

Relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de rocas básicas y granitoides del batolito de la Sierra Norte de Sevilla

J. D. DE LA ROSA^{1,2}, G. ROGERS², A. CASTRO¹

¹*Departamento de Geología y Minería. Universidad de Sevilla, 21819 La Rábida (Huelva).*

²*Isotope Geology Unit, Scottish Universities Research and Reactor Centre, East Kilbride, Glasgow, G75 0QU ESCOCIA*

Resumen: El batolito de la Sierra Norte de Sevilla constituye el afloramiento de rocas plutónicas y subvolcánicas más externo del Macizo Ibérico, intruyendo en materiales metasedimentarios y volcánicos de la Zona Surportuguesa. Los nuevos datos de relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de roca total sobre un total de 27 muestras revelan que los granitoides calcoalcalinos con enclaves microgranulares son el producto de la interacción entre magmas derivados de una fuente mantélica con afinidades litosféricas y magmas generados por fusión parcial de una corteza continental inferior granulítica en un borde continental activo. El estudio isotópico de Sr de muestras pertenecientes a zonas de interacción entre magmas básicos y félsicos del BSNS sugiere como el equilibrio isotópico de Sr descrito entre enclave microgranular y granitoide encajante es debido a un mecanismo acoplado de intercambio de cristales y difusión tracer de Sr entre líquidos.

Palabras clave: Rocas básicas, Acumuladas, Granitoides, Química isotópica de Sr, Mezcla de magmas, Batolito de la Sierra Norte de Sevilla, Zona Surportuguesa, Macizo Ibérico.

Abstract: The Seville Ranges batholith constitutes the outermost outcrop of plutonic and subvolcanic rocks of the Iberian Massif, intruding into metasedimentary and volcanic rocks of the South Portuguese Zone. New Sr isotopic data from 27 whole rock samples show that the calc-alkaline granitoids with microgranular enclaves were the product of interaction of magmas derived from a mantle source with lithospheric affinities and magmas developed by partial melting of a granulitic crust in an active continental margin. The Sr isotope study of samples from magmatic interaction zones suggests that the isotopic equilibration of Sr between microgranular enclaves and host calc-alkaline granitoid resulted from mechanisms of crystal exchange and tracer diffusion of Sr in liquids.

Key words: Basic rocks, Cumulate, Granitoids, Sr-Isotope geochemistry, Magma mixing, Seville Ranges batholith, South Portuguese zone, Iberian massif.

De la Rosa, J. D., Roger, G., Castro, A. (1993): Relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de rocas básicas y granitoides del batolito de la Sierra Norte de Sevilla. *Rev. Soc. Geol. España*, 6: 141-149

El batolito de la Sierra Norte de Sevilla (BSNS) constituye el afloramiento de rocas plutónicas y subvolcánicas más externo del Macizo Ibérico, intruyendo en materiales metasedimentarios y volcánicos de la Zona Surportuguesa (ZSP; Lotze, 1945). Está constituido por rocas básicas y granitoides que forman cuerpos alargados de varias decenas de kilómetros y macizos de dimensiones menores con contactos discordantes con las rocas encantes, salvo en los sectores de Gil Márquez y Guillena donde las rocas poseen una intensa deformación por cizalla dúctil.

En los contactos entre los cuerpos de rocas básicas y ácidas existen zonas de interacción cuyo estudio revela un sincronismo en el emplazamiento de los magmas que generaron las rocas básicas y granitoides subvolcánicos.

El BSNS es a menudo ignorado en trabajos de tectónica regional Hercínica, en parte debido a la ausencia de trabajos petrológicos y petrogenéticos. No obstante, el trabajo recientemente realizado por uno de los autores (de la Rosa, 1992) ha puesto de manifiesto la relevancia que el

batolito puede tener para la reconstrucción geotectónica del borde Sur del orógeno durante el Paleozoico Superior.

En este trabajo se exponen los resultados obtenidos de un estudio isotópico de Sr de roca total de los principales grupos de rocas del BSNS a partir del cual se pretende conocer 1) los procesos y áreas fuentes implicados en el magmatismo, y 2) describir las variaciones de las relaciones isotópicas que tienen lugar durante la mezcla de magmas de composiciones contrastadas.

Por otra parte, el estudio isotópico de las zonas de interacción posee un especial interés ya que en ellas está registrado el proceso de mezcla de magmas. Este proceso de diversificación ha sido propuesto como generador de variaciones composicionales importantes en granitoides calcoalcalinos híbridos (granitos H según terminología de Castro *et al.*, 1991). El estudio de la variación de las relaciones isotópicas de Sr a pequeña escala en zonas de interacción magmática señalará qué mecanismos controlan las relaciones isotópicas iniciales de Sr de rocas híbridas generadas en la naturaleza.

