede tardar varios minutos"
LOCATE 22, 32: PRINT SPACE$(45)
LOCATE 22, 32: INPUT "Para continuar, pulse una tecla ", YY$
FOR P = 1 TO 16
GOSUB 12900 ' Formula de AJNE
NEXT P
12350 COLOR 7, 0: FOR LIN = 6 TO 23: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
COLOR 10, 0
LOCATE 7, 7: PRINT "Corte: "; CORTE$(C); TAB(33); "Clave: "; CLVM$(C, MW);
PRINT TAB(59); "Total Granos: "; TGM(C, MW)
COLOR 1, 0: LOCATE 8, 1: PRINT STRING$(80, 220)
COLOR 9, 1: FOR LIN = 9 TO 22: LOCATE LIN, 1: PRINT SPACE$(80): NEXT LIN
COLOR 14, 1
LOCATE 9, 3: PRINT "N°"; TAB(9); "PLANO"; TAB(20); "VALOR TEST"; TAB(33); "UNIFORME"
LOCATE 9, 46: PRINT "N°"; TAB(51); "PLANO"; TAB(59); "VALOR TEST"; TAB(72); "UNIFORME"
LOCATE 10, 2: PRINT STRING$(78, 196)
COLOR 7, 1
FOR P = 1 TO 9
LOCATE 10 + P, 2: PRINT P; TAB(6); PLN$(P); TAB(20); USING U32$; UNAJ(P);
PRINT TAB(35); UA$(P)
NEXT P
FOR P = 10 TO 16
LOCATE 1 + P, 45: PRINT P; TAB(50); PLN$(P); TAB(59); USING U32$; UNAJ(P);
PRINT TAB(75); UA$(P)
NEXT P
LOCATE 22, 40: INPUT "Para continuar, pulse una tecla ", T$
GOTO 12005

```

```

12500 ' Obtencion del nombre completo del Archivo y lectura del mismo
12510 PW$ = STR$(P): AA3$ = RIGHT$(PW$, 2)
      IF P < 10 THEN GOTO 12515 ELSE GOTO 12520
12515 A3$ = " " + AA3$: GOTO 12530
12520 A3$ = AA3$
12530 AR$ = A1$ + A2$ + A3$
12550 OPEN "I", #4, AR$
      FOR G = 1 TO NT
      INPUT #4, A, B
      AZ(G) = A: BU(G) = B
      NEXT G
      CLOSE #4
      RETURN
12800 ' CALCULOS DEL ANGULO y SUMA DE LOS MISMOS
      SUMA(P) = 0
      ' Conversion a Cartesianas y obtencion de los angulos
      FOR G = 1 TO NT - 1
      A1 = AZ(G): B1 = BU(G)
      A1R = A1 * PI / 180: B1R = B1 * PI / 180
      LT1 = COS(A1R) * COS(B1R): MT1 = SIN(A1R) * COS(B1R): NT1 = SIN(B1R)
      MODT1 = SQR(LT1 ^ 2 + MT1 ^ 2 + NT1 ^ 2)
      LT1 = LT1 / MODT1: MT1 = MT1 / MODT1: NT1 = NT1 / MODT1
      LT1 = CINT(LT1 * 10000) / 10000: MT1 = CINT(MT1 * 10000) / 10000
      NT1 = CINT(NT1 * 10000) / 10000
      FOR J = G + 1 TO NT
      A2 = AZ(J): B2 = BU(J)
      A2R = A2 * PI / 180: B2R = B2 * PI / 180
      LT2 = COS(A2R) * COS(B2R): MT2 = SIN(A2R) * COS(B2R): NT2 = SIN(B2R)
      MODT2 = SQR(LT2 ^ 2 + MT2 ^ 2 + NT2 ^ 2)
      LT2 = LT2 / MODT2: MT2 = MT2 / MODT2: NT2 = NT2 / MODT2
      LT2 = CINT(LT2 * 10000) / 10000: MT2 = CINT(MT2 * 10000) / 10000
      NT2 = CINT(NT2 * 10000) / 10000
      ' Calculo del angulo
      COSENO = LT1 * LT2 + MT1 * MT2 + NT1 * NT2
      ACOS = ABS(COSENO)
      IF ACOS >= 1 THEN GOTO 12835
      IF COSENO = 0 THEN GOTO 12837
      GOTO 12840
12835 COSENO = 1: ANGULO = 0: GOTO 12850
12837 ANGULO = PI: GOTO 12850
12840 SENO = SQR(1 - COSENO ^ 2)
      TANGENTE = SENO / COSENO
      ANGULO = ABS(ATN(TANGENTE))
12850 SUMA(P) = SUMA(P) + ANGULO
      LOCATE 17, 51: PRINT "Suma de angulos:"; USING "###,###.####"; SUMA(P)
      NEXT J
      LOCATE 17, 40: PRINT "G :"; USING U30$; G
      IF NUMP = 0 THEN GOTO 12880
      YY = (G + 1) / 10 - INT((G + 1) / 10): IF YY = 0 THEN GOTO 12860 ELSE
      GOTO 12880
12860 Y = CINT(G / 10)
      COLOR 9, 0: LOCATE 15, 31 + Y: PRINT "p"
      COLOR 7, 0
12880 NEXT G
      CLOSE #4
      RETURN

```

12900 ' **FORMULA DE AJNE**

UNAJ(P) = (1 / 4) * NT - (SUMA(P) / (NT * PI))

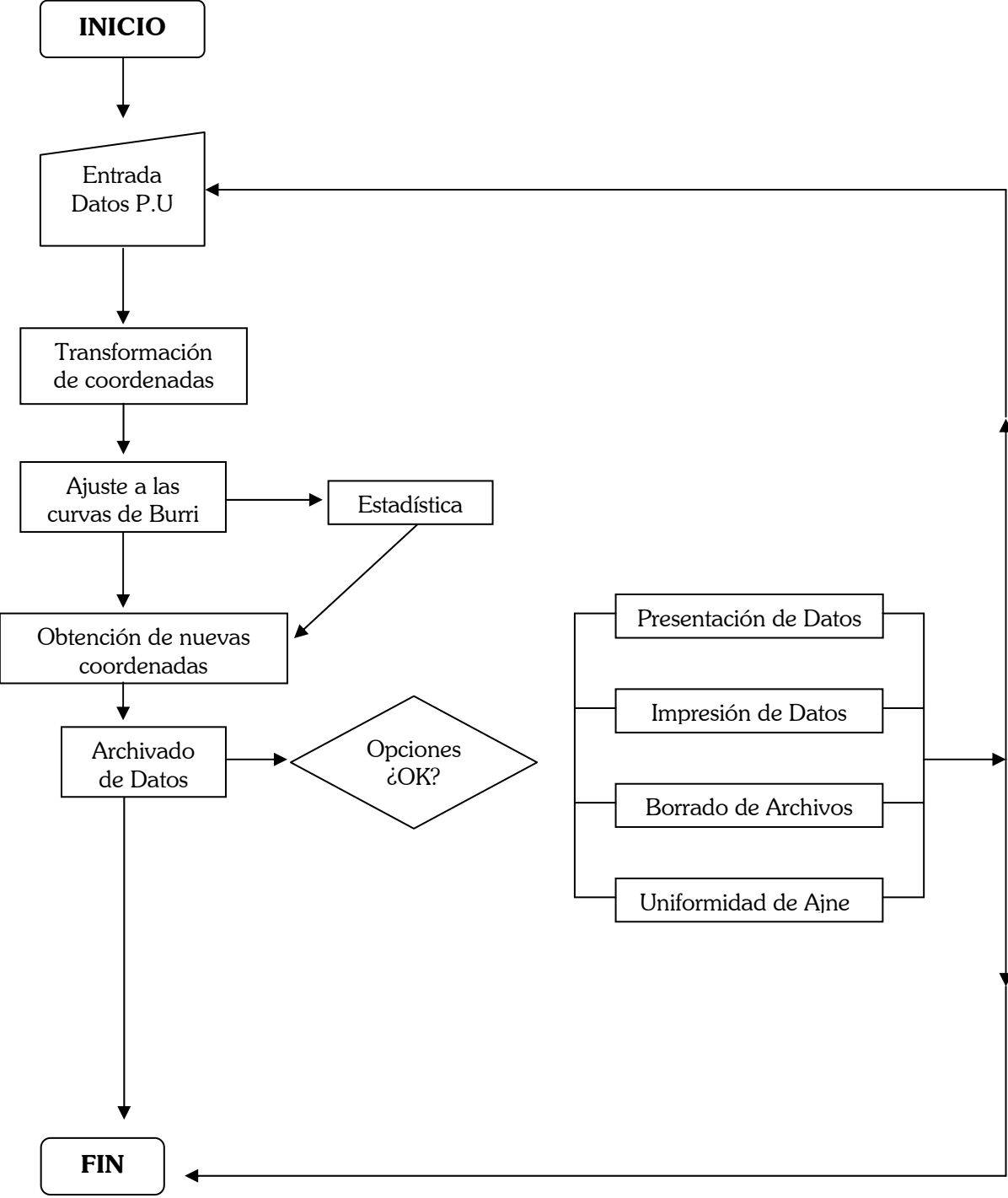
IF UNAJ(P) <= 8.9 THEN GOTO 12930 ELSE GOTO 12940

12930 UA\$(P) = "SI": GOTO 12950

12940 UA\$(P) = "No"

12950 RETURN

FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA INFORMÁTICO PLAG-9



A.1. INTRODUCCIÓN

En este anexo desarrollamos el funcionamiento del programa informático *PLAG-9*, después de haber explicado, en el capítulo de metodología, la motivación y los detalles técnicos que condujeron a su creación. *PLAG-9* es un programa que tiene como objetivo la determinación de la orientación cristalográfica preferente (OCP) de las plagioclasas. Se basa en las curvas de migración de los estereogramas de Burri *et al.* (1967) para las leyes de macla normal y paralela o compleja.

A.2. PARTES DEL PROGRAMA

Como se comentó en el apartado correspondiente de metodología, el programa tuvo que ser dividido en dos partes independientes (*PLAG-9-1* y *PLAG-9-2*) pero interrelacionadas entre sí. A pesar de esta división, que se verá con más detalle a continuación, la primera parte llegó, en bastantes ocasiones, a colapsar la memoria que gestiona el lenguaje de programación utilizado (Quick Basic). Por este motivo, fue necesario reestructurarla en repetidas ocasiones, con todos los inconvenientes que ello supone.

La división del programa en dos partes no se aprecia en su funcionamiento, ya que se pasa de una parte a la otra sin que el usuario se de cuenta. Ambos subprogramas están compilados por seguridad en su manejo, de modo que sólo la primera parte (*PLAG-9-1*) es autoejecutable y desde ella se accede a *PLAG-9-2*. Para que el programa empiece a funcionar tiene que introducirse una clave de seguridad de seis dígitos. Con ello se pretende evitar actuaciones indebidas que pudieran dañar, accidentalmente, el programa o su base de datos. Para más detalle sobre el funcionamiento del programa, ver apartado 3.4 (metodología).

A.2.1. Primera parte (*PLAG-9-1*)

Hemos optado por dejar, en la primera parte del programa (*PLAG-9-1*), la opción de *Entrada de Datos*, con los cálculos que lleva implícito y que son necesarios para la obtención de los resultados finales y su posterior archivado. De este modo, se introducen los datos de platina (dirección de inmersión e inmersión) de cada grano, es decir, los datos de los ejes ópticos de cada individuo del grano maclado y del plano de macla o de asociación (recordemos que la platina universal es de 4 ejes y sólo se pueden medir dos de los tres ejes en cada uno de los individuos). A continuación, el programa transforma, mediante los cosenos directores, las coordenadas de platina en coordenadas cartesianas y a partir de ellas calcula el *azimut* para el plano de asociación y para los cuatro ejes medidos en cada grano maclado. Mediante el producto escalar, calcula los ángulos entre los ejes de cada individuo (para comprobar si son ortogonales) y obtiene los terceros ejes, el eje de hemitropía y el ángulo que éste forma con el plano de asociación (*PA-EH*). A continuación, rota el eje de hemitropía a las cuatro posibles posiciones y calcula los ángulos entre éstas y los puntos de las curvas de Burri *et al.* (1967), teniendo en cuenta que según sea el ángulo *PA-EH*, el programa comparará el eje de hemitropía rotado con las curvas de Burri *et al.* (1967) de los estereogramas

de ley de macla normal ($PA-EH \approx 90^\circ$) o el de ley de macla paralela o compleja ($PA-EH \approx 0^\circ$). Como los datos de las curvas de Burri *et al.* (1967) están en coordenadas angulares (*azimut* y *buzamiento*), el programa las transforma a coordenadas cartesianas para que, mediante el producto escalar entre vectores, calcule los ángulos entre el eje de hemitropía rotado y los puntos de cada curva. Una vez realizados todos los posibles ajustes a cada punto (son un total de 20 por cada curva, que abarcan todas las composiciones entre An_0 y $An_{92.5}$), el programa elige el menor de ellos y proporciona el plano y nombre de la macla de ajuste, el porcentaje de anortita que le corresponde y cuál ha sido, de las cuatro posiciones del eje de hemitropía, la que mejor ha ajustado. El ángulo ideal de mejor ajuste es 0° , en cuyo caso indicaría que el eje de hemitropía coincide exactamente con uno de los puntos de las curvas, caso no muy frecuente pero posible.

Llegados a este punto, el programa pasa a calcular, para el mismo porcentaje de anortita que el obtenido para el plano de ajuste, las coordenadas cartesianas del plano de macla y las del resto de elementos cristalográficos de Burri *et al.* (1967), así como las coordenadas de la indicatriz óptica (ejes X, Y, Z). A continuación, el programa procede a archivar los datos obtenidos.

A.2.2. Segunda parte (PLAG-9-2)

En la segunda parte del programa se han incluido el resto de las opciones, que son:

- *Mostrar Granos en Pantalla.* Se puede elegir el corte, el número de la muestra, la lámina y el grano a partir del cual se desea visualizar la base de datos, es decir, las coordenadas de platina, angulares y cartesianas de los ejes ópticos de cada individuo maclado, las del plano de asociación, las del eje de hemitropía y el ángulo $PA-EH$.
- *Impresión de Granos.* Se imprimen los datos anteriores de cada grano, tres por página, con la fecha de impresión y la paginación correspondiente.
- *Borrado de Archivos.* Aunque el borrado se puede realizar desde el Explorador de Windows, es aconsejable utilizar la opción del programa para evitar la manipulación manual de los archivos y el consiguiente riesgo que ello conlleva. Esta opción es la única que por seguridad exige una clave de acceso propia.
- *Estadística.* Eligiendo el corte y el número de muestra que se desea, se puede ver el porcentaje de planos de macla de mejor ajuste y el contenido en anortita de la plagioclasa.
- *Test de Uniformidad de Ajne.* También da la opción de elegir el corte y el número de la muestra, así como si se desea calcular el estadístico de un elemento cristalográfico concreto o el de todos los de la muestra. En este último caso, el proceso puede tardar varios minutos debido al gran volumen de datos que maneja en los cálculos, indicándose el progreso del mismo con una *barra de estado*.
- *Menú Principal.* Eligiendo esta opción, se pasa a la primera parte del programa (PLAG-9) para continuar con la *Entrada de Datos* de granos. En este caso, el programa no solicita la clave de acceso para una mayor comodidad.

A.3. FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA

El programa funciona bajo entorno MS-DOS y arranca desde un acceso directo creado en el escritorio de Windows. En la fig.A.1 puede verse la pantalla de presentación del programa. Se pasa a la siguiente pulsando cualquier la tecla y aparece, a continuación, la pantalla de petición de clave de acceso al programa, que consiste en seis caracteres alfanuméricos. Hay tres intentos para introducir la clave correcta, de no ser así al cuarto intento se detiene la ejecución del programa. En caso contrario, aparecerá la pantalla del *menú principal* (fig.A.2).

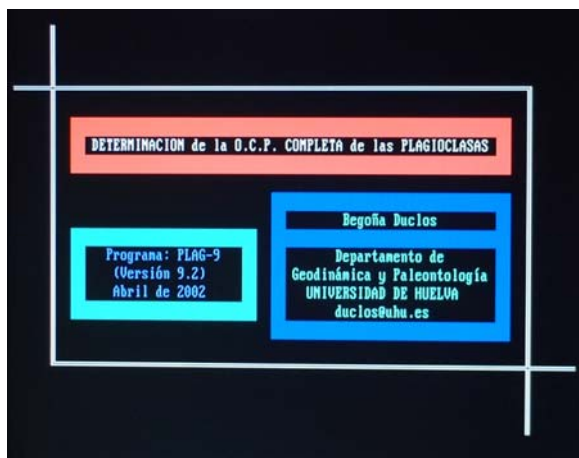


Fig.A.1. Pantalla de presentación del programa PLAG-9 para la detrmínación de la orientación cristalográfica preferente (OCP) de las plagioclasas.



Fig.A.2. Opciones del menú principal del programa: (1) empezar a introducir los datos de granos, (2) pasar a la segunda parte del programa (PLAG-9-2) con sus diferentes opciones y (3) finalizar el programa y salir a Windows.

En el *menú principal* se incluyen 3 opciones:

1. *Introducir Datos de Granos*. Se pasa directamente a introducir las coordenadas de platina (dirección de inmersión e inmersión) de los ejes ópticos y del plano de asociación de cada uno de los individuos del grano maclado.
2. *Otras opciones*. Si se elige esta opción pasamos directamente a la segunda parte del programa (PLAG-9-2). Incluye diferentes opciones para el tratamiento de los resultados obtenidos: test de

3. uniformidad de Ajne, resumen estadístico, presentación en pantalla de los datos de granos, impresión de la base de datos y borrado de archivos.
4. *Salir*. Esta última opción finaliza el programa y nos devuelve a Windows.

A.3.2. Opción 1: Introducir Datos de Granos

Si se elige la primera de las opciones, *Introducir Datos de Granos*, se pasa a la pantalla que se muestra a continuación (fig.A.3).

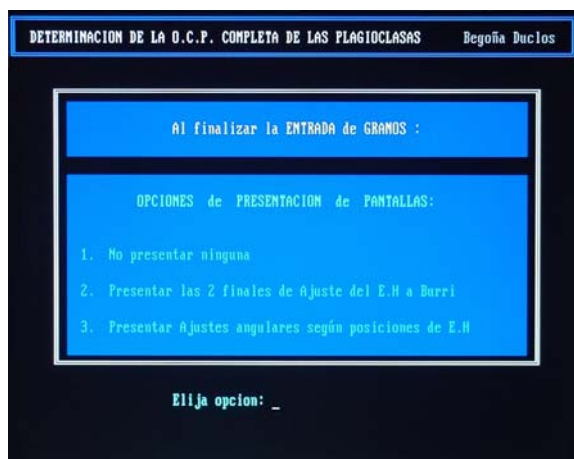


Fig.A.3. Opciones de presentación de pantallas al finalizar la entrada de los datos de granos.

En esta pantalla, el programa da la opción de elegir entre tres opciones:

1. No presentar ninguna pantalla al finalizar la entrada de datos de un grano, es decir, pasa nuevamente a introducir los datos del siguiente grano.
2. Tras finalizar la entrada de datos de un grano, el programa pasa a presentar dos pantalla. En la primera de ellas (fig.A.4) se muestra, en coordenadas cartesianas, las cuatro posiciones del eje de hemitropía rotado, los elementos criatlográficos de Burri *et al.* (1967), la posición de mejor ajuste del eje de hemitropía, el ángulo que éste ha formado con la curva de Burri *et al.* (1967) correspondiente, el nombre del plano de macla que mejor se ha ajustado, el porcentaje de anortita que le corresponde y, finalmente, la posición de los ejes de la indicatriz óptica. En la segunda de las pantallas (fig.A.5) se presentan los mismos datos pero en coordenadas angulares (*azimut* y *buzamiento*).

DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS				Begoña Duclos
C. CARTESIANAS de E.H. ROTADO y PLANOS de BURRI				AJUSTE de E.H. a BURRI
EH1	0.541	0.607	-0.582	C: 1 M: 2 L: 1 G: 87
EH2	0.541	-0.607	-0.582	Posic. E.H.: 1
EH3	-0.541	0.607	-0.582	Ang. Ajust 0.000
EH4	-0.541	-0.607	-0.582	Plano: $L(100)$ Ab-Ala
(001) Kb	-0.903	-0.022	0.446	% An: 65 Q: 14
(010) AcIPcl	0.156	0.970	0.182	Indicatriz Optica:
(100) Ala	-0.029	-0.176	0.984	X -0.321 -0.083 0.342
$L(100)$ Ab-Ala	0.997	-0.075	0.010	Y 0.210 0.206 0.935
$L(001)$ Ab-Kb	0.423	-0.207	0.874	Z -0.917 0.389 0.087
(010) Ab	0.064	0.981	0.182	
(001) Maneb	-0.989	0.145	0.015	
(021) Bno.D	-0.639	0.758	0.142	
(0-21) Bno.I	0.762	0.630	0.132	
(100)	0.414	-0.186	0.883	
(110)	0.334	-0.648	0.678	
(1-10)	0.405	0.316	0.850	
(-201)	-0.164	-0.137	0.980	

Fig.A.4. En la parte izquierda: coordenadas cartesianas del eje de hemitropía rotado en sus cuatro posiciones y de las direcciones y planos cristalográficos de Burri et al. (1967). En la parte derecha: el ajuste final del eje de hemitropía. C, M, L y G representan, respectivamente, el corte geológico, el número de muestra, la lámina y el grano al que corresponden los datos (en este caso se trata del grano 2 de la lámina 1 de la muestra 2 del corte de Almonaster la Real). Se muestra, también, la posición del eje de hemitropía que mejor ha ajustado, el ángulo de ajuste y plano de mejor ajuste, el porcentaje de anortita que le corresponde y las coordenadas de la indicatriz óptica.

DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS				Begoña Duclos
AZIM. y BUZ. de E.H. ROTADO y PLANOS de BURRI				AJUSTE de E.H. a BURRI
EH1	40	-36		C: 1 M: 2 L: 1 G: 87
EH2	312	-36		Posic. E.H.: 1
EH3	132	-36		Ang. Ajust 0.000
EH4	220	-36		Plano: $L(100)$ Ab-Ala
(001) Kb	181	27		% An: 65 Q: 14
(010) AcIPcl	81	10		Indicatriz Optica:
(100) Ala	261	80		X 250 20
$L(100)$ Ab-Ala	356	1		Y 54 69
$L(001)$ Ab-Kb	334	61		Z 157 5
(010) Ab	86	10		
(001) Maneb	172	1		
(021) Bno.D	130	8		
(0-21) Bno.I	40	8		
(100)	336	62		
(110)	297	43		
(1-10)	30	58		
(-201)	220	70		

Fig.A.5. Pantalla igual a la de la fig.A.4, pero con los datos en coordenadas angulares (azimut y buzamiento) en lugar de en coordenadas cartesianas.

3. Al elegir esta última opción, tras completar la entrada de datos de un grano, el programa presentará un total de seis pantallas. Las cuatro primeras corresponden al cálculo de los ángulos de ajuste del eje de hemitropía rotado, en cada una de sus cuatro posiciones (de ahí que se presenten cuatro pantallas, una por cada posición de rotación del mencionado eje) respecto a los puntos de las curvas de Burri et al. (1967) según si el grano ha ajustado a ley de macla normal o ley de macla paralela o compleja (fig.A.6, A.7, A.8 y A.9). Para cada una de las cuatro posiciones el programa presenta, en la parte inferior de cada pantalla, el ángulo menor final de todos los posibles. En la cuarta pantalla (posición 4 del eje de hemitropía rotado) se incluye lo mismo y, además, el ángulo menor final de las cuatro posiciones, la posición del eje que ha proporcionado un mejor ajuste, el plano de macla al que ha ajustado y el porcentaje de anortita que le corresponde. A continuación, se pasaría a una cuarta y quinta pantalla (descritas en la

opción 2, fig.A.4 y A.5). Y, finalmente, de la sexta y última de las pantallas se pasaría, nuevamente, a la de *Entrada de Datos de Granos*.

Grano 1			Posición 1		Ang. PA/EH: 72.49			
Kb	Acl-Pcl	Ala	Ab-Ala	Ab-Kb	Ab	Hanch	Duo.D	Duo.I
64.02	43.61	49.04	81.01	60.13				
62.71	44.91	48.23	80.02	60.07				
56.88	46.93	49.53	73.98	63.86				
50.65	51.16	51.63	66.85	68.29				
43.11	54.02	54.74	58.74	73.34				
33.82	61.58	56.53	49.49	78.18				
26.98	68.49	57.94	42.54	82.07				
22.76	71.45	61.49	38.38	85.45				
18.88	74.72	65.98	31.94	89.09				
16.01	78.57	70.44	25.04	83.78				
15.07	81.70	74.50	19.56	78.68				
18.52	85.50	80.55	13.40	73.52				
21.75	89.41	86.29	6.39	68.00				
26.44	87.34	88.87	0.00	62.00				
31.43	84.04	84.16	5.56	57.88				
32.93	82.69	83.41	7.59	56.95				
37.37	79.35	80.32	11.66	52.19				
42.97	78.66	78.45	14.65	50.75				
40.26	77.26	75.51	16.64	50.21				
41.22	76.96	75.11	17.64	50.26				
15.07	43.61	48.23	0.00	50.21				
Ang. menor Posic. 1			0.00					

Fig.A.6. Ajuste angular del eje de hemitropía rotado en la posición 1 a los 20 puntos (desde An_0 a $An_{92.5}$) de las curvas de Burri et al. (1967) correspondientes a la ley de macla paralela o compleja. El último dato de cada columna representa el ángulo menor de cada una de ellas. En la parte inferior izquierda se representa el ángulo menor final entre todos los posibles. En este caso el ángulo menor es 0° , lo que indica que el eje de hemitropía en esta posición coincide, exactamente, con el punto 14 (An_{70}) de la curva Albita-Ala.

Grano 1			Posición 2		Ang. PA/EH: 72.49			
Kb	Acl-Pcl	Ala	Ab-Ala	Ab-Kb	Ab	Hanch	Duo.D	Duo.I
37.95	62.39	40.89	60.80	62.04				
38.46	60.04	41.69	60.43	63.56				
38.43	58.53	44.68	59.06	66.45				
38.65	54.11	48.44	58.01	69.51				
41.04	50.48	51.65	58.30	72.12				
47.25	44.29	56.53	61.18	73.61				
53.26	38.68	57.90	66.25	73.20				
54.82	36.29	61.46	66.36	74.80				
56.47	32.90	65.07	66.37	79.12				
58.07	28.76	70.41	66.62	83.67				
61.71	25.12	75.62	66.83	88.40				
64.92	20.71	80.53	68.18	88.00				
70.04	16.69	84.32	71.13	86.01				
75.45	12.82	87.50	74.32	84.88				
79.66	9.34	89.15	77.64	83.39				
81.62	7.92	88.31	79.49	83.42				
85.34	4.73	86.47	82.54	83.16				
78.44	4.23	85.09	84.30	82.95				
87.00	3.60	83.09	85.40	81.00				
87.66	5.65	83.36	86.07	82.86				
37.95	3.60	40.89	58.01	62.04				
Ang. menor Posic. 2		3.60						

Fig.A.7. Igual que la fig.A.6 pero para la segunda posición de rotación del eje de hemitropía. En este caso el ángulo de mejor ajuste es 3.60° y corresponde al plano Aclina Periclina para un porcentaje de anortita del 90% ($Q=19$)

Grano 1			Posición 3		Ang. PA/EH: 72.49			
Kb	Acl-Pcl	Ala	Ab-Ala	Ab-Kb	Ab	Hanch	Duo.D	Duo.I
71.44	45.14	69.03	56.69	54.68				
70.74	46.42	69.59	56.45	54.04				
70.40	48.40	67.03	54.58	51.57				
70.98	51.18	63.81	52.82	47.87				
71.04	54.07	60.00	50.00	43.61				
69.01	60.41	57.92	47.89	39.29				
66.46	66.31	56.52	44.28	35.18				
68.57	68.28	53.17	45.62	32.42				
71.79	68.51	49.40	48.52	29.23				
75.73	68.50	45.98	52.33	27.25				
79.82	67.84	43.80	55.95	26.78				
84.00	67.10	40.18	59.56	26.37				
86.75	67.91	36.93	62.91	24.61				
89.39	66.84	34.68	65.55	24.74				
87.84	67.20	33.26	68.42	25.48				
87.46	66.97	33.35	68.65	25.41				
85.34	67.67	32.55	69.91	26.00				
76.05	67.62	32.45	71.47	26.48				
83.57	67.58	32.38	72.54	27.58				
82.99	65.58	31.87	73.00	26.66				
66.46	45.14	31.87	44.28	24.61				
Ang. menor Posic. 3					24.61			

Fig.A.8. Igual que la fig.A.6 pero para la tercera posición de rotación del eje de hemitropía. En este caso el ángulo de mejor ajuste es 24.61° y corresponde al plano Albita-Carlsbad para una composición de An_{60} ($Q=13$).

el campo, en el modo “mmaa” (mes y año). Con todo ello, el programa compone el nombre de la muestra (por ejemplo, B.0601). En el caso de que la lámina seleccionada contenga algún grano, se salta la petición de la clave y la fecha, y el número del grano que se introduce como nuevo es asignado automáticamente, mediante un contador, al último existente en la lámina. Y de este modo se pasa directamente a la pantalla de *Entrada de Datos* (fig.A.11), en donde se nos recuerda el corte, numero de muestra y número de lámina en el que nos encontramos, así como el número del nuevo grano cuyos datos se van a introducir.

Nº	DIREC.	BUZ.	COD.	EJE	L	M	N	AZIM.	MOD.	ANGULO
1	20	20	I	X	-0.3214	-0.0830	0.3420	250		
2	113	5	I	Z	-0.9170	0.3892	0.0872	157		-88.90
		69		Y	0.2102	0.2857	0.9350	54	0.9998	
1	164	20	I	X	-0.2590	0.9833	0.3420	106		
2	77	11	D	Z	0.9565	0.2208	0.1908	13		89.03
		67		Y	-0.0960	-0.3766	0.9213	256	0.9999	
PA	96	9	I		-0.9823	0.1032	0.1564	174	1.00	
PH		51			-0.1176	0.6210	0.7749	101	Ang. PA/PH	72.49

Fig.A.11. Pantalla de Entrada de Datos de granos. A las coordenadas de platina (dirección de inmersión e inmersión) se les llama DIREC y BUZ, respectivamente. En la parte superior derecha: información de la lámina que se está midiendo (corte, numero de muestra, clave y número del grano cuyos datos se están introduciendo). A la parte superior izquierda: estadillo reducido con el número de granos en cada una de las láminas de la muestra. En este caso se representan todas las medidas del grano 16 de la lámina 1 de la muestra número 16 (B.0601-16) de Almonaster la Real.

En la parte superior izquierda aparece un *estadillo* reducido con las tres láminas de la muestra elegida y el número de granos medidos en cada una de ellas (aparece enfatizada aquella lámina en la que se están introduciendo los datos). A la derecha aparecen los elementos identificativos del grano que se mide (corte, muestra, lámina y número del grano en el registro). La cabecera del campo de entrada de datos consta de diversos elementos como se ve a continuación:

Nº	DIREC.	BUZ.	COD.	EJE	L	M	N	AZIM.	MOD.	ANGULO
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)

Las columnas 2, 3, 4, y 5 corresponden a la entrada de datos de granos con la platina, y las columnas 6 a 11 a los cálculos realizados por el programa para obtener, entre otras cosas, las coordenadas cartesianas (L, M, N) y el *azimut* (AZIM) de los datos introducidos. Como la platina universal que se utiliza es de 4 ejes, sólo se pueden medir dos de los tres ejes de la indicatriz óptica de cada uno de los dos individuos del grano de plagioclasa maclado, de modo que el programa calcula el tercero y le adjudica el nombre que le corresponde (X, Y o Z).

En la columna 1 el programa pone automáticamente el número del eje cuyas medidas se están introduciendo (1 ó 2). En las columnas 2 y 3, que son, respectivamente, la dirección de inmersión e inmersión del eje óptico que se está midiendo, aparece el cursor parpadeante en solicitud de introducir el dato en cuestión. Los campos DIREC y BUZ sólo aceptan ángulos entre 0-360° y 0-90°, respectivamente. Si se introduce por equivocación un valor distinto, el programa avisa del error con un breve sonido y lo borra, quedando a la espera de que se introduzca nuevamente el dato. Igual sucede con los campos 4 y 5, que son el código de inmersión y el nombre del eje óptico, respectivamente. El código (ángulo de basculamiento) sólo puede ser derecha o izquierda (D ó I). Tanto las letras de los códigos como las de los eje X, Y y Z que se introducen mediante el teclado, siempre tienen que ser mayúsculas, el programa no admite otras letras diferentes a éstas ni tampoco duplicar, en el caso de los ejes, dos veces la misma. En tal caso, avisa del error y queda a la espera de rectificarlo. Son medidas de seguridad imprescindibles para que los datos se graben correctamente en los archivos. En caso de cometerse un error en un campo de los que no están preparados para detectarlo (por ejemplo, las columnas 2, 3 y 4) y se introduce un valor de 20° para la inmersión del eje en lugar de 30°, se puede corregir introduciendo la letra R en el campo siguiente. En tal caso se borrará el valor erróneo introducido y el cursor volverá a su posición anterior en espera del nuevo dato.

Después de introducir el código, el programa calcula las coordenadas cartesianas (L, M, N) de los ejes introducidos y las presenta en las columnas 6, 7 y 8, respectivamente. Las coordenadas son calculadas con todos los decimales, pero en pantalla sólo se presentan los 4 primeros. Serán siempre valores comprendidos entre ± 1 ya que los ejes se encuentran normalizados. El programa también calcula el *azimut* de cada eje y lo presenta en la columna 9 (AZIM).

Al terminar de calcular las coordenadas cartesianas del segundo eje, el programa calcula también el ángulo que forma la pareja de ejes de cada individuo (columna 11). Esto es importante ya que sirve para comprobar si las medidas de los ejes se están realizando correctamente. El ángulo que cabe esperar debe ser $90 \pm 5^\circ$ (margen de error arbitrario). En caso de que la diferencia fuera mayor, se da la opción de rectificar los datos de los ejes volviéndolos a medir. En la columna 10 (MOD) se presentan los módulos de los ejes terceros de cada individuo, calculados por el programa en base a los dos medidos en la platina. Lógicamente, estos valores serán iguales a 1 al ser considerados los ejes como vectores unidad.

Al finalizar la entrada de datos del primer individuo, aparecerá un aviso con la posibilidad de corregir los datos por si se hubiera cometido alguna equivocación al introducir alguno de ellos. Esto mismo se repite, igualmente, para el segundo individuo. A continuación se introducirían los datos del plano de asociación (PA), también con las opciones de corrección. Finalmente, el programa calcula las coordenadas del eje de hemitropía (EH) y el ángulo entre éste y el plano de asociación (Ang. PA/EH).

Después de presentar la pantalla de la fig.A.11, el programa hace una pausa para observar los resultados. Al pulsar cualquier tecla se archivan todos los datos, tanto los introducidos manualmente como los calculados por él, y se pasa al grano siguiente. De este modo, se podrá

recuperar, en cualquier momento, los datos de las coordenadas de platina que son las que constituyen la base de datos a partir de la cual el programa hace todos los cálculos. Previamente al archivado de datos, el programa reordena los ejes para que queden en la secuencia lógica X, Y y Z y se graban, en archivos de tipo secuencial, las coordenadas angulares obtenidas (*azimut* y *buzamiento*) correspondientes a las direcciones y planos cristalográficos de Burri *et al.* (1967) y los ejes de la indicatriz óptica, para su posterior lectura y proyección estereográfica en el programa Stereonet.

Si se desea cambiar de lámina o de muestra, basta con teclear la letra *T* en el campo 2 (DIREC) del primer individuo. En el caso de introducir *T* nuevamente, se volverá al menú principal (fig.A.2).

A.3.2. Opción 2 : Otras Opciones

En *Otras Opciones* podemos elegir entre: (1) presentar granos en pantalla, (2) impresión de granos, (3) borrado de archivos, (4) resumen estadístico, (5) test de uniformidad de Ajne, y (6) salir al menú principal (fig.A.12).

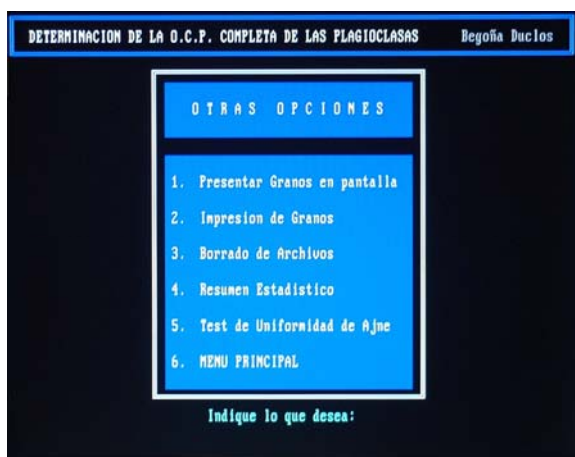


Fig.A.12. Opciones para elegir en la segunda parte del programa (PLAG-9-2). Ver texto

Presentación de Granos en pantalla

Esta opción sirve para visualizar en pantalla la base de datos de los granos seleccionados de una muestra concreta, es decir, las coordenadas angulares y cartesianas de los ejes ópticos de cada grano, del plano de asociación, del eje de hemitropía y el ángulo PA-EH. Una vez elegido el corte, la muestra y la lámina (al igual que se hace para la *Entrada de Datos de Granos*), aparece también un estadillo en la parte izquierda de la pantalla para ver el número de granos existentes en cada lámina (fig.A.13). El programa siempre pedirá el número del grano a partir del cual se desea visualizar la base de datos, y ésta aparecerá en la parte derecha de la pantalla. En todo momento se indica el número del grano al que corresponden los datos que aparecen en pantalla.

DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS									
Begoña Duclos									
PRESENTACION de GRANOS									
Corte : 1 - Almonaster									
Muestra: 2									
Lamina: 1									
Clave : B-.0601- 2- 1									
MUESTRAS y GRANOS por LAMINAS									
N	L1	L2	L3	N	L1	L2	L3		
1				13					
2	87	99	99	14	67	76	99		
3				15	90	99	99		
4	90	99	99	16	16	99	99		
5				17					
6				18					
7	99	99	99	19					
8				20					
9				21					
10				22					
11	75	66	99	23					
12				24					
Total Granos en Corte: 1054									
¿ CONTINUA ? - S/N -									

Fig.A.13. Base de datos de los granos seleccionados, uno a uno, a partir de una lámina y muestra del corte elegido En la parte izquierda: mismo estadillo que en la fig.A.10. En la parte derecha: la base de datos (presenta el mismo formato que la pantalla de Entrada de Datos de la fig.A.11), con las coordenadas angulares y cartesianas de los ejes ópticos de cada individuo, el plano de asociación, el eje de hemitropía y el ángulo PA/EH.

En caso de pedir que se muestren los datos de un número de granos mayor al número total que contiene la lámina, el programa advierte del error. Igualmente, si se pide que se muestren los datos de una lámina que no contiene ningún dato, aparecerá una advertencia avisando de que se encuentra vacía.

Impresión de Granos

La pantalla es parecida a las anteriores, pero con el título *Impresión de Granos* (fig.A.14). Es necesario tener encendida y preparada la impresora, porque en caso contrario el programa lo detectará como un error y finalizará devolviéndonos a Windows. La elección de granos se hará de igual manera que en la *Presentación de Granos en pantalla*. Se imprimirán los datos de un máximo de tres granos por folio, en página numeradas y con la fecha del día de la impresión correspondiente.

DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS									
Begoña Duclos									
IMPRESION de GRANOS									
Corte : 1 - Almonaster									
Muestra: 2									
Lamina: 2									
Clave : B-.0601- 2- 2									
MUESTRAS y GRANOS por LAMINAS									
N	L1	L2	L3	N	L1	L2	L3		
1				13					
2	87	99	99	14	67	76	99		
3				15	90	99	99		
4	90	99	99	16	16	99	99		
5				17					
6				18					
7	99	99	99	19					
8				20					
9				21					
10				22					
11	75	66	99	23					
12				24					
Total Granos en Corte: 1054									
Datos de Granos 2 al 99 GRANO actual:									
PREPARE la IMPRESORA									
Pulse INTRO									
ESPERE. La impresion tarda unos segundos_									

Fig.A.14. Pantalla correspondiente a la opción de Impresión de Granos. Para que el programa no se cierre de forma inesperada, la impresora deberá estar preparada. Aparecerá a tal efecto, como recordatorio, un mensaje de aviso parpadeante.

Borrado de archivos

La pantalla correspondiente a esta opción se puede ver en la fig.A.15. Es necesario introducir una *clave* de seguridad para evitar borrar los archivos accidentalmente. Después de introducir la *clave* correcta, el programa da la opción de elegir el corte, pregunta al usuario si está seguro de querer borrar los archivos del corte elegido, e incluso volverá a pedir una confirmación para mayor seguridad.

Los datos de una muestra no se pueden borrar selectivamente, sino que quedarán borrados todos los de corte. El corte eliminado quedará gráficamente tachado (fig.A.16) y a continuación se pasará al menú *Otras Opciones* de la fig.A.10.



Fig.A.15. Opción de Borrado donde se elige cuál de los tres cortes desea eliminar. La opción 4 del menú nos devuelve al menú principal del programa. Por seguridad, deberá introducirse la clave de borrado y el programa pedirá al usuario confirmación para eliminar el corte seleccionado. Una vez eliminado el corte, quedarán eliminados todos sus archivos.



Fig.A.16. Cuando se eliminan los archivos de un corte aparece en la pantalla una sucesión de "XXXX" para indicarlo (en este caso, el corte 1 que corresponde a Almonaster la Real). La eliminación de archivos es irre recuperable y aunque también puede realizarse desde el Explorador de Windows, no es aconsejable manipular manualmente la base de datos.

Resumen Estadístico

Si se elige esta opción se pasa a la pantalla de la fig.A.17, donde se solicita el corte (1: Almonaster, 2: Veredas, 3: Aracena) y el número de muestra de dicho corte cuyo resumen estadístico se desea ver. Tras ello, el programa indica el total de granos de las tres láminas de la muestra seleccionada.

DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS			
Begoña Duclos			
RESUMEN ESTADISTICO por MUESTRA: TIPOS de MACLA y % An			
MUESTRAS y GRANOS			
M	G	M	G
1		13	
2	205	14	242
3		15	288
4	288	16	214
5		17	
6		18	
7	237	19	
8		20	
9		21	
10		22	
11	240	23	
12		24	

Indique Corte: 1 (Almonaster)

Nº de Muestra: 2 (B-.0601- 2)

Total Granos en la Muestra: 285

INTRO continua_

Fig.A.17. Petición del corte y del número de la muestra para mostrar la estadística. En la parte izquierda aparece un estadiño de ayuda para ver qué muestras presentan datos de granos y cuales no.

La estadística consiste en presentar el número de granos de la muestra (y su porcentaje respecto al total) que se ajustan a los distintos tipos de maclas, ordenadas por ley normal y por ley paralela o compleja. También presenta el porcentaje de granos que ajusta a cada tipo de composición de plagioclasa (fig.A.18). Esta pantalla de estadística da la opción de imprimir los resultados, tal y como se indica en su parte inferior derecha.

DETERMINACION DE LA O.C.P. COMPLETA DE LAS PLAGIOCLASAS			
Begoña Duclos			
RESUMEN ESTADISTICO por MUESTRA: TIPOS de MACLA y % An			
Corte: Almonaster		Clave: B-.0601- 2	
		Total Granos: 285	
PLANOS	Nº GRANOS	% TOTAL	% An
(001) Kb	40	14.04	0
(010) AcIPcl	38	13.33	
(100) Ala	11	3.86	10
¹ (100) Ab-Ala	35	12.28	
¹ (001) Ab-Kb	19	6.67	30
L.PARALELA o C.	143	50.18	50
(010) Ab	40	14.04	70
(001) Mbach	43	15.09	
(021) Bno D	16	5.61	90
(0-21) Bno I	43	15.09	
L.NORMAL	142	49.82	100

Albita 35 12.28

Oligoclasa 39 13.68

Andesina 80 28.07

Labradorita 66 23.16

Bytownita 35 12.28

Anortita 30 10.53

Si desea IMPRIMIR entre -I-

Fig.A.18. Estadística con la refrencia del corte, número de muestra y el total de granos. A la izquierda: los granos que ajustan a cada macla (y su porcentaje respecto al total), agrupados en ley de macla normal y ley de macla paralela o compleja. A la derecha: los granos según la composición de la plagioclasas, es decir, según los puntos de las curvas de Burri et al. (1967) a los que han ajustado mejor los planos de maclas.

Test de uniformidad de Ajne

Es un test no paramétrico para comprobar si los datos se distribuyen o no de una manera uniforme. Da la opción de elegir corte, muestra y si se desea realizar el test para todos los elementos cristalográficos de una muestra o sólo para uno de ellos. En el primer caso los cálculos pueden tardar varios minutos debido al gran volumen de datos que maneja el programa, indicándose el progreso del mismo en una barra de estado (fig.A.19). Una vez terminados los cálculos, se pasa a la pantalla de la fig.A.20, donde se indica el valor del test para cada elemento cristalográfico y si ha habido ajuste a o no a la uniformidad de Ajne.

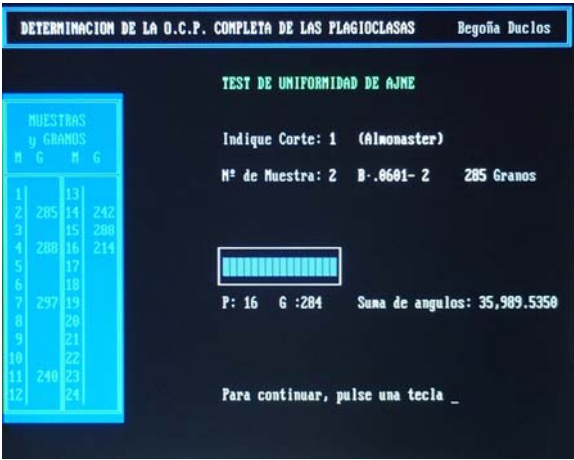


Fig.A.19. Pantalla para la elección del corte y muestra para los que se quiere realizar el test de uniformidad de Ajne. En este caso se ha elegido la muestra 2 (B.0601-2) de Almonaster la Real, y se he decidido hacer el test para el total de los 16 elementos cristalográficos de Burri et al. (1967). Esto queda reflejado debajo de la barra de progreso (P es el número de elementos y G el número total de granos que contiene la muestra para la cual se ha realizado el test). La suma de los ángulos es un parámetro meramente informativo.

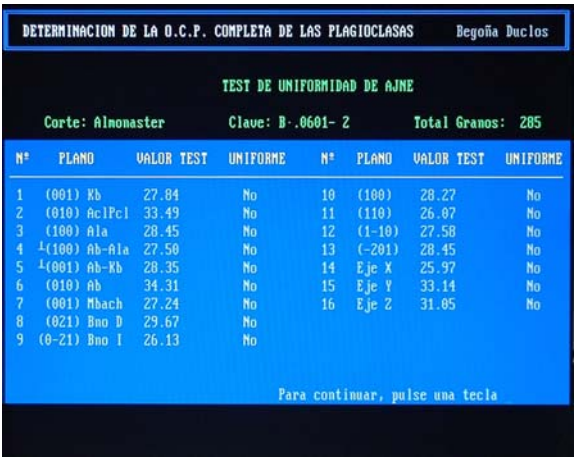


Fig.A.20. Pantalla donde se indican los resultados del test de uniformidad de Ajne para cada uno de los elementos cristalográficos considerados por Burri et al. (1967).

APÉNDICE B

Resultados estadísticos de Almonaster la Real

APÉNDICE B1. Resultados de los test de colatitud y longitud de bondad de ajuste a Watson para las distribuciones bipolar y en corona (Almonaster la Real).

TEST DE BONDAD DE AJUSTE A WATSON (Almonaster la Real)									
DISTRIBUCIÓN BIPOLAR					DISTRIBUCIÓN EN CORONA				

B.0601-2 n=284	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn*	Ajuste
[001]	15.730	-	9.529	-	6.456	-	4.680	si
[010]	15.770	-	2.740	si	5.062	-	25.569	-
[100]	15.798	-	14.803	-	5.659	-	4.243	si
$\perp[100]/(010)$	15.879	-	3.789	si	7.651	-	1.170	si
$\perp[001]/(010)$	16.300	-	12.234	-	5.604	-	1.717	si
(010)	15.904	-	30.691	-	3.542	-	18.165	-
(001)	15.968	-	3.322	si	7.759	-	1.352	si
(021)	16.314	-	3.478	si	6.666	-	6.465	-
(0 $\bar{2}$ 1)	16.505	-	0.382	si	9.717	-	2.233	si
(100)	16.240	-	12.290	-	5.621	-	1.779	si
(110)	16.681	-	1.524	si	9.096	-	1.631	si
(1 $\bar{1}$ 0)	15.920	-	7.958	-	5.880	-	3.701	si
($\bar{2}$ 01)	15.766	-	16.840	-	5.491	-	4.754	si
Ejes X	15.293	-	3.372	si	5.844	-	10.929	-
Ejes Y	13.815	-	13.635	-	5.420	-	6.668	-
Ejes Z	15.766	-	3.628	si	5.880	-	13.290	-

B.0601-4 n=288	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn*	Ajuste
[001]	16.042	-	21.135	-	7.602	-	8.737	-
[010]	14.100	-	1.148	si	4.356	-	101.477	-
[100]	15.790	-	53.192	-	3.691	-	1.848	si
$\perp[100]/(010)$	15.907	-	12.773	-	5.110	-	3.084	si
$\perp[001]/(010)$	16.196	-	26.639	-	4.162	-	7.068	-
(010)	14.243	-	0.873	si	4.343	-	97.242	-
(001)	15.870	-	10.167	-	5.429	-	3.515	si
(021)	15.798	-	2.593	si	4.965	-	34.312	-
(0 $\bar{2}$ 1)	16.775	-	0.777	si	10.246	-	0.445	si
(100)	16.151	-	24.634	-	4.265	-	7.138	-
(110)	16.437	-	5.274	si	7.700	-	0.053	si
(1 $\bar{1}$ 0)	15.643	-	16.070	-	4.666	-	4.891	si
($\bar{2}$ 01)	16.269	-	61.928	-	2.847	-	0.694	si
Ejes X	16.745	-	2.608	si	8.598	-	0.505	si
Ejes Y	16.349	-	12.039	-	6.261	-	0.470	si
Ejes Z	15.915	-	0.056	si	7.234	-	22.251	-

(continúa)

TEST DE BONDAD DE AJUSTE A WATSON (Almonaster la Real)							
DISTRIBUCIÓN BIPOLAR				DISTRIBUCIÓN EN CORONA			

B.0601-7 n=297	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn*	Ajuste
[001]	16.842	-	7.362	-	7.156	-	0.146	si
[010]	16.097	-	21.088	-	4.302	-	9.076	-
[100]	16.311	-	3.586	si	6.094	-	14.472	-
$\perp[100]/(010)$	16.931	-	2.829	si	8.600	-	0.559	si
$\perp[001]/(010)$	16.388	-	1.941	si	6.626	-	14.200	-
(010)	15.557	-	4.364	si	4.465	-	57.608	-
(001)	16.844	-	1.994	si	9.069	-	0.668	si
(021)	16.715	-	24.813	-	4.858	-	5.106	si
(0 $\bar{2}$ 1)	17.207	-	0.405	si	11.107	-	1.191	si
(100)	16.475	-	12.133	-	5.265	-	4.996	si
(110)	16.948	-	0.020	si	10.514	-	4.208	si
(1 $\bar{1}$ 0)	16.760	-	0.522	si	8.766	-	5.723	si
($\bar{2}$ 01)	16.568	-	4.163	si	6.169	-	12.316	-
Ejes X	16.790	-	10.778	-	5.866	-	1.419	si
Ejes Y	16.444	-	0.106	si	9.552	-	5.770	si
Ejes Z	17.037	-	1.998	si	9.465	-	0.435	si

B.0601-11 n=240	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn*	Ajuste
[001]	14.489	-	5.669	si	5.674	-	6.351	-
[010]	13.704	-	11.521	-	4.085	-	199.723	-
[100]	14.751	-	26.145	-	3.603	-	29.224	-
$\perp[100]/(010)$	15.234	-	1.568	si	8.056	-	1.154	si
$\perp[001]/(010)$	14.808	-	21.449	-	4.075	-	2.476	si
(010)	13.514	-	12.052	-	3.921	-	342.979	-
(001)	15.167	-	0.758	si	8.898	-	0.992	si
(021)	14.102	-	4.963	si	4.437	-	133.504	-
(0 $\bar{2}$ 1)	15.115	-	0.708	si	8.443	-	2.135	si
(100)	14.900	-	21.249	-	4.193	-	2.498	si
(110)	15.413	-	1.566	si	8.390	-	0.462	si
(1 $\bar{1}$ 0)	14.927	-	7.320	-	5.809	-	3.057	si
($\bar{2}$ 01)	14.221	-	28.971	-	3.390	-	40.623	-
Ejes X	14.040	-	2.416	si	5.072	-	49.297	-
Ejes Y	14.814	-	1.660	si	7.742	-	1.781	si
Ejes Z	14.476	-	7.425	-	4.957	-	8.750	-

(continúa)

TEST DE BONDAD DE AJUSTE A WATSON (Almonaster la Real)							
DISTRIBUCIÓN BIPOLAR				DISTRIBUCIÓN EN CORONA			

B.0601-14 n=242	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn*	Ajuste
[001]	15.200	-	8.499	-	5.786	-	0.317	si
[010]	14.188	-	0.985	si	4.615	-	36.042	-
[100]	15.186	-	36.483	-	3.841	-	0.193	si
$\perp[100]/(010)$	14.808	-	5.454	si	5.693	-	2.570	si
$\perp[001]/(010)$	14.181	-	22.917	-	4.038	-	3.584	si
(010)	14.285	-	1.240	si	4.563	-	35.226	-
(001)	14.833	-	4.195	si	6.050	-	2.710	si
(021)	14.666	-	4.633	si	4.849	-	13.589	-
(0 $\bar{2}$ 1)	15.118	-	0.611	si	8.207	-	2.811	si
(100)	14.190	-	22.972	-	3.994	-	3.296	si
(110)	14.990	-	1.970	si	7.015	-	3.700	si
(1 $\bar{1}$ 0)	14.337	-	7.600	-	4.619	-	8.326	-
($\bar{2}$ 01)	15.076	-	24.505	-	3.942	-	0.384	si
Ejes X	13.318	-	46.558	-	4.552	-	1.343	si
Ejes Y	15.009	-	0.882	si	7.183	-	5.631	si
Ejes Z	14.674	-	4.462	si	5.053	-	8.740	-

B.0601-15 n=288	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn*	Ajuste
[001]	15.975	-	14.461	-	5.551	-	2.157	si
[010]	15.069	-	48.487	-	3.371	-	13.815	-
[100]	15.164	-	3.630	si	4.880	-	34.357	-
$\perp[100]/(010)$	16.441	-	4.421	si	7.024	-	2.194	si
$\perp[001]/(010)$	15.541	-	3.849	si	5.691	-	13.506	-
(010)	14.688	-	56.091	-	3.273	-	14.573	-
(001)	16.488	-	3.527	si	7.335	-	2.404	si
(021)	16.118	-	46.554	-	3.864	-	4.054	si
(0 $\bar{2}$ 1)	16.776	-	0.689	si	10.214	-	0.622	si
(100)	15.582	-	3.620	si	5.735	-	13.653	-
(110)	16.030	-	2.457	si	8.442	-	0.906	si
(1 $\bar{1}$ 0)	16.329	-	2.916	si	7.028	-	5.419	si
($\bar{2}$ 01)	16.058	-	27.542	-	3.420	-	9.714	-
Ejes X	16.042	-	28.002	-	4.243	-	7.003	-
Ejes Y	16.751	-	2.232	si	8.058	-	1.289	si
Ejes Z	14.720	-	13.899	-	4.261	-	29.148	-

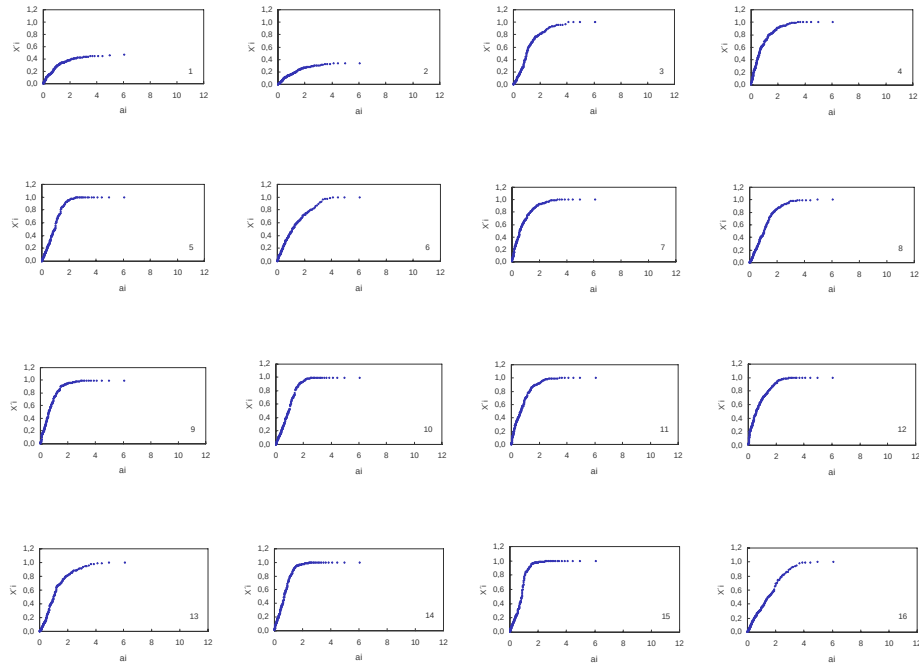
(continúa)

TEST DE BONDAD DE AJUSTE A WATSON (Almonaster la Real)								
DISTRIBUCIÓN BIPOLAR					DISTRIBUCIÓN EN CORONA			
B.0601-16 n=213	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn *	Ajuste
[001]	12.264	-	10.625	-	9.500	-	7.253	-
[010]	8.552	-	34.977	-	9.834	-	56.573	-
[100]	10.206	-	48.633	-	3.425	-	58.147	-
$\perp$ [100]/(010)	13.549	-	0.388	si	5.124	-	24.534	-
$\perp$ [001]/(010)	11.748	-	32.398	-	2.937	-	33.699	-
(010)	11.072	-	32.833	-	2.934	-	57.818	-
(001)	13.685	-	1.443	si	5.146	-	19.223	-
(021)	10.859	-	24.815	-	3.168	-	60.449	-
(0 $\bar{2}$ 1)	13.535	-	3.182	si	4.250	-	16.926	-
(100)	11.814	-	30.755	-	3.025	-	35.264	-
(110)	13.907	-	8.556	-	3.619	-	15.203	-
(1 $\bar{1}$ 0)	13.993	-	24.411	-	3.739	-	6.598	-
($\bar{2}$ 01)	10.335	-	51.765	-	3.482	-	53.788	-
Ejes X	13.726	-	31.141	-	3.073	-	8.556	-
Ejes Y	12.623	-	40.194	-	2.948	-	14.903	-
Ejes Z	9.933	-	4.380	si	3.224	-	129.945	-

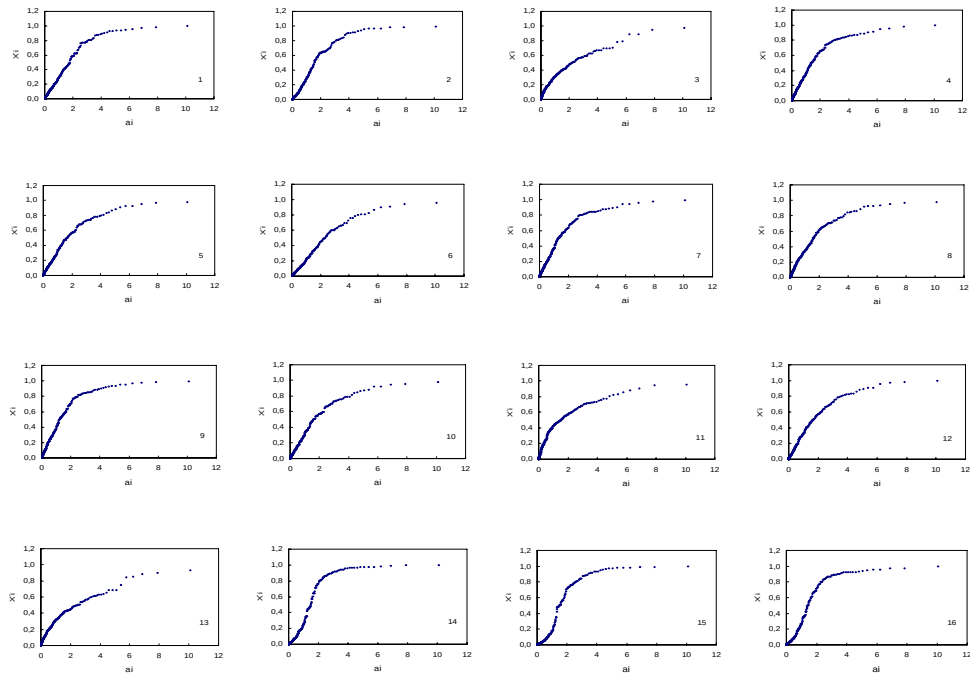
APÉNDICE B2. Gráficos de colatitud para todos los elementos cristalográficos y muestras del corte de Almonaster la Real, tanto para la distribución bipolar como para la de corona. Los números en la parte interior de cada gráfico hacen referencia a los siguientes elementos cristalográficos: 1. [001], 2. [010], 3. [100], 4. $\perp[100]/(010)$, 5. $\perp[001]/(010)$, 6. (010), 7. (001), 8. (021), 9. $(0\bar{2}1)$, 10. (100), 11. (110), 12. $(1\bar{1}0)$, 13. $(\bar{2}01)$, 14. Ejes X, 15. Ejes Y, 16. Ejes Z.

B.0601-2

Distribución Bipolar

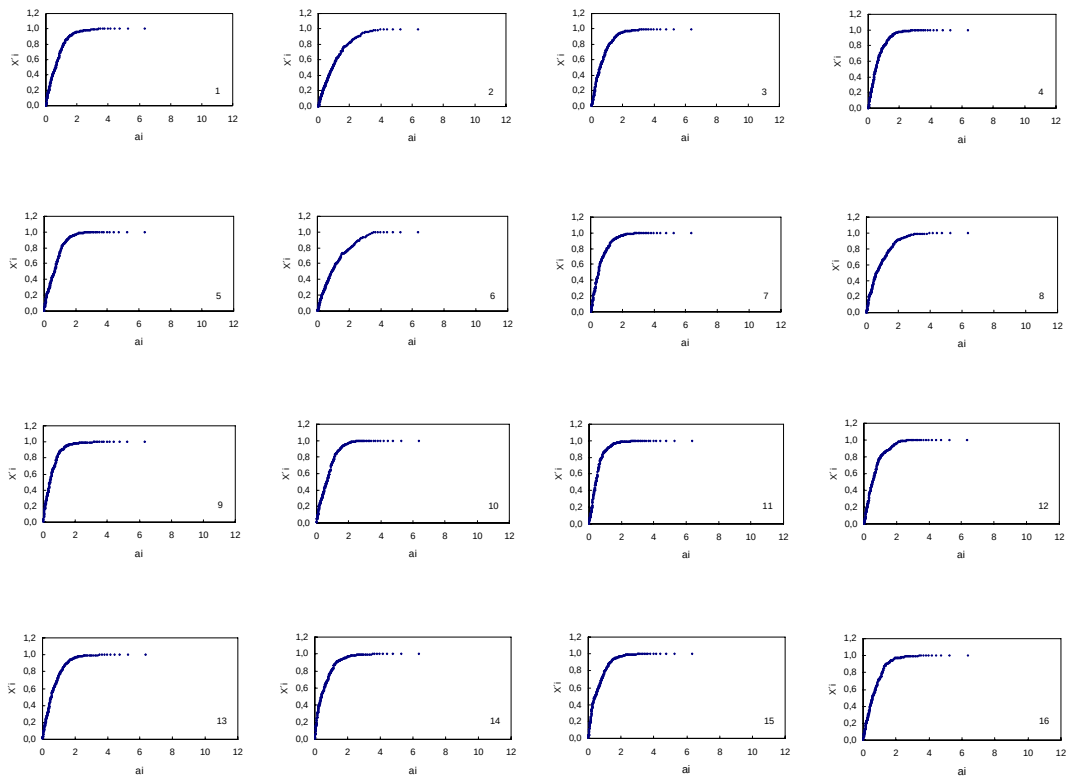


Distribución en corona

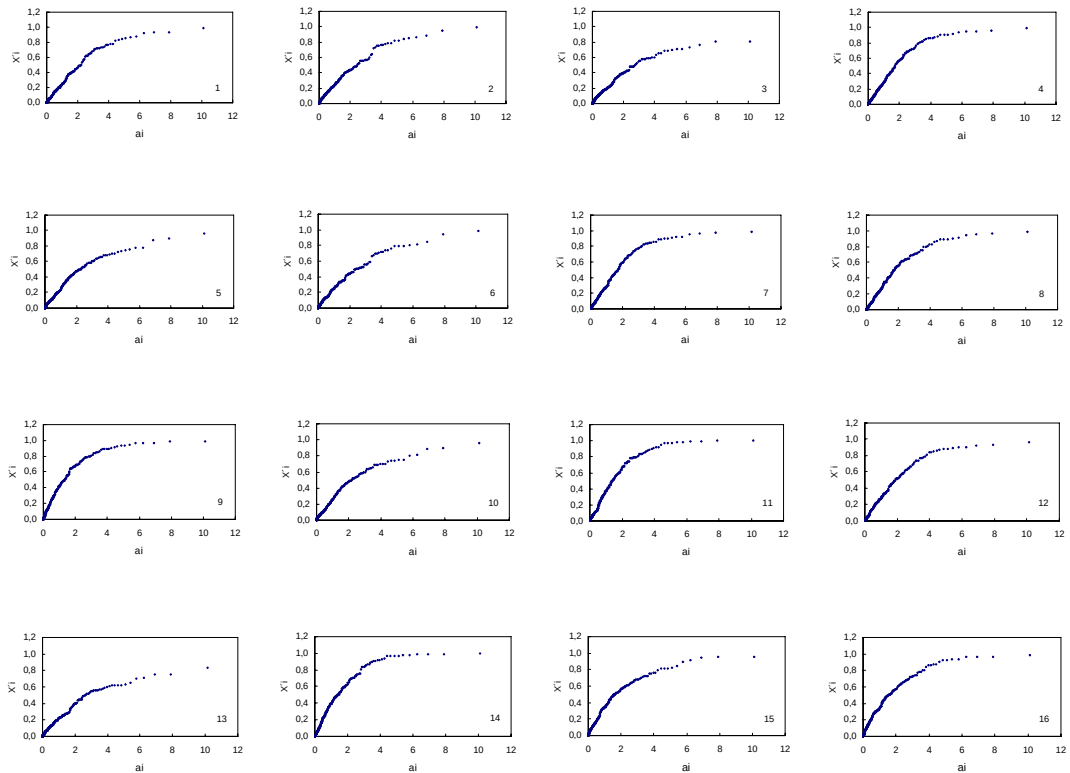


B.0601-4

Distribución Bipolar

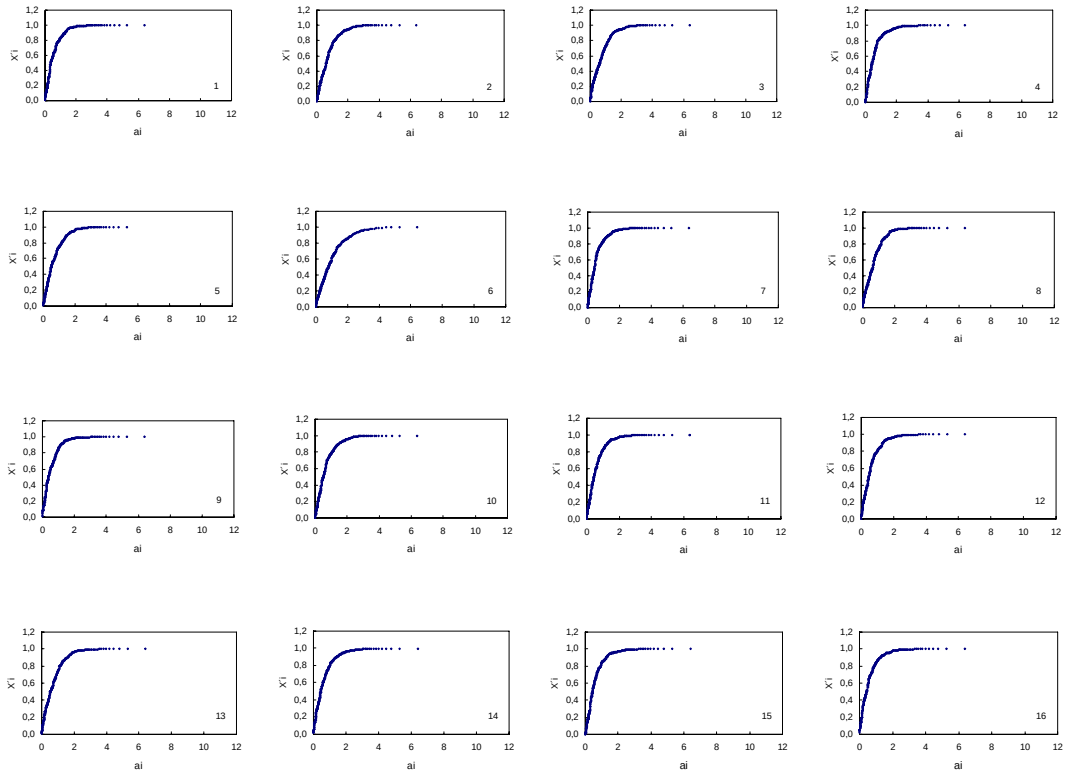


Distribución en corona

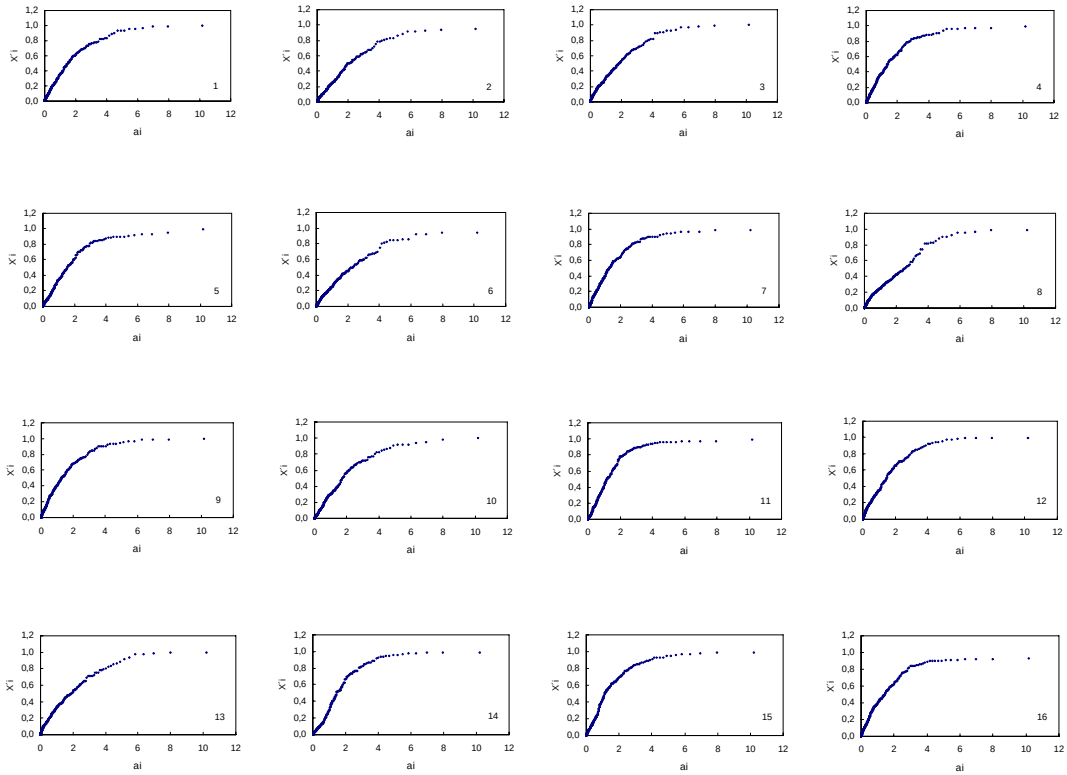


B.0601-7

Distribución Bipolar

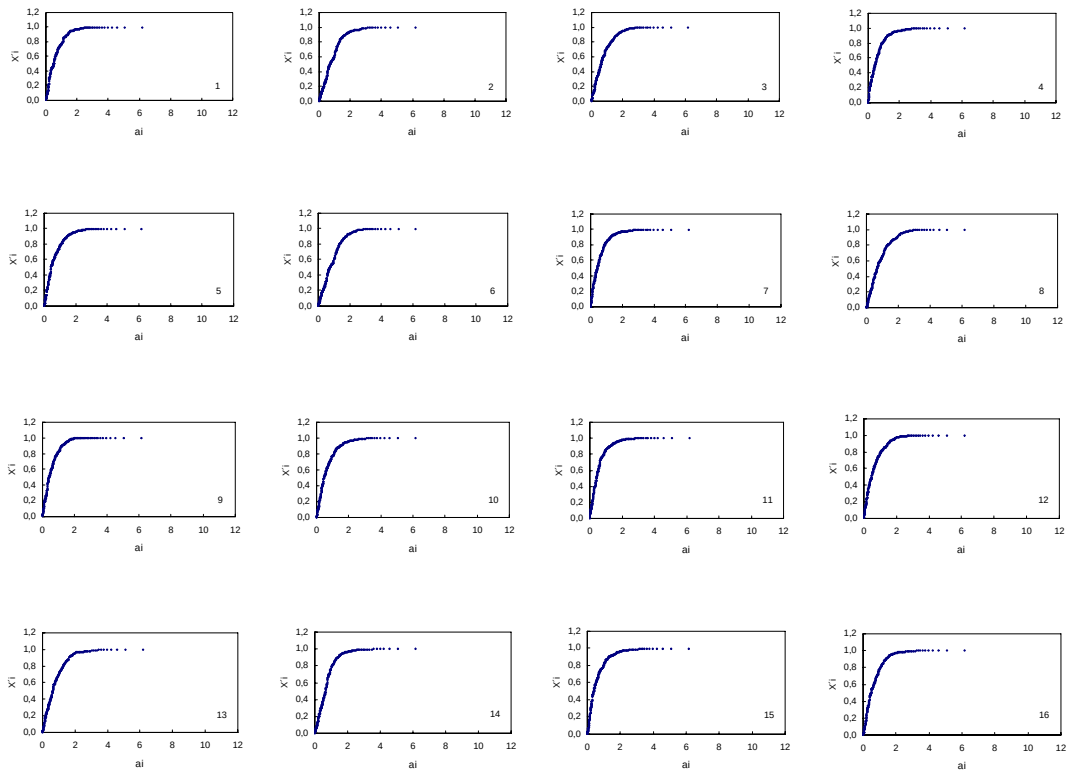


Distribución en corona

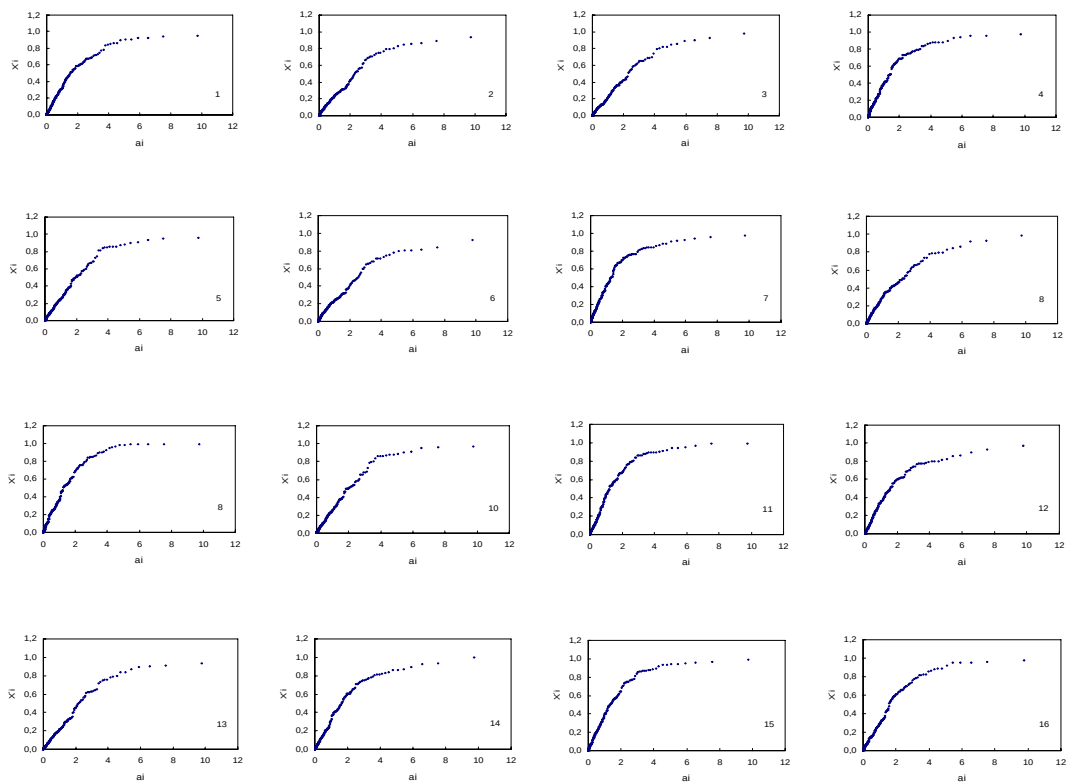


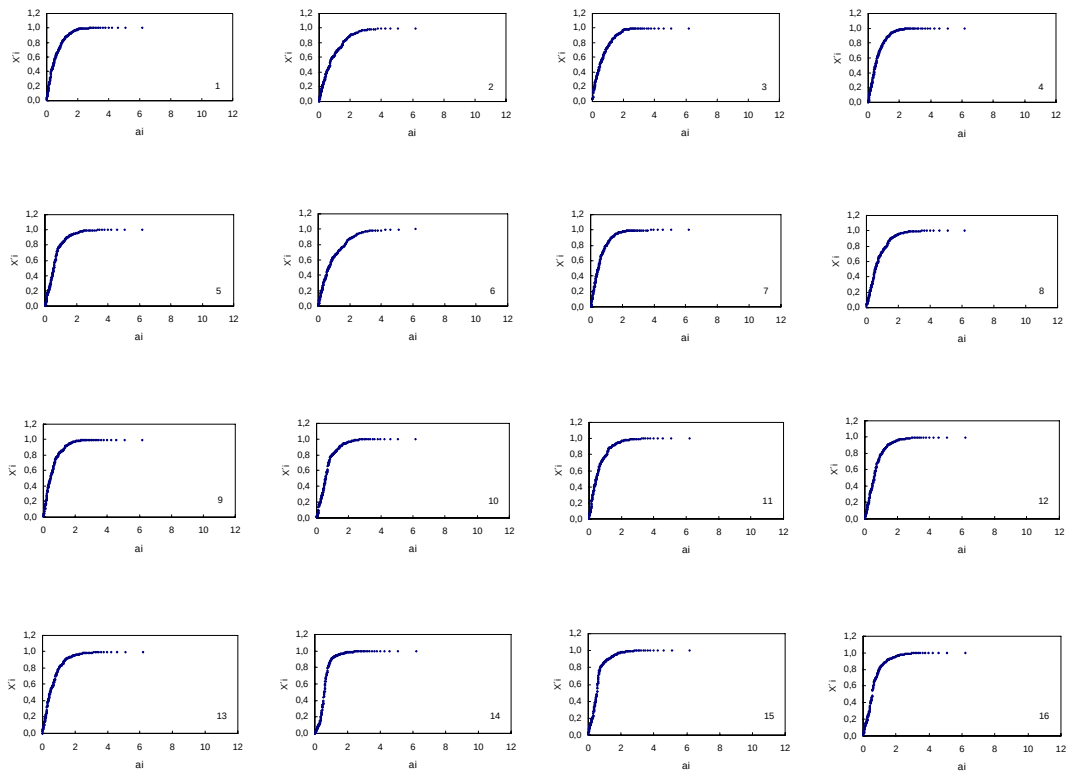
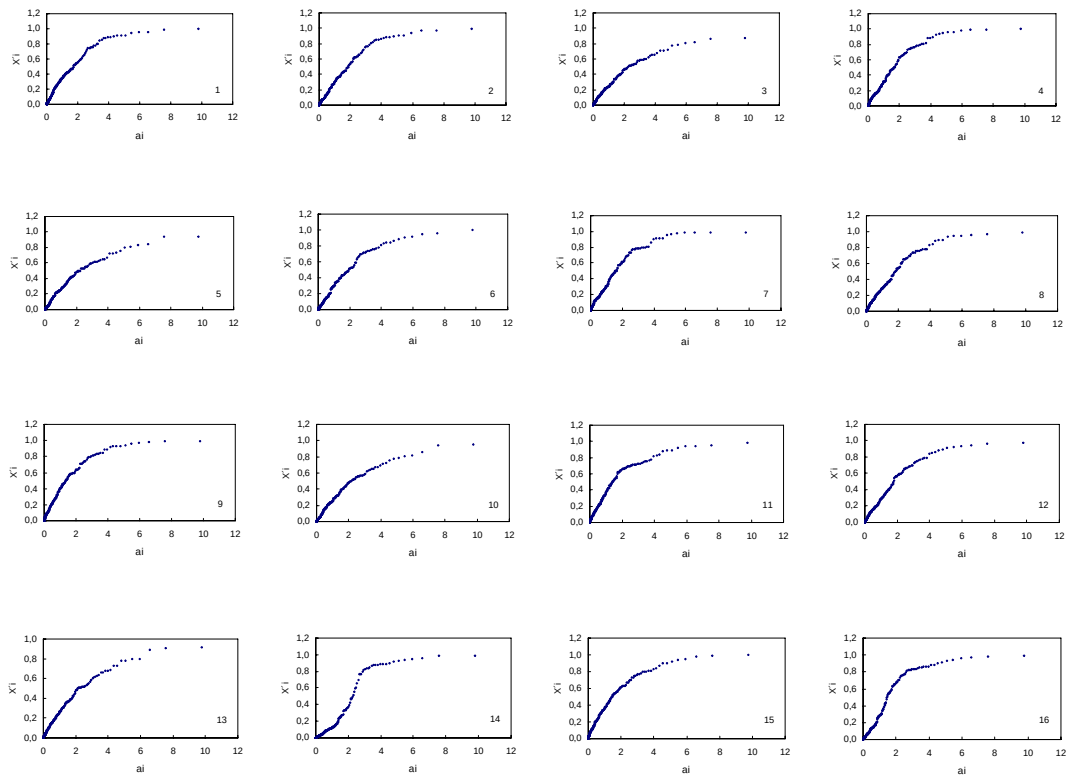
B.0601-11

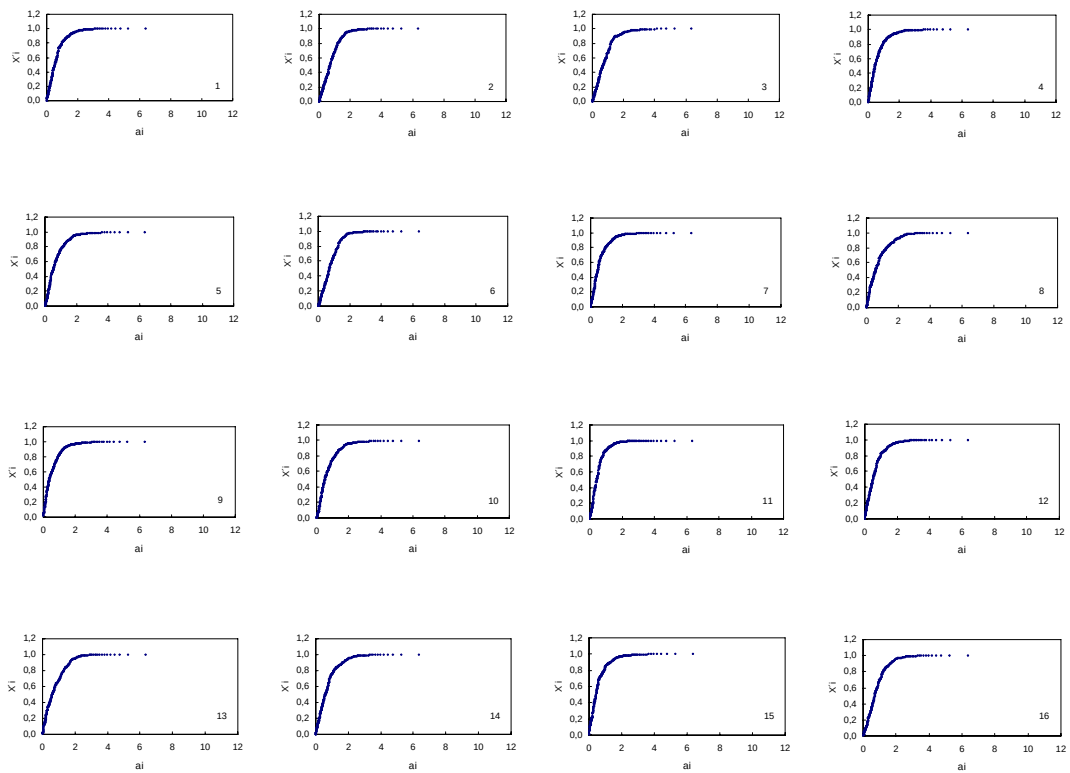
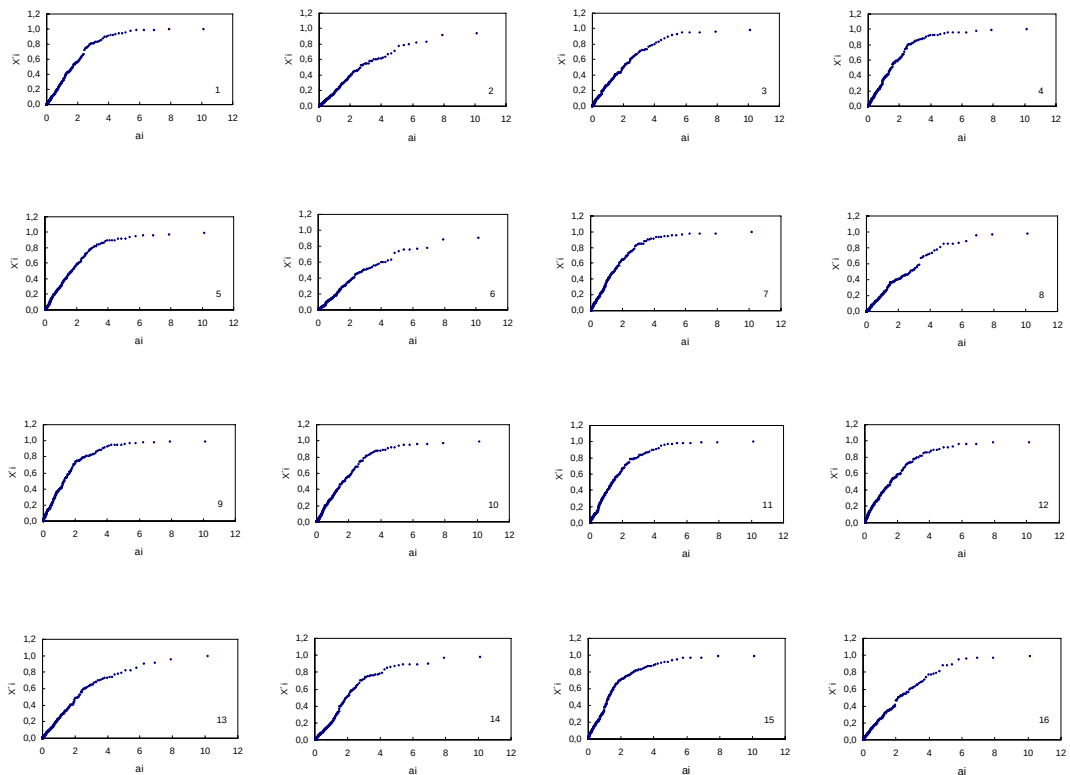
Distribución Bipolar



Distribución en corona

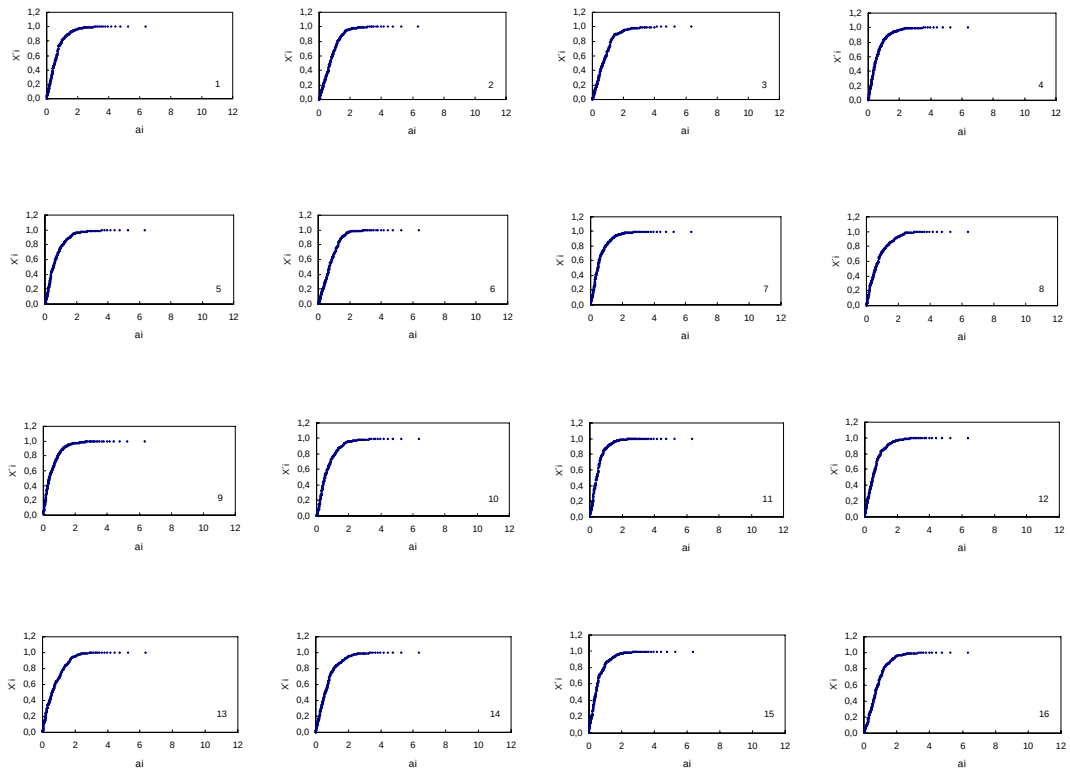


B.0601-14*Distribución Bipolar**Distribución en corona*

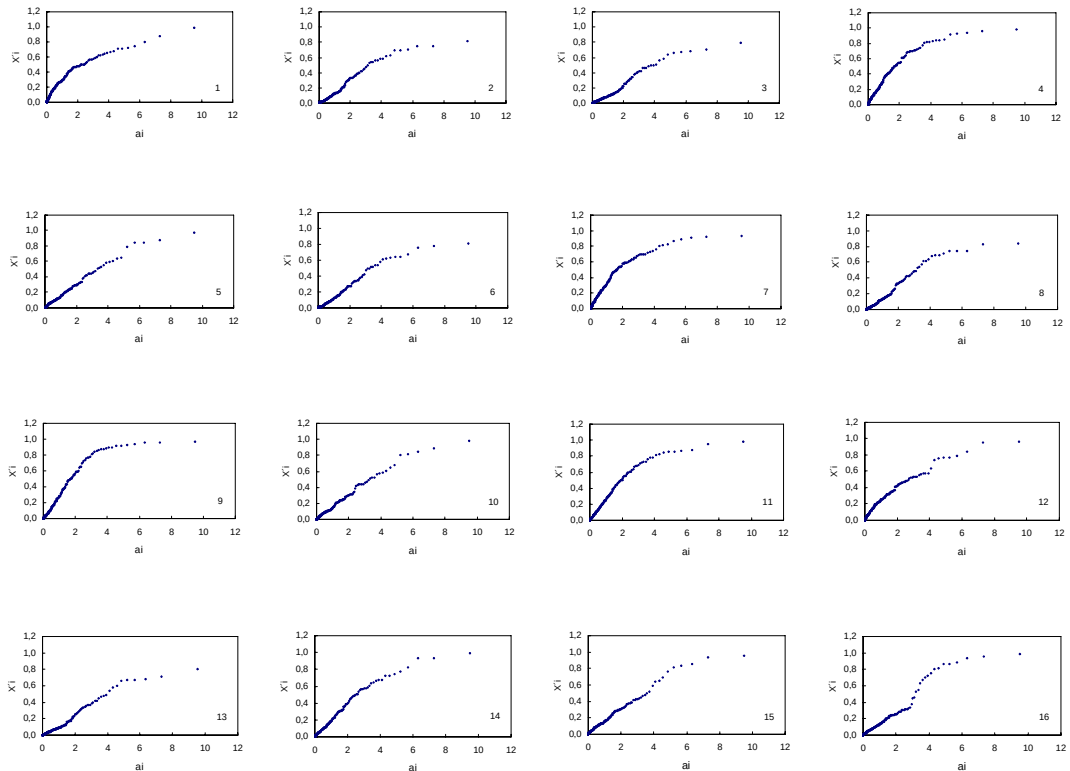
B.0601-15*Distribución Bipolar**Distribución en corona*

B.0601-16

Distribución Bipolar



Distribución en corona



APÉNDICE B3. Resultados del estadístico del test de uniformidad no paramétrico de Ajne para Almonaster la Real. Se representan los datos dados por el programa *PLAG-9* (A_n), así como los valores normalizados (A_n/n) con los que hemos trabajado a efectos de los cálculos estadísticos y representaciones gráficas.

TEST DE UNIFORMIDAD DE AJNE (PLAG-9) - Almonaster la Real

B.0601-2 n=284	AJNE An	Uniformidad ($A_n < 8.9$)	AJNE NORMA. An/n
[001]	27.74	-	0.0970
[010]	33.32	-	0.1165
[100]	28.33	-	0.0991
$\perp[100]/(010)$	27.41	-	0.0958
$\perp[001]/(010)$	28.24	-	0.0987
(010)	34.15	-	0.1194
(001)	27.15	-	0.0949
(021)	29.60	-	0.1035
(0 $\bar{2}$ 1)	26.05	-	0.0911
(100)	28.16	-	0.0985
(110)	25.98	-	0.0908
(1 $\bar{1}$ 0)	27.50	-	0.0962
($\bar{2}$ 01)	28.33	-	0.0991
Eje X	25.87	-	0.0905
Eje Y	32.98	-	0.1153
Eje Z	30.94	-	0.1082

B.0601-04 n=288	AJNE An	Uniformidad ($A_n < 8.9$)	AJNE NORMA. An/n
[001]	27.91	-	0.0969
[010]	33.94	-	0.1178
[100]	29.80	-	0.1035
$\perp[100]/(010)$	27.22	-	0.0945
$\perp[001]/(010)$	28.83	-	0.1001
(010)	34.53	-	0.1199
(001)	27.10	-	0.0941
(021)	29.69	-	0.1031
(0 $\bar{2}$ 1)	27.17	-	0.0943
(100)	28.71	-	0.0997
(110)	26.17	-	0.0909
(1 $\bar{1}$ 0)	27.93	-	0.0970
($\bar{2}$ 01)	29.97	-	0.1041
Eje X	26.38	-	0.0916
Eje Y	29.74	-	0.1033
Eje Z	29.34	-	0.1019

B.0601-7 n=297	AJNE An	Uniformidad ($A_n < 8.9$)	AJNE NORMA. An/n
[001]	28.10	-	0.0946
[010]	33.01	-	0.1111
[100]	30.41	-	0.1024
$\perp[100]/(010)$	27.64	-	0.0931
$\perp[001]/(010)$	29.64	-	0.0998
(010)	34.01	-	0.1145
(001)	27.47	-	0.0925
(021)	32.48	-	0.1094
(0 $\bar{2}$ 1)	27.31	-	0.0920
(100)	29.54	-	0.0995
(110)	27.02	-	0.0910
(1 $\bar{1}$ 0)	28.71	-	0.0967
($\bar{2}$ 01)	30.34	-	0.1022
Eje X	28.57	-	0.0962
Eje Y	27.35	-	0.0921
Eje Z	30.16	-	0.1015

B.0601-11 n= 240	AJNE An	Uniformidad ($A_n < 8.9$)	AJNE NORMA. An/n
[001]	22.92	-	0.0955
[010]	26.57	-	0.1107
[100]	24.30	-	0.1013
$\perp[100]/(010)$	22.78	-	0.0949
$\perp[001]/(010)$	23.57	-	0.0982
(010)	27.19	-	0.1133
(001)	22.63	-	0.0943
(021)	25.11	-	0.1046
(0 $\bar{2}$ 1)	22.05	-	0.0919
(100)	23.50	-	0.0979
(110)	22.00	-	0.0917
(1 $\bar{1}$ 0)	23.20	-	0.0967
($\bar{2}$ 01)	24.46	-	0.1019
Eje X	23.95	-	0.0998
Eje Y	22.01	-	0.0917
Eje Z	23.84	-	0.0993

(continúa)

TEST DE UNIFORMIDAD DE AJNE (PLAG-9) - Almonaster la Real

B.0601-14 n=242	AJNE		AJNE
	An	Uniformidad (An < 8.9)	NORMA. An/n
[001]	23.08	-	0.0954
[010]	27.21	-	0.1124
[100]	24.41	-	0.1009
⊥[100]/(010)	22.97	-	0.0949
⊥[001]/(010)	23.88	-	0.0987
(010)	27.72	-	0.1145
(001)	22.83	-	0.0943
(021)	25.10	-	0.1037
(0 $\bar{2}$ 1)	22.24	-	0.0919
(100)	23.81	-	0.0984
(110)	22.20	-	0.0917
(1 $\bar{1}$ 0)	23.14	-	0.0956
($\bar{2}$ 01)	24.47	-	0.1011
Eje X	22.39	-	0.0925
Eje Y	23.95	-	0.0990
Eje Z	25.48	-	0.1053

B.0601-15 n=288	AJNE		AJNE
	An	Uniformidad (An < 8.9)	NORMA. An/n
[001]	28.11	-	0.0976
[010]	34.16	-	0.1186
[100]	31.32	-	0.1088
⊥[100]/(010)	27.64	-	0.0960
⊥[001]/(010)	29.28	-	0.1017
(010)	35.25	-	0.1224
(001)	27.47	-	0.0954
(021)	32.00	-	0.1111
(0 $\bar{2}$ 1)	26.50	-	0.0920
(100)	29.19	-	0.1014
(110)	26.63	-	0.0925
(1 $\bar{1}$ 0)	27.86	-	0.0967
($\bar{2}$ 01)	31.43	-	0.1091
Eje X	28.12	-	0.0976
Eje Y	29.01	-	0.1007
Eje Z	30.42	-	0.1056

B.0601-16 n=213	AJNE		AJNE
	An	Uniformidad (An < 8.9)	NORMA. An/n
[001]	20.22	-	0.0949
[010]	24.43	-	0.1147
[100]	24.95	-	0.1171
⊥[100]/(010)	20.26	-	0.0951
⊥[001]/(010)	22.81	-	0.1071
(010)	25.16	-	0.1181
(001)	20.17	-	0.0947
(021)	24.47	-	0.1149
(0 $\bar{2}$ 1)	20.09	-	0.0943
(100)	22.82	-	0.1071
(110)	20.58	-	0.0966
(1 $\bar{1}$ 0)	20.69	-	0.0971
($\bar{2}$ 01)	24.78	-	0.1163
Eje X	21.46	-	0.1008
Eje Y	21.65	-	0.1016
Eje Z	26.96	-	0.1266

APÉNDICE B4. Test de uniformidad de Bingham para las muestras de Almonaster la Real. Resultados de los autovectores y autovalores normalizados, valor del estadístico (Su) y el ajuste (según el valor crítico 11.07) a la uniformidad de cada uno de los elementos cristalográficos de las muestras estudiadas. A la derecha, la relación logarítmica entre los autovalores de cada elemento para su representación en los diagramas de Woodcock.

TEST DE UNIFORMIDAD DE BINGHAM (Almonaster la Real)	WOODCOCK

B.0601-2 n=284	Autovalores normalizados			Autovectores		Bingham Uniformidad		Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.	Su	Su<11.07	$\text{Ln}(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln}(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.4106	0.3382	0.2512	190.9	50.6	27.33	-	0.2974	0.1940
[010]	0.4612	0.2906	0.2482	73.2	38.4	54.53	-	0.1577	0.4619
[100]	0.4148	0.3465	0.2387	159.1	3.8	33.82	-	0.3727	0.1799
$\perp[100]/(010)$	0.3756	0.3407	0.2837	237.8	61.7	9.23	si	0.1831	0.0975
$\perp[001]/(010)$	0.3954	0.3519	0.2527	331.1	15.3	22.95	-	0.3311	0.1166
(010)	0.4800	0.3296	0.1904	31.4	39.2	89.99	-	0.5488	0.3759
(001)	0.3761	0.3386	0.2852	234.4	60.2	8.95	si	0.1716	0.1050
(021)	0.4058	0.3231	0.2711	68.9	35.3	19.80	-	0.1755	0.2279
(0 $\bar{2}$ 1)	0.3710	0.3236	0.3053	21.7	65.6	4.93	si	0.0582	0.1367
(100)	0.3960	0.3517	0.2523	331.6	14.8	23.23	-	0.3322	0.1186
(110)	0.3717	0.3318	0.2964	85.6	8.0	6.09	si	0.1128	0.1136
(1 $\bar{1}$ 0)	0.4025	0.3390	0.2585	331.3	25.4	22.34	-	0.2711	0.1717
($\bar{2}$ 01)	0.4201	0.3474	0.2324	161.8	9.3	38.43	-	0.4020	0.1900
Eje X	0.4254	0.3133	0.2613	309.3	74.9	30.17	-	0.1815	0.3059
Eje Y	0.4294	0.3394	0.2312	75.8	3.8	42.25	-	0.3839	0.2352
Eje Z	0.4330	0.3096	0.2574	168.3	33.0	34.88	-	0.1846	0.3355

B.0601-4 n=288	Autovalores normalizados			Autovectores		Bingham Uniformidad		Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.	Su	Su<11.07	$\text{Ln}(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln}(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.4415	0.3407	0.2179	296.5	34.6	54.17	-	0.4470	0.2592
[010]	0.5767	0.2326	0.2107	53.1	32.8	182.33	-	0.0989	0.9080
[100]	0.4308	0.3834	0.1858	186.0	47.7	72.95	-	0.7244	0.1166
$\perp[100]/(010)$	0.4059	0.3474	0.2467	294.3	28.3	28.01	-	0.3423	0.1556
$\perp[001]/(010)$	0.4400	0.3493	0.2108	179.5	38.3	57.56	-	0.5050	0.2308
(010)	0.5650	0.2276	0.2074	53.5	33.3	174.33	-	0.0929	0.9092
(001)	0.4047	0.3426	0.2527	294.7	27.5	25.23	-	0.3044	0.1666
(021)	0.4772	0.2815	0.2413	58.4	36.3	68.81	-	0.1541	0.5278
(0 $\bar{2}$ 1)	0.3559	0.3351	0.3089	237.7	9.8	2.40	si	0.0814	0.0602
(100)	0.4384	0.3475	0.2141	179.2	38.5	54.99	-	0.4843	0.2324
(110)	0.3612	0.3538	0.2850	151.6	63.2	7.63	si	0.2162	0.0207
(1 $\bar{1}$ 0)	0.4197	0.3455	0.2348	176.1	30.6	37.40	-	0.3863	0.1945
($\bar{2}$ 01)	0.4244	0.3952	0.1803	203.1	56.6	76.77	-	0.7848	0.0713
Eje X	0.3640	0.3414	0.2945	132.8	30.5	5.43	si	0.1478	0.0641
Eje Y	0.3813	0.3590	0.2597	243.1	34.5	18.10	-	0.3238	0.0603
Eje Z	0.4360	0.2852	0.2788	14.1	54.0	34.20	-	0.0227	0.4245

(continúa)

TEST DE UNIFORMIDAD DE BINGHAM (Almonaster la Real)	WOODCOCK

B.0601-7 n=297	Autovalores normalizados			Autovectores		Bingham	Uniformidad	Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.	Su	Su<11.07	Ln ($\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3$)	Ln ($\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2$)
[001]	0.3676	0.3555	0.2769	120.4	50.6	10.80	si	0.2499	0.0335
[010]	0.4409	0.3401	0.2191	237.9	36.7	54.94	-	0.4397	0.2596
[100]	0.4314	0.3093	0.2592	86.9	48.7	34.95	-	0.1767	0.3327
$\perp$ [100]/(010)	0.3652	0.3418	0.2930	12.6	37.2	6.05	si	0.1541	0.0662
$\perp$ [001]/(010)	0.4265	0.3054	0.2681	75.4	45.5	30.55	-	0.1303	0.3340
(010)	0.5188	0.2648	0.2165	230.2	30.2	117.49	-	0.2014	0.6725
(001)	0.3640	0.3385	0.2974	5.5	30.0	5.03	si	0.1294	0.0726
(021)	0.4280	0.3526	0.2194	227.0	33.3	49.70	-	0.4744	0.1938
(0 $\bar{2}$ 1)	0.3656	0.3323	0.3141	121.1	34.5	3.15	si	0.0563	0.0955
(100)	0.4139	0.3407	0.2454	47.7	80.1	31.80	-	0.3281	0.1946
(110)	0.3776	0.3137	0.3097	83.6	26.0	6.47	si	0.0128	0.1854
(1 $\bar{1}$ 0)	0.3898	0.3153	0.2950	62.0	51.3	11.10	-	0.0665	0.2121
($\bar{2}$ 01)	0.4264	0.3140	0.2596	89.9	50.3	32.24	-	0.1903	0.3060
Eje X	0.3899	0.3509	0.2592	78.8	30.3	20.06	-	0.3029	0.1054
Eje Y	0.3864	0.3114	0.3021	165.8	3.3	9.52	si	0.0303	0.2158
Eje Z	0.3606	0.3402	0.2992	334.2	32.3	4.36	si	0.1284	0.0582

B.0601-11 n=240	Autovalores normalizados			Autovectores		Bingham	Uniformidad	Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.	Su	Su<11.07	Ln ($\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3$)	Ln ($\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2$)
[001]	0.4021	0.3357	0.2622	210.6	7.4	17.63	-	0.2471	0.1805
[010]	0.4979	0.2974	0.2046	336.5	63.0	80.90	-	0.3740	0.5153
[100]	0.4533	0.3470	0.1997	229.4	8.9	58.39	-	0.5525	0.2672
$\perp$ [100]/(010)	0.3681	0.3359	0.2959	155.0	28.9	4.71	si	0.1268	0.0915
$\perp$ [001]/(010)	0.4068	0.3675	0.2257	240.6	10.8	32.67	-	0.4875	0.1016
(010)	0.5095	0.2918	0.1987	337.5	63.1	91.59	-	0.3843	0.5574
(001)	0.3630	0.3325	0.3045	154.3	30.0	3.08	si	0.0880	0.0878
(021)	0.4840	0.2887	0.2272	346.5	66.0	64.72	-	0.2396	0.5167
(0 $\bar{2}$ 1)	0.3717	0.3277	0.3007	146.3	15.0	4.62	si	0.0860	0.1260
(100)	0.4067	0.3672	0.2261	239.3	11.2	32.45	-	0.4849	0.1022
(110)	0.3605	0.3395	0.3000	150.6	60.9	3.40	si	0.1237	0.0600
(1 $\bar{1}$ 0)	0.3928	0.3455	0.2617	269.5	6.7	15.87	-	0.2778	0.1283
($\bar{2}$ 01)	0.4612	0.3411	0.1877	227.8	7.7	67.71	-	0.5973	0.3017
Eje X	0.4514	0.2972	0.2514	88.7	18.6	39.53	-	0.1674	0.4179
Eje Y	0.3734	0.3338	0.2928	242.6	67.6	5.85	si	0.1311	0.1121
Eje Z	0.4116	0.3360	0.2524	352.1	24.5	22.83	-	0.2861	0.2029

(continúa)

TEST DE UNIFORMIDAD DE BINGHAM (Almonaster la Real)	WOODCOCK

B.0601-14 n=242	Autovalores normalizados			Autovectores		Bingham Uniformidad		Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.	Su	Su<11.07	$\text{Ln}(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln}(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.3784	0.3584	0.2668	146.0	67.2	12.86	-	0.2952	0.0543
[010]	0.4880	0.2693	0.2427	319.0	29.6	65.77	-	0.1040	0.5945
[100]	0.4050	0.3886	0.2064	227.1	20.7	44.11	-	0.6327	0.0413
$\perp[100]/(010)$	0.3957	0.3386	0.2658	41.8	39.1	15.39	-	0.2421	0.1558
$\perp[001]/(010)$	0.4283	0.3580	0.2137	64.5	8.8	43.45	-	0.5160	0.1793
(010)	0.4846	0.2678	0.2375	318.2	29.4	65.99	-	0.1201	0.5931
(001)	0.3939	0.3355	0.2706	41.9	41.7	13.81	-	0.2150	0.1605
(021)	0.4431	0.3098	0.2471	321.9	34.2	36.37	-	0.2261	0.3579
$(0\bar{2}1)$	0.3802	0.3226	0.2979	14.5	19.5	6.47	si	0.0797	0.1643
(100)	0.4265	0.3591	0.2143	64.6	8.7	42.68	-	0.5162	0.1720
(110)	0.3925	0.3255	0.2820	103.1	19.9	11.25	-	0.1435	0.1872
$(1\bar{1}0)$	0.4307	0.3259	0.2434	227.9	5.6	31.99	-	0.2919	0.2788
$(\bar{2}01)$	0.4066	0.3825	0.2110	203.0	40.6	41.29	-	0.5949	0.0611
Eje X	0.4346	0.3890	0.1764	272.5	7.5	68.94	-	0.7908	0.1108
Eje Y	0.3980	0.3158	0.2861	1.1	1.2	12.20	-	0.0988	0.2313
Eje Z	0.4264	0.3187	0.2549	3.4	0.4	27.27	-	0.2234	0.2911

B.0601-15 n=288	Autovalores normalizados			Autovectores		Bingham Uniformidad		Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.	Su	Su<11.07	$\text{Ln}(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln}(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.4113	0.3626	0.2561	59.5	11.9	27.86	-	0.3477	0.1260
[010]	0.4815	0.3490	0.1695	151.9	22.9	105.93	-	0.7222	0.3218
[100]	0.4806	0.2842	0.2353	243.9	8.0	72.82	-	0.1888	0.5254
$\perp[100]/(010)$	0.3856	0.3375	0.2769	31.4	44.5	12.82	-	0.1979	0.1332
$\perp[001]/(010)$	0.4320	0.3107	0.2573	241.8	9.8	34.62	-	0.1886	0.3296
(010)	0.4887	0.3515	0.1597	151.4	22.0	117.97	-	0.7889	0.3295
(001)	0.3848	0.3347	0.2805	24.9	48.2	11.75	-	0.1767	0.1395
(021)	0.4406	0.3701	0.1894	148.8	9.6	72.52	-	0.6699	0.1744
$(0\bar{2}1)$	0.3580	0.3333	0.3088	24.5	43.4	2.61	si	0.0763	0.0715
(100)	0.4318	0.3100	0.2582	241.7	10.0	34.31	-	0.1828	0.3314
(110)	0.3692	0.3387	0.2921	222.7	44.5	6.51	si	0.1480	0.0862
$(1\bar{1}0)$	0.3993	0.3245	0.2762	55.0	1.1	16.62	-	0.1612	0.2074
$(\bar{2}01)$	0.4508	0.3433	0.2059	218.2	10.8	65.10	-	0.5112	0.2724
Eje X	0.4417	0.3500	0.2083	283.2	44.1	59.73	-	0.5190	0.2327
Eje Y	0.3690	0.3324	0.2886	96.0	8.1	7.07	si	0.1413	0.1045
Eje Z	0.4889	0.3032	0.2080	14.9	5.0	88.17	-	0.3769	0.4778

(continúa)

TEST DE UNIFORMIDAD DE BINGHAM (Almonaster la Real)	WOODCOCK

B.0601-16 n=213	Autovalores normalizados			Autovectores		Bingham Uniformidad		Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.	Su	Su<11.07	Ln ($\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3$)	Ln ($\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2$)
[001]	0.4368	0.3326	0.2305	142.2	1.2	34.00	-	0.3667	0.2725
[010]	0.5955	0.2724	0.1321	232.2	15.1	180.42	-	0.7237	0.7821
[100]	0.6127	0.2785	0.1097	37.6	73.3	209.38	-	0.9317	0.7885
$\perp[100]/(010)$	0.4651	0.2767	0.2582	315.4	1.4	41.88	-	0.0692	0.5193
$\perp[001]/(010)$	0.5488	0.3035	0.1478	35.8	70.6	130.58	-	0.7195	0.5924
(010)	0.6170	0.2565	0.1266	232.4	14.8	206.25	-	0.7061	0.8777
(001)	0.4566	0.2897	0.2536	314.5	2.1	37.47	-	0.1331	0.4550
(021)	0.5957	0.2640	0.1403	235.8	13.8	177.17	-	0.6322	0.8138
(0 $\bar{2}$ 1)	0.4586	0.2979	0.2434	139.4	4.0	39.99	-	0.2021	0.4314
(100)	0.5509	0.3002	0.1489	36.8	70.8	131.71	-	0.7012	0.6071
(110)	0.4650	0.3111	0.2240	55.3	61.9	47.58	-	0.3285	0.4019
(1 $\bar{1}$ 0)	0.4512	0.3485	0.2003	2.6	63.7	50.83	-	0.5538	0.2583
($\bar{2}$ 01)	0.6061	0.2845	0.1094	36.2	74.1	202.77	-	0.9557	0.7563
Eje X	0.4703	0.3501	0.1796	274.9	10.7	68.17	-	0.6675	0.2952
Eje Y	0.5045	0.3423	0.1531	62.9	80.5	98.83	-	0.8046	0.3879
Eje Z	0.6719	0.1854	0.1427	183.1	4.1	276.13	-	0.2618	1.2876

APÉNDICE C

Resultados estadísticos de Veredas

APÉNDICE C1. Resultados de los test de colatitud y longitud de bondad de ajuste a Watson para las distribuciones bipolar y en corona (Veredas).

TEST DE BONDAD DE AJUSTE A WATSON (Veredas)									
DISTRIBUCIÓN BIPOLAR					DISTRIBUCIÓN EN CORONA				

B.0602-1 n=297	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn *	Ajuste
[001]	15.963	-	2.379	si	6.242	-	15.327	-
[010]	15.164	-	29.981	-	3.419	-	28.614	-
[100]	15.428	-	28.414	-	4.102	-	9.715	-
$\perp[100]/(010)$	16.104	-	1.657	si	8.101	-	4.135	si
$\perp[001]/(010)$	16.239	-	26.136	-	4.431	-	2.425	si
(010)	15.011	-	33.541	-	3.379	-	29.483	-
(001)	16.096	-	1.453	si	8.342	-	3.733	si
(021)	16.635	-	7.960	-	5.313	-	12.959	-
$(0\bar{2}1)$	16.582	-	1.645	si	7.716	-	6.400	-
(100)	16.192	-	25.613	-	4.469	-	2.485	si
(110)	16.723	-	1.718	si	8.632	-	3.006	si
$(1\bar{1}0)$	16.655	-	6.696	-	7.197	-	0.861	si
$(\bar{2}01)$	15.366	-	25.703	-	4.001	-	12.901	-
Eje X	16.125	-	20.008	-	4.835	-	1.758	si
Eje Y	16.379	-	0.889	si	8.164	-	6.645	-
Eje Z	15.505	-	2.680	si	5.966	-	16.857	-

B.0602-2 n=297	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn *	Ajuste
[001]	16.726	-	7.620	-	9.261	-	4.898	si
[010]	15.639	-	19.298	-	4.191	-	26.254	-
[100]	16.161	-	25.322	-	5.248	-	1.757	si
$\perp[100]/(010)$	16.575	-	2.998	si	7.301	-	5.710	si
$\perp[001]/(010)$	16.229	-	15.357	-	5.162	-	2.994	si
(010)	15.522	-	25.089	-	3.828	-	30.317	-
(001)	16.595	-	1.945	si	7.949	-	4.447	si
(021)	16.078	-	22.960	-	4.110	-	27.860	-
$(0\bar{2}1)$	16.790	-	2.396	si	7.507	-	5.183	si
(100)	16.342	-	14.713	-	5.265	-	2.707	si
(110)	16.925	-	0.315	si	10.420	-	1.715	si
$(1\bar{1}0)$	16.270	-	13.023	-	5.353	-	2.621	si
$(\bar{2}01)$	16.139	-	27.078	-	5.111	-	1.554	si
Eje X	16.496	-	8.306	-	5.841	-	7.257	-
Eje Y	16.708	-	13.093	-	5.869	-	0.440	si
Eje Z	16.719	-	2.595	si	8.475	-	1.103	si

(continúa)

TEST DE BONDAD DE AJUSTE A WATSON (Veredas)									
DISTRIBUCIÓN BIPOLAR					DISTRIBUCIÓN EN CORONA				

B.0602-3 N=294	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn *	Ajuste
[001]	16.686	-	1.196	si	7.744	-	9.078	-
[010]	16.882	-	18.412	-	4.593	-	2.550	si
[100]	16.458	-	5.526	si	6.408	-	6.386	-
$\perp[100]/(010)$	16.646	-	4.444	si	7.446	-	2.921	si
$\perp[001]/(010)$	17.091	-	6.730	-	6.644	-	2.599	si
(010)	16.767	-	21.307	-	4.326	-	2.204	si
(001)	16.593	-	4.590	si	7.500	-	2.293	si
(021)	16.644	-	10.490	-	5.763	-	2.105	si
$(0\bar{2}1)$	16.771	-	0.245	si	9.579	-	4.149	si
(100)	17.020	-	6.666	-	6.607	-	2.844	si
(110)	17.089	-	21.880	-	5.377	-	0.033	si
$(1\bar{1}0)$	16.815	-	0.548	si	9.783	-	1.975	si
$(\bar{2}01)$	16.625	-	4.387	si	6.745	-	6.928	-
Eje X	15.481	-	40.907	-	4.146	-	6.119	-
Eje Y	16.303	-	1.033	si	6.210	-	21.406	-
Eje Z	16.281	-	12.065	-	5.149	-	1.420	si

B.0602-4 n=81	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn *	Ajuste
[001]	7.737	-	1.800	si	3.810	-	0.178	si
[010]	8.611	-	18.446	-	1.770	-	2.224	si
[100]	8.139	-	1.712	si	2.510	-	6.319	-
$\perp[100]/(010)$	8.832	-	1.189	si	3.782	-	0.688	si
$\perp[001]/(010)$	8.838	-	5.425	si	1.888	-	4.176	si
(010)	8.680	-	18.773	-	1.887	-	2.568	si
(001)	8.877	-	0.950	si	3.962	-	0.691	si
(021)	8.506	-	3.060	si	2.755	-	1.859	si
$(0\bar{2}1)$	8.819	-	1.007	si	3.848	-	0.838	si
(100)	8.833	-	5.572	si	1.871	-	4.128	si
(110)	8.926	-	6.356	-	2.159	-	0.596	si
$(1\bar{1}0)$	8.962	-	0.168	si	4.669	-	1.382	si
$(\bar{2}01)$	8.114	-	0.789	si	2.885	-	6.707	-
Eje X	8.272	-	8.062	-	1.309	-	9.574	-
Eje Y	8.002	-	1.520	si	2.543	-	8.416	-
Eje Z	9.019	-	3.788	si	2.698	-	1.131	si

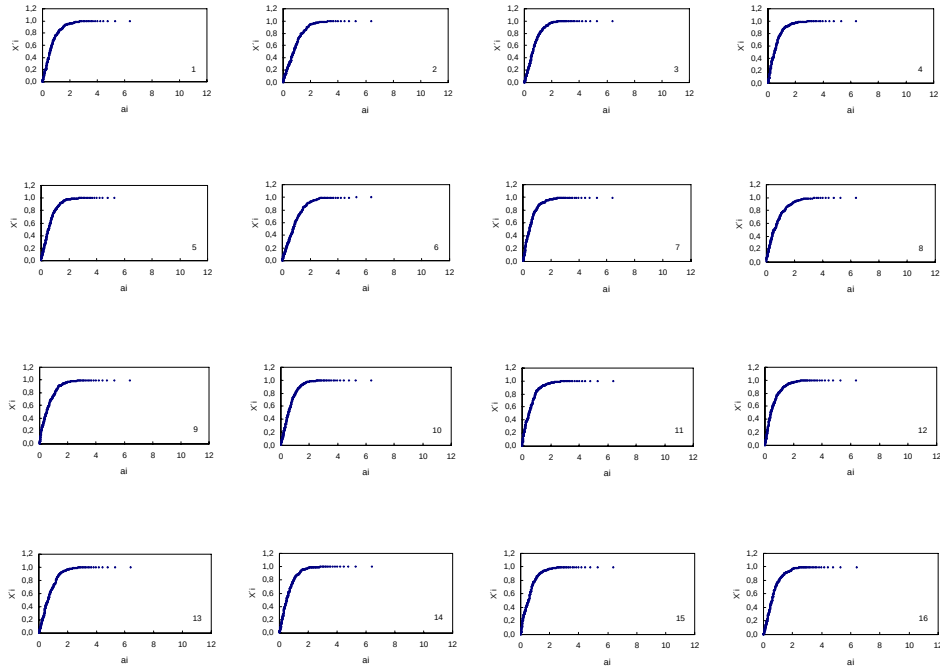
(continúa)

TEST DE BONDAD DE AJUSTE A WATSON (Veredas)								
DISTRIBUCIÓN BIPOLAR					DISTRIBUCIÓN EN CORONA			
B.0602-5 N=136	TEST		TEST		TEST		TEST	
	Colatitud	v.c: 1.094	Longitud	v.c: 5.99	Colatitud	v.c: 1.15	Longitud	v.c: 5.99
	MB	Ajuste	Pn	Ajuste	MG	Ajuste	Pn *	Ajuste
[001]	104.094	-	0.820	si	6.591	-	0.081	si
[010]	11.147	-	9.587		3.070	-	2.796	si
[100]	10.651	-	0.000	si	4.277	-	13.085	
$\perp$ [100]/(010)	11.524	-	5.546	si	3.857	-	1.133	si
$\perp$ [001]/(010)	11.411	-	1.563	si	3.824	-	10.226	
(010)	11.222	-	10.941		2.993	-	3.271	si
(001)	11.524	-	4.337	si	4.077	-	1.461	si
(021)	11.199	-	16.493		3.112	-	0.162	si
(0 $\bar{2}$ 1)	11.398	-	2.711	si	4.680	-	0.945	si
(100)	11.451	-	1.475	si	3.855	-	8.756	
(110)	11.595	-	0.681	si	5.316	-	4.261	si
(1 $\bar{1}$ 0)	11.595	-	1.853	si	4.925	-	1.267	si
($\bar{2}$ 01)	10.723	-	0.564	si	4.345	-	11.193	
Eje X	8.058	-	28.259		2.556	-	26.485	
Eje Y	11.232	-	6.081		3.642	-	5.868	si
Eje Z	8.685	-	20.107		2.800	-	30.218	

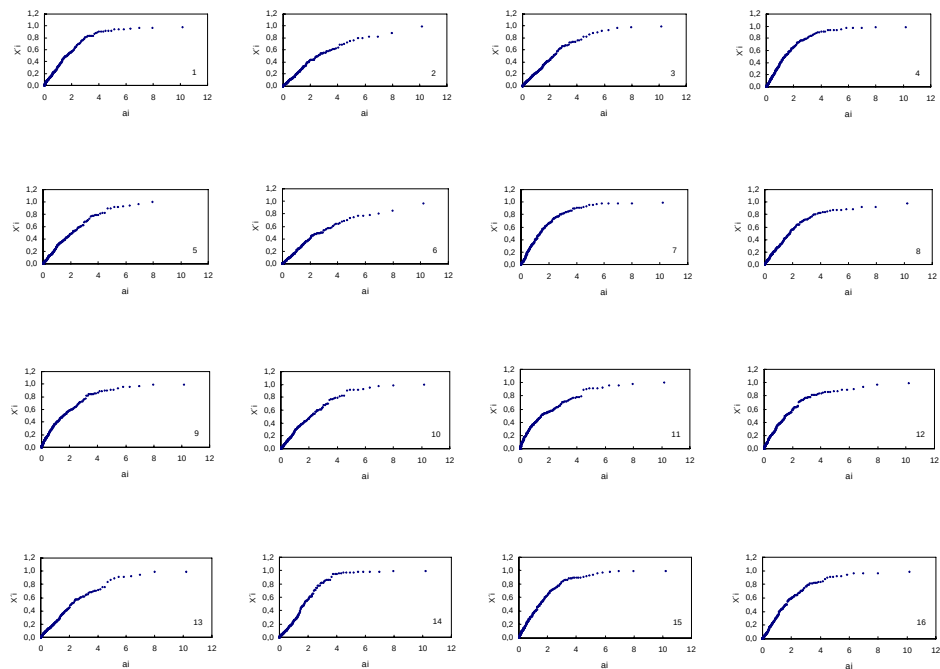
APÉNDICE C2. Gráficos de colatitud para todos los elementos cristalográficos y muestras del corte de Veredas, tanto para la distribución bipolar como en corona. Los números en la parte interior de cada gráfico hacen referencia a los siguientes elementos cristalográficos: 1. [001], 2. [010], 3. [100], 4. $\perp[100]/(010)$, 5. $\perp[001]/(010)$, 6. (010), 7. (001), 8. (021), 9. $(0\bar{2}1)$, 10. (100), 11. (110), 12. $(1\bar{1}0)$, 13. $(\bar{2}01)$, 14. Ejes X, 15. Ejes Y, 16. Ejes Z.

B.0602-1

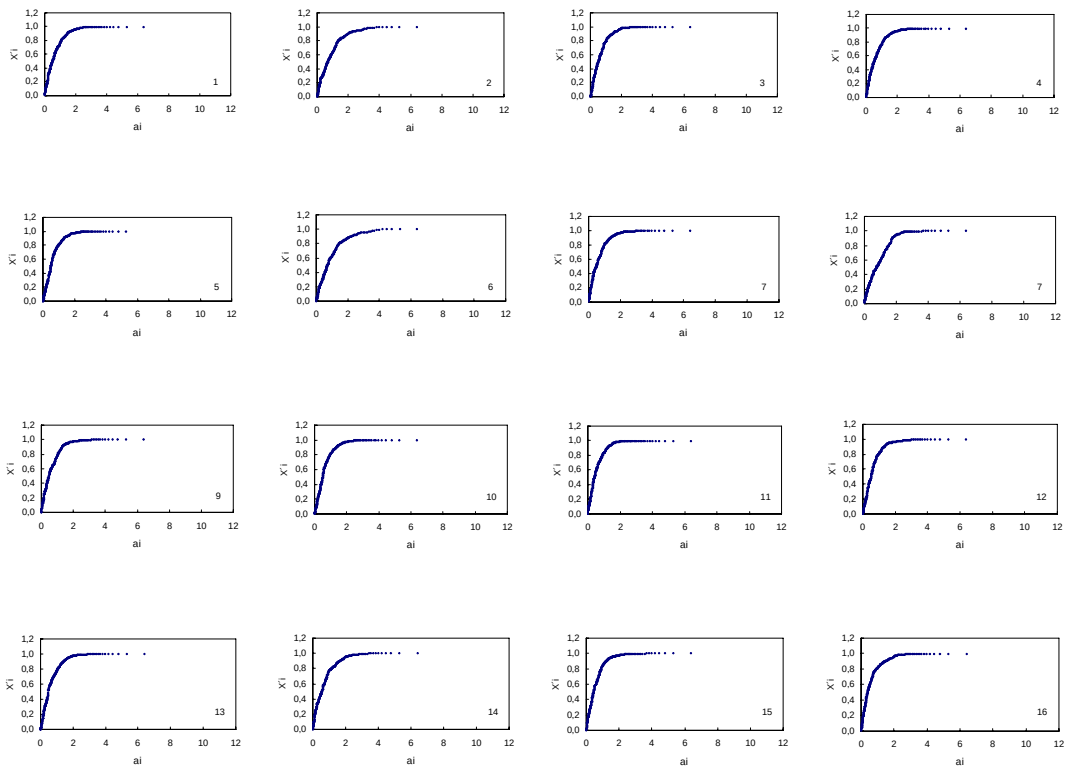
Distribución Bipolar



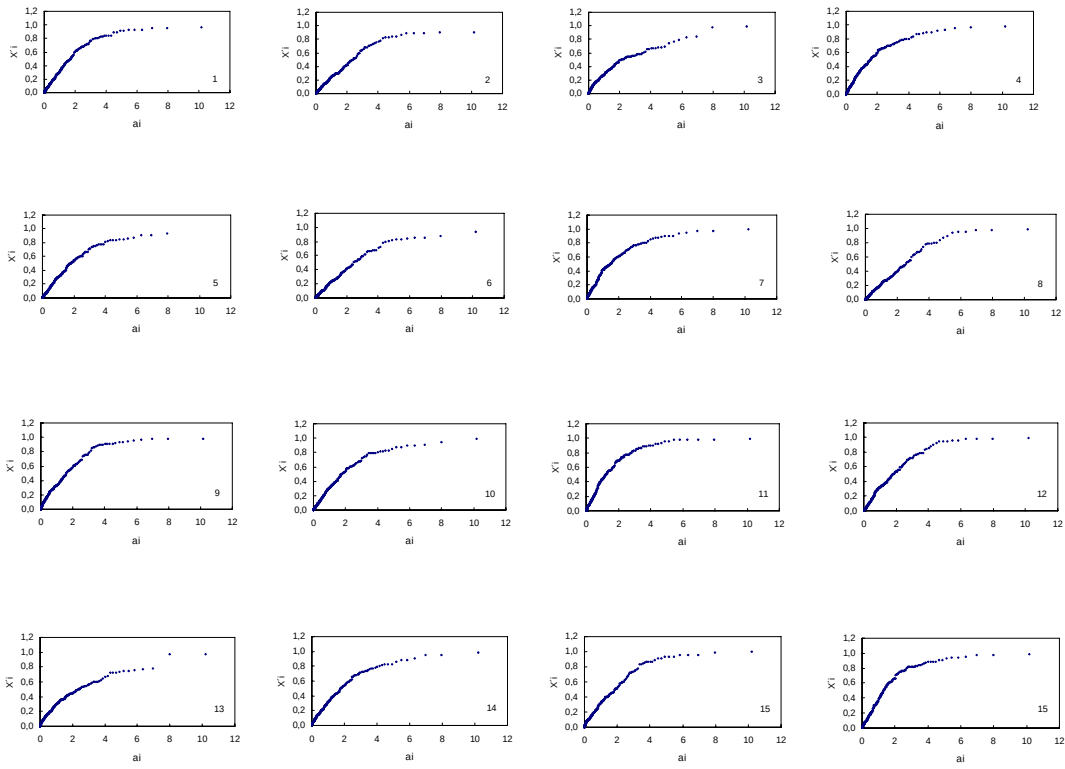
Distribución en corona



B.0602-2
Distribución Bipolar

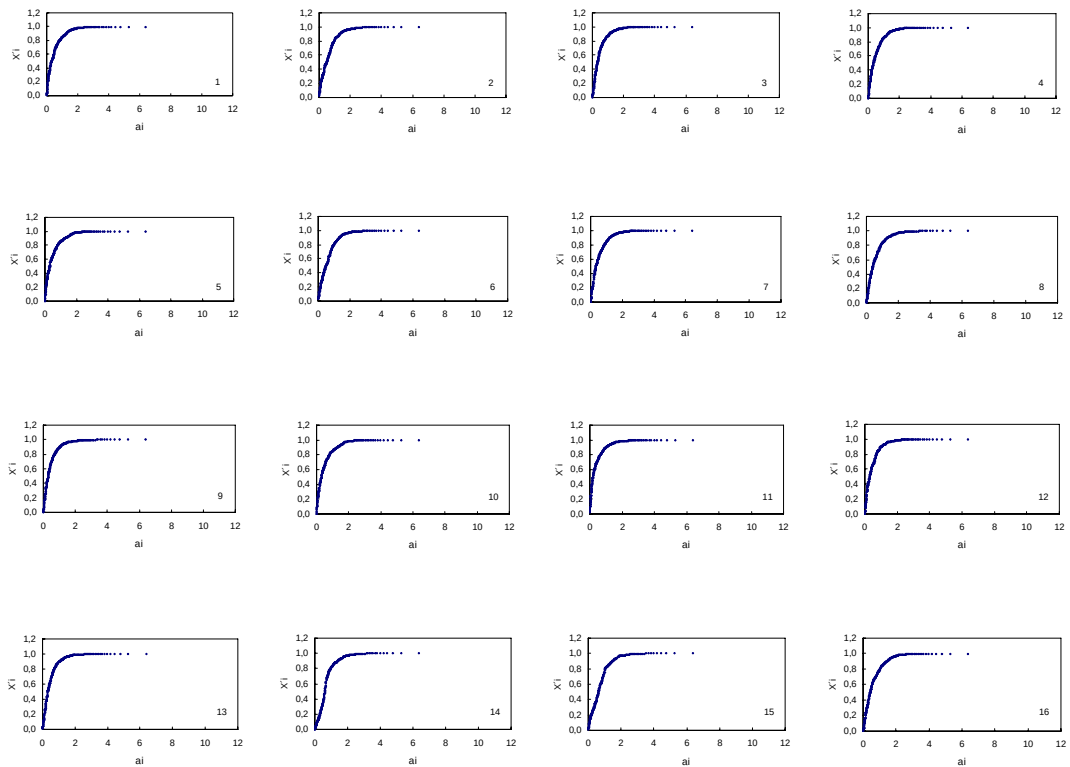


Distribución en corona

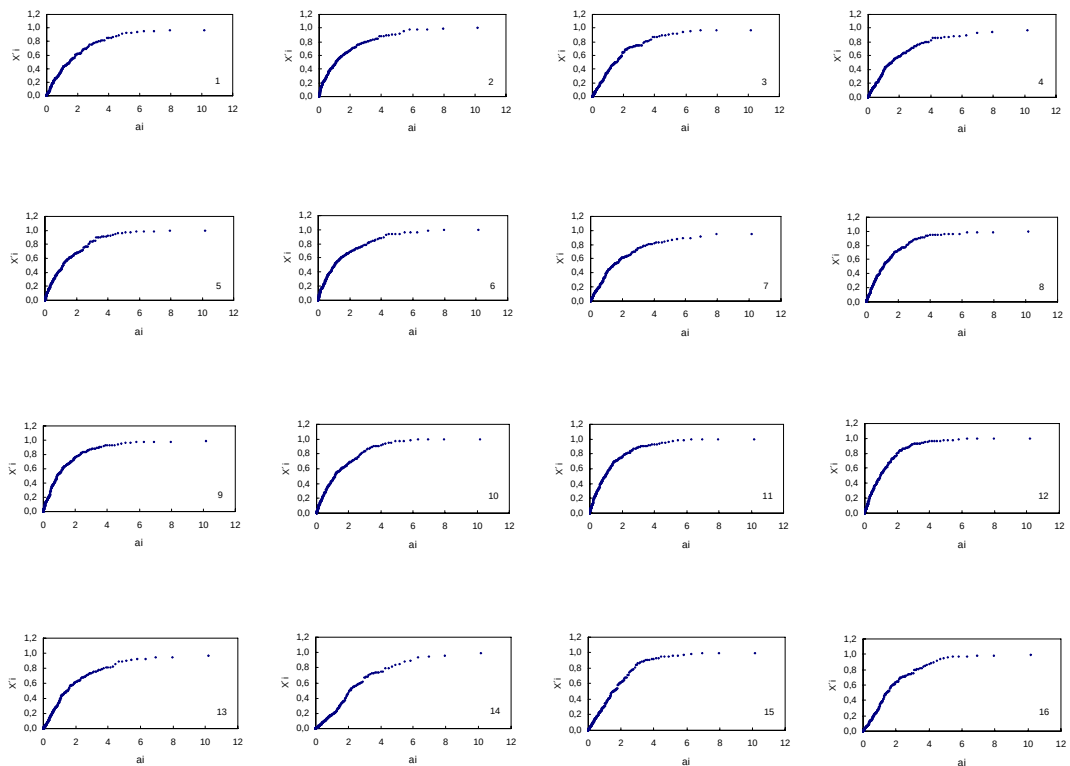


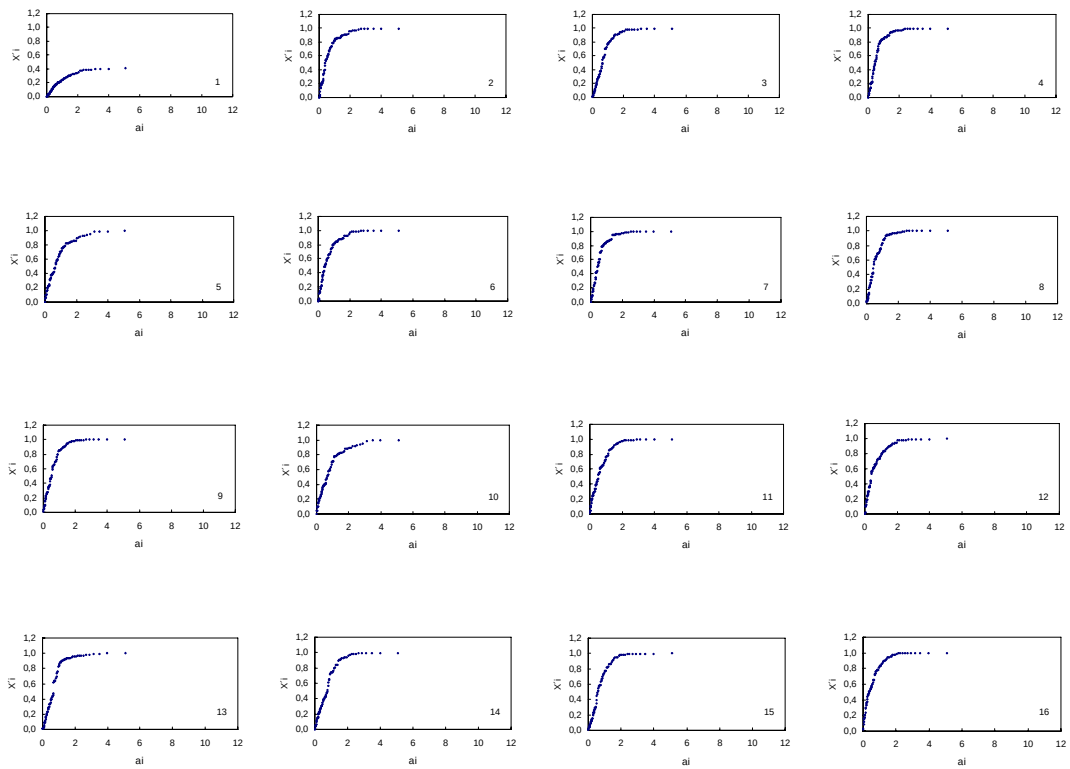
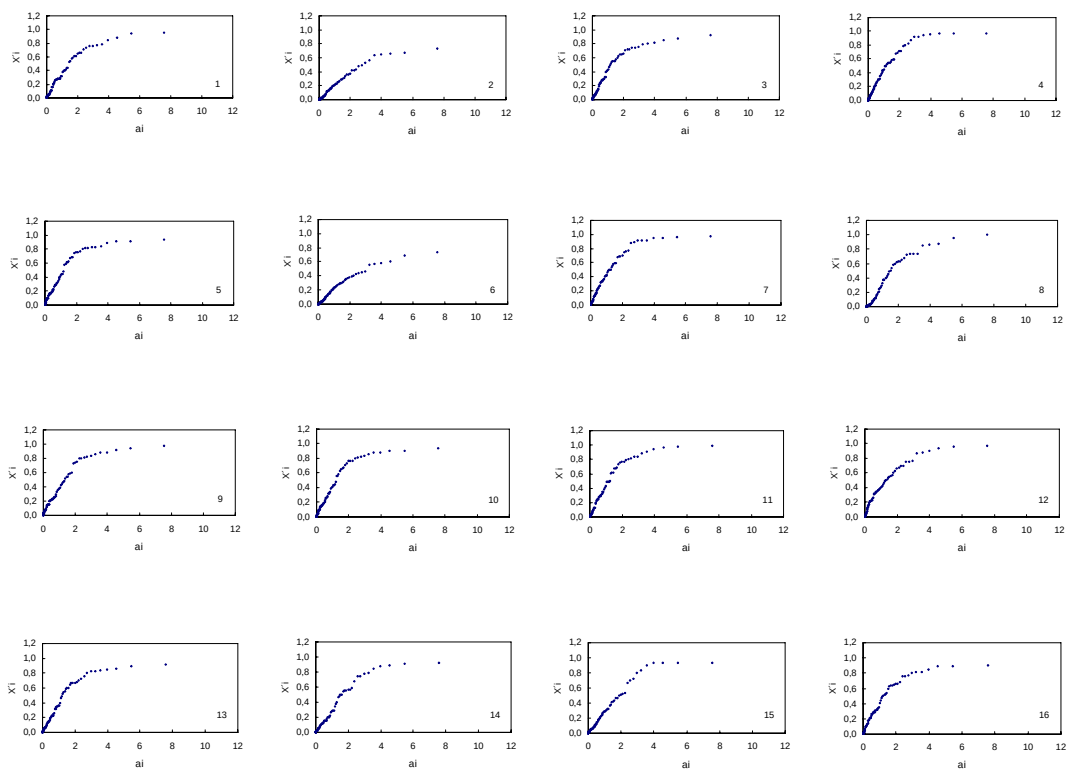
B.0602-3

Distribución Bipolar



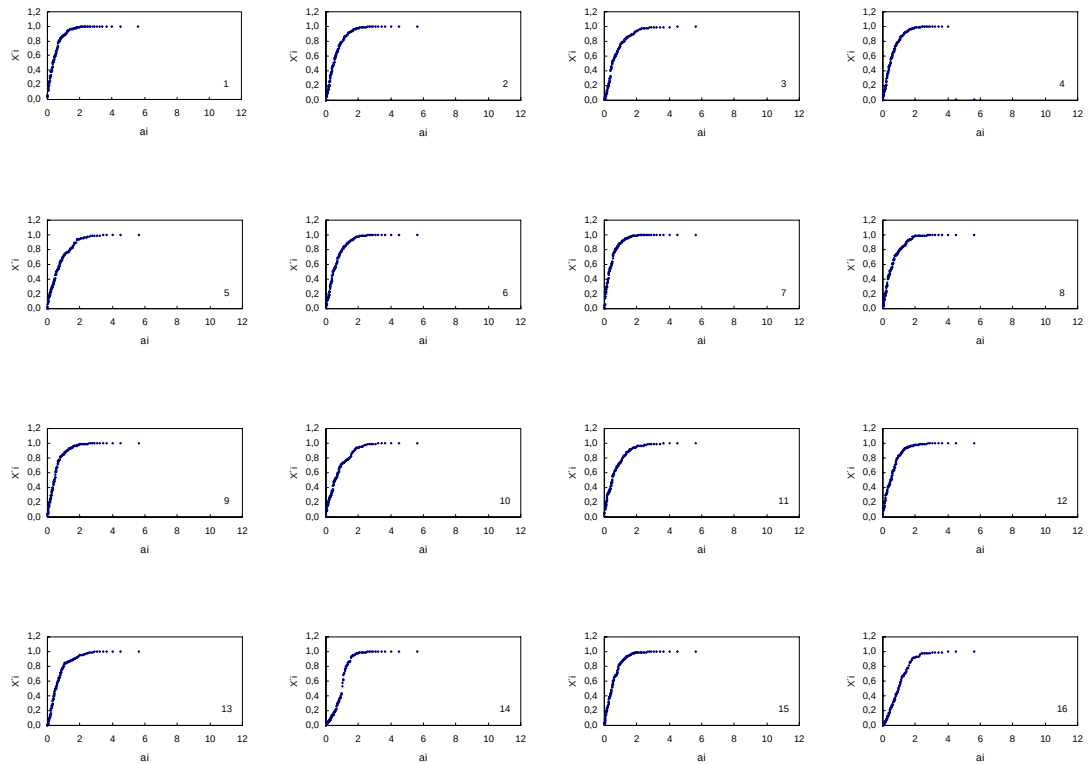
Distribución en corona



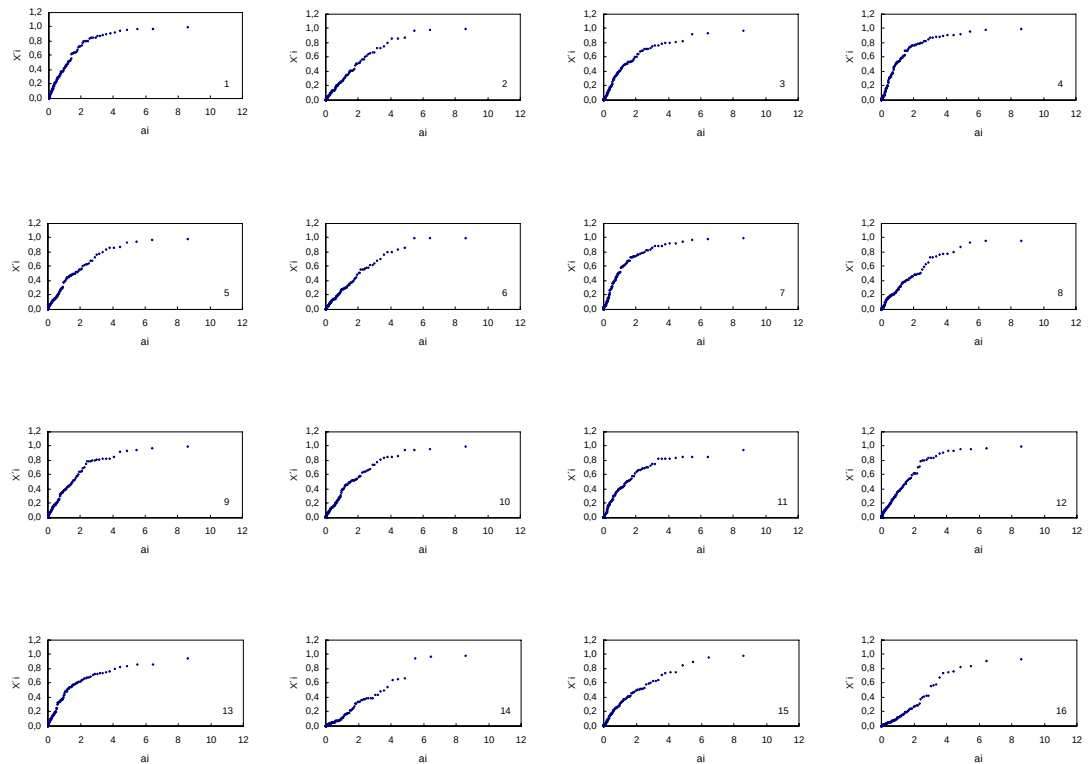
B.0602-4*Distribución Bipolar**Distribución en corona*

B.0602-5

Distribución Bipolar



Distribución en corona



APÉNDICE C3. Resultados del estadístico del test de uniformidad no paramétrico de Ajne para Veredas, tanto los dados por el programa *PLAG-9* (An), que no ajustan sistemáticamente en ningún caso, como los valores normalizados (An/n) que son con los que se hemos trabajado a efectos de los cálculos estadísticos y representaciones gráficas.

TEST DE UNIFORMIDAD DE AJNE (PLAG-9) - Veredas

B.0602-1 n=297	AJNE		AJNE NORMA. An/n
	An	Uniformidad ($An < 8.9$)	
[001]	28.89	-	0.0973
[010]	34.67	-	0.1167
[100]	30.91	-	0.1041
$\perp[100]/(010)$	28.25	-	0.0951
$\perp[001]/(010)$	29.96	-	0.1009
(010)	35.27	-	0.1188
(001)	28.10	-	0.0946
(021)	30.32	-	0.1021
(0 $\bar{2}$ 1)	27.33	-	0.0920
(100)	29.87	-	0.1006
(110)	27.69	-	0.0932
(1 $\bar{1}$ 0)	28.28	-	0.0952
($\bar{2}$ 01)	30.92	-	0.1041
Eje X	28.93	-	0.0974
Eje Y	28.11	-	0.0946
Eje Z	32.20	-	0.1084

B.0602-2 n=297	AJNE		AJNE NORMA. An/n
	An	Uniformidad ($An < 8.9$)	
[001]	28.56	-	0.0962
[010]	35.34	-	0.1190
[100]	32.58	-	0.1097
$\perp[100]/(010)$	27.71	-	0.0933
$\perp[001]/(010)$	30.52	-	0.1028
(010)	36.57	-	0.1231
(001)	27.53	-	0.0927
(021)	34.44	-	0.1160
(0 $\bar{2}$ 1)	27.50	-	0.0926
(100)	30.43	-	0.1025
(110)	27.18	-	0.0915
(1 $\bar{1}$ 0)	29.04	-	0.0978
($\bar{2}$ 01)	32.68	-	0.1100
Eje X	33.13	-	0.1115
Eje Y	27.58	-	0.0929
Eje Z	31.22	-	0.1051

B.0602-3 n=294	AJNE		AJNE NORMA. An/n
	An	Uniformidad ($An < 8.9$)	
[001]	28.22	-	0.0960
[010]	33.98	-	0.1156
[100]	30.58	-	0.1040
$\perp[100]/(010)$	27.66	-	0.0941
$\perp[001]/(010)$	29.79	-	0.1013
(010)	34.83	-	0.1185
(001)	27.45	-	0.0934
(021)	31.52	-	0.1072
(0 $\bar{2}$ 1)	27.02	-	0.0919
(100)	29.74	-	0.1012
(110)	26.99	-	0.0918
(1 $\bar{1}$ 0)	28.54	-	0.0971
($\bar{2}$ 01)	30.53	-	0.1038
Eje X	28.34	-	0.0964
Eje Y	27.08	-	0.0921
Eje Z	29.22	-	0.0994

B.0602-4 n=81	AJNE		AJNE NORMA. An/n
	An	Uniformidad ($An < 8.9$)	
[001]	7.85	SI	0.0969
[010]	9.37	-	0.1157
[100]	8.74	SI	0.1079
$\perp[100]/(010)$	7.69	SI	0.0949
$\perp[001]/(010)$	8.54	SI	0.1054
(010)	9.60	-	0.1185
(001)	7.66	SI	0.0946
(021)	8.64	SI	0.1067
(0 $\bar{2}$ 1)	7.50	SI	0.0926
(100)	8.54	SI	0.1054
(110)	7.93	SI	0.0979
(1 $\bar{1}$ 0)	7.62	SI	0.0941
($\bar{2}$ 01)	8.61	SI	0.1063
Eje X	9.34	-	0.1153
Eje Y	7.86	SI	0.0970
Eje Z	7.97	SI	0.0984

(continúa)

TEST DE UNIFORMIDAD DE AJNE (PLAG-9)
(Veredas)

B.0602-5 n=136	AJNE		AJNE
	An	Uniformidad (An < 8.9)	NORMA. An/n
[001]	12.61	-	0.0927
[010]	14.15	-	0.1040
[100]	13.59	-	0.0999
$\perp[100]/(010)$	12.78	-	0.0940
$\perp[001]/(010)$	13.70	-	0.1007
(010)	14.47	-	0.1064
(001)	12.69	-	0.0933
(021)	14.19	-	0.1043
(0 $\bar{2}$ 1)	12.76	-	0.0938
(100)	13.67	-	0.1005
(110)	12.52	-	0.0921
(1 $\bar{1}$ 0)	13.73	-	0.1010
($\bar{2}$ 01)	13.43	-	0.0988
Eje X	13.54	-	0.0996
Eje Y	12.59	-	0.0926
Eje Z	14.62	-	0.1075

APÉNDICE C4. Test de uniformidad de Bingham para Veredas. Resultados de los autovectores y autovalores normalizados, valor del estadístico (S_u) y el ajuste (según el valor crítico 11.07) a la uniformidad de cada uno de los elementos cristalográficos de muestras estudiadas. A la derecha, la relación logarítmica entre los autovalores de cada elemento para su representación en los diagramas de Woodcock.

TEST DE UNIFORMIDAD DE BINGHAM (Veredas)	WOODCOCK

B.0602-1 n=297	Autovalores normalizados			Autovectores)		Bingham Su	Uniformidad Su<11.07	Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.			$\text{Ln} (\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln} (\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.4312	0.3051	0.2637	102.5	50.1	33.91	-	0.1458	0.3459
[010]	0.5011	0.3159	0.1829	318.1	33.3	113.78	-	0.5465	0.4614
[100]	0.4511	0.3449	0.2040	77.6	32.7	68.45	-	0.5251	0.2684
$\perp[100]/(010)$	0.3883	0.3241	0.2876	120.3	57.8	11.58	-	0.1195	0.1807
$\perp[001]/(010)$	0.4150	0.3629	0.2222	62.8	16.5	44.31	-	0.4905	0.1342
(010)	0.5057	0.3169	0.1774	318.1	33.7	120.94	-	0.5802	0.4674
(001)	0.3853	0.3245	0.2902	119.9	58.8	10.33	SI	0.1117	0.1717
(021)	0.4364	0.3186	0.2449	313.7	39.4	41.57	-	0.2631	0.3146
(0 $\bar{2}$ 1)	0.3980	0.3187	0.2833	317.0	17.0	15.37	-	0.1177	0.2222
(100)	0.4149	0.3622	0.2230	62.5	15.5	43.79	-	0.4850	0.1358
(110)	0.3813	0.3279	0.2908	241.7	14.3	9.22	SI	0.1201	0.1509
(1 $\bar{1}$ 0)	0.3775	0.3481	0.2743	44.4	0.2	12.59	-	0.2383	0.0811
($\bar{2}$ 01)	0.4587	0.3366	0.2047	81.2	35.9	71.89	-	0.4973	0.3095
Eje X	0.4044	0.3600	0.2355	84.4	27.7	34.15	-	0.4244	0.1163
Eje Y	0.3961	0.3151	0.2888	204.7	60.3	13.93	-	0.0872	0.2288
Eje Z	0.4366	0.3037	0.2597	357.0	16.1	37.79	-	0.1565	0.3630

B.0602-2 n=297	Autovalores normalizados			Autovectores)		Bingham Su	Uniformidad Su<11.07	Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.			$\text{Ln} (\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln} (\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.4062	0.3347	0.2591	176.3	37.8	24.11	-	0.2560	0.1936
[010]	0.4851	0.3110	0.2038	320.2	50.5	89.79	-	0.4227	0.4446
[100]	0.4087	0.3651	0.2263	191.5	30.5	40.42	-	0.4783	0.1128
$\perp[100]/(010)$	0.3996	0.3241	0.2763	177.8	29.0	17.22	-	0.1596	0.2094
$\perp[001]/(010)$	0.4075	0.3508	0.2417	193.6	22.4	31.64	-	0.3725	0.1498
(010)	0.4994	0.3100	0.1905	319.2	49.3	108.09	-	0.4869	0.4768
(001)	0.3904	0.3243	0.2853	173.6	27.9	12.58	-	0.1281	0.1855
(021)	0.4927	0.3116	0.1958	315.2	40.8	99.76	-	0.4646	0.4582
(0 $\bar{2}$ 1)	0.3955	0.3238	0.2807	198.8	30.1	14.98	-	0.1428	0.2000
(100)	0.4049	0.3511	0.2440	194.6	22.1	29.89	-	0.3639	0.1426
(110)	0.3657	0.3253	0.3090	333.0	28.0	3.80	SI	0.0514	0.1171
(1 $\bar{1}$ 0)	0.4022	0.3493	0.2485	217.5	9.7	27.16	-	0.3405	0.1410
($\bar{2}$ 01)	0.4086	0.3675	0.2239	188.0	33.8	41.90	-	0.4955	0.1060
Eje X	0.4171	0.3301	0.2528	350.2	37.5	30.10	-	0.2668	0.2339
Eje Y	0.3820	0.3606	0.2574	146.6	43.3	19.78	-	0.3371	0.0577
Eje Z	0.3707	0.3377	0.2916	106.9	30.9	7.03	SI	0.1468	0.0932

(continúa)

TEST DE UNIFORMIDAD DE BINGHAM (Veredas)	WOODCOCK

B.0602-3 n=294	Autovalores normalizados			Autovectores)		Bingham Su	Uniformidad Su<11.07	Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.			$\text{Ln}(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln}(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.4061	0.3107	0.2832	196.5	56.9	18.35	-	0.0927	0.2678
[010]	0.4088	0.3529	0.2383	129.5	12.9	33.32	-	0.3927	0.1470
[100]	0.4080	0.3259	0.2661	259.1	46.0	22.38	-	0.2027	0.2247
$\perp[100]/(010)$	0.3883	0.3341	0.2776	195.6	41.8	13.51	-	0.1853	0.1503
$\perp[001]/(010)$	0.3914	0.3377	0.2709	262.5	41.1	16.07	-	0.2204	0.1476
(010)	0.4097	0.3573	0.2330	131.1	10.8	36.32	-	0.4275	0.1368
(001)	0.3847	0.3367	0.2786	194.8	39.7	12.45	-	0.1894	0.1333
(021)	0.3959	0.3460	0.2581	351.0	16.0	21.47	-	0.2931	0.1347
(0 $\bar{2}$ 1)	0.3819	0.3156	0.3025	165.3	45.7	7.99	SI	0.0424	0.1907
(100)	0.3929	0.3367	0.2704	263.6	41.0	16.58	-	0.2193	0.1544
(110)	0.3771	0.3707	0.2522	337.3	50.9	21.82	-	0.3852	0.0171
(1 $\bar{1}$ 0)	0.3707	0.3248	0.3046	232.2	39.7	5.06	SI	0.0642	0.1322
($\bar{2}$ 01)	0.4076	0.3230	0.2694	255.1	48.3	21.41	-	0.1815	0.2326
Eje X	0.4484	0.3622	0.1893	270.4	86.8	76.78	-	0.6489	0.2135
Eje Y	0.4430	0.2920	0.2650	5.6	0.1	40.58	-	0.0970	0.4168
Eje Z	0.3919	0.3526	0.2555	63.5	6.0	21.74	-	0.3221	0.1057

B.0602-4 n=81	Autovalores normalizados			Autovectores)		Bingham Su	Uniformidad Su<11.07	Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.			$\text{Ln}(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln}(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.3749	0.3492	0.2760	190.8	1.3	3.20	SI	0.2352	0.0710
[010]	0.4635	0.3639	0.1726	310.2	59.8	26.56	-	0.7459	0.2419
[100]	0.4651	0.2999	0.2350	30.6	4.3	17.10	-	0.2439	0.4388
$\perp[100]/(010)$	0.3880	0.3356	0.2764	249.8	9.7	3.79	SI	0.1941	0.1451
$\perp[001]/(010)$	0.4643	0.3237	0.2120	41.5	0.3	19.42	-	0.4232	0.3607
(010)	0.4684	0.3613	0.1703	311.4	61.7	27.71	-	0.7521	0.2596
(001)	0.3858	0.3336	0.2806	249.9	9.6	3.36	SI	0.1730	0.1454
(021)	0.4205	0.3340	0.2455	303.0	69.5	9.30	SI	0.3078	0.2303
(0 $\bar{2}$ 1)	0.3894	0.3326	0.2781	303.0	0.4	3.76	SI	0.1790	0.1577
(100)	0.4644	0.3244	0.2112	41.2	0.1	19.55	-	0.4292	0.3588
(110)	0.4120	0.3595	0.2285	224.7	2.0	10.85	SI	0.4532	0.1363
(1 $\bar{1}$ 0)	0.3878	0.3170	0.2952	36.7	6.4	2.85	SI	0.0712	0.2016
($\bar{2}$ 01)	0.4595	0.2926	0.2479	26.8	5.8	15.11	-	0.1658	0.4513
Eje X	0.5163	0.3026	0.1811	273.2	11.0	34.99	-	0.5134	0.5343
Eje Y	0.4774	0.2911	0.2315	152.5	81.9	19.99	-	0.2291	0.4947
Eje Z	0.4146	0.3452	0.2402	176.9	2.3	9.37	SI	0.3627	0.1832

(continúa)

TEST DE UNIFORMIDAD DE BINGHAM (Veredas)	WOODCOCK

B.0602-5 n=136	Autovalores normalizados			Autovectores)		Bingham Su	Uniformidad Su<11.07	Eje Y	Eje X
	$\bar{\tau}_1$	$\bar{\tau}_2$	$\bar{\tau}_3$	Azim.	Buz.			$\text{Ln}(\bar{\tau}_2/\bar{\tau}_3)$	$\text{Ln}(\bar{\tau}_1/\bar{\tau}_2)$
[001]	0.3549	0.3416	0.3035	324.3	62.0	1.45	SI	0.1183	0.0382
[010]	0.4283	0.3456	0.2261	153.3	18.6	21.08	-	0.4243	0.2145
[100]	0.4575	0.2826	0.2599	72.4	8.7	23.85	-	0.0837	0.4817
$\perp[100]/(010)$	0.3987	0.3444	0.2570	279.7	61.4	10.43	SI	0.2927	0.1464
$\perp[001]/(010)$	0.4551	0.3006	0.2543	247.5	3.3	22.59	-	0.1673	0.4147
(010)	0.4351	0.3453	0.2196	152.1	18.7	23.90	-	0.4526	0.2312
(001)	0.4001	0.3387	0.2612	283.3	61.7	9.88	SI	0.2598	0.1666
(021)	0.4015	0.3814	0.2170	149.6	18.9	20.90	-	0.5640	0.0514
(0 2 1)	0.3866	0.3403	0.2731	11.8	24.8	6.64	SI	0.2200	0.1276
(100)	0.4440	0.3011	0.2549	247.5	3.7	19.83	-	0.1666	0.3884
(110)	0.4087	0.3120	0.2793	245.7	7.7	9.24	SI	0.1107	0.2700
(1 $\bar{1}$ 0)	0.3874	0.3343	0.2783	68.8	13.0	6.07	SI	0.1833	0.1474
($\bar{2}$ 0 1)	0.4510	0.2887	0.2604	74.4	11.3	21.58	-	0.1032	0.4461
Eje X	0.5811	0.2989	0.1200	96.9	4.4	110.25	-	0.9126	0.6648
Eje Y	0.4417	0.3240	0.2344	331.9	66.3	22.05	-	0.3237	0.3099
Eje Z	0.5791	0.2834	0.1374	194.2	2.6	103.31	-	0.7240	0.7146

F I N