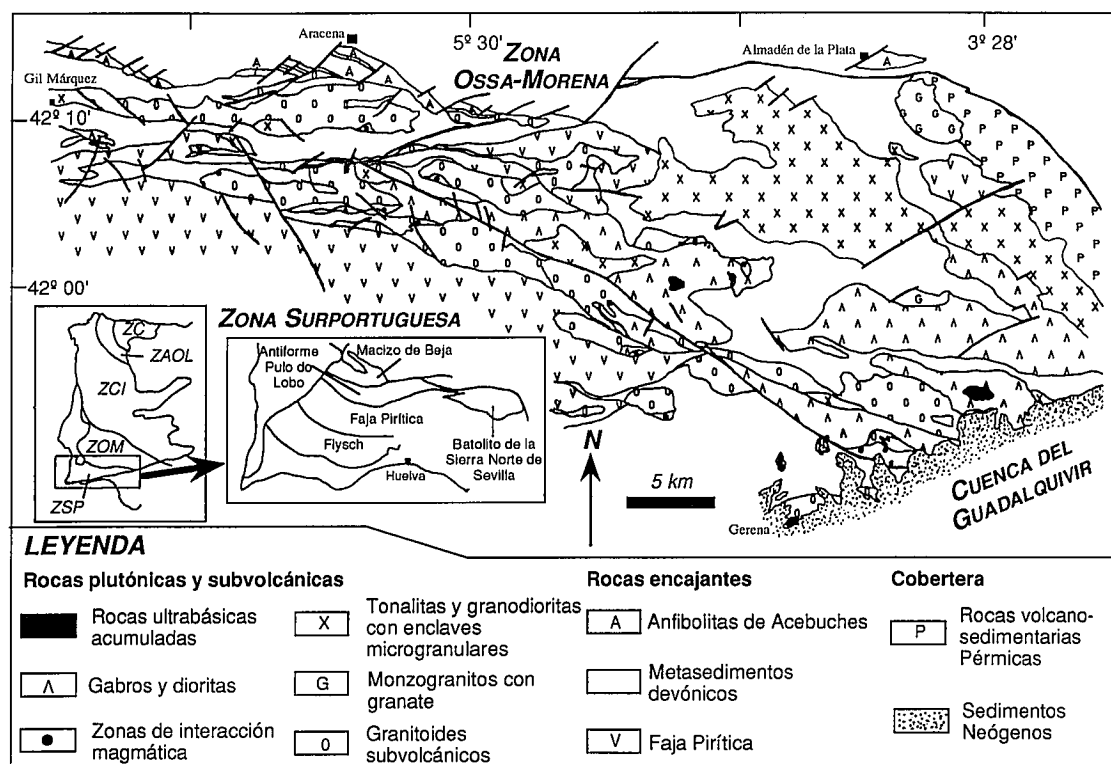


Fig. 1.-Esquema geológico del batolito de la Sierra Norte de Sevilla (BSNS). División de zonas tectónicas del Macizo Ibérico según Julivert et al. (1974)

El batolito de la Sierra Norte de Sevilla: Rasgos Petrológicos

La figura 1 muestra un esquema geológico del batolito de la Sierra Norte de Sevilla (de la Rosa, 1992). Se han distinguido tres grandes grupos de rocas plutónicas: 1) rocas básicas y ultrabásicas, 2) granitos y 3) rocas intermedias.

Las rocas básicas son gabros y dioritas anfibólicas constituidas por plagioclasa y anfíbol fundamentalmente. Son frecuentes las facies pegmatoides en venas, bolsadas y segregaciones irregulares, las cuales llegan a constituir masas voluminosas, de varios centenares de metros, con textura gráfica observable a simple vista cerca del contacto entre las rocas básicas y los macizos de rocas acumuladas (fig. 2A). Asociadas a las rocas básicas, aparecen pequeños cuerpos (10 a 1.000 metros) de rocas metamórficas y ultrabásicas acumuladas. Se han distinguido dos grupos principales en función de la mineralogía cumulus 1) acumulados ricos en olivino y 2) acumulados anortositicos. Estas rocas poseen un bandeo rítmico con laminaciones paralelas, cruzadas y contactos discordantes entre las láminas (fig. 2B). Las rocas acumuladas y básicas constituyen una serie magmática transicional entre tholeítica y calcoalcalina. La presencia de olivino y plagioclasa cumulus junto con las variaciones mineralógicas y químicas, sugieren que estas rocas son el producto de la fraccionación de magmas basálticos (de la Rosa, 1992). El estudio de las condiciones de cristalización indica que la fraccionación ocurrió en un amplio intervalo de P dentro de condiciones corticales.

En el BSNS se distinguen dos grupos de granitos: 1) monzogranitos con granate y 2) granitoides subvolcáni-



Fig. 3.-Microfotografía de contraste de interferencia diferencial (Nomarski) con luz transmitida de una plagioclasa de granodiorita con enclaves microgranulares. Se observa un patrón de zonado muy complejo consistente en la presencia de un zonado oscilatorio interrumpido por superficies de reabsorción (R).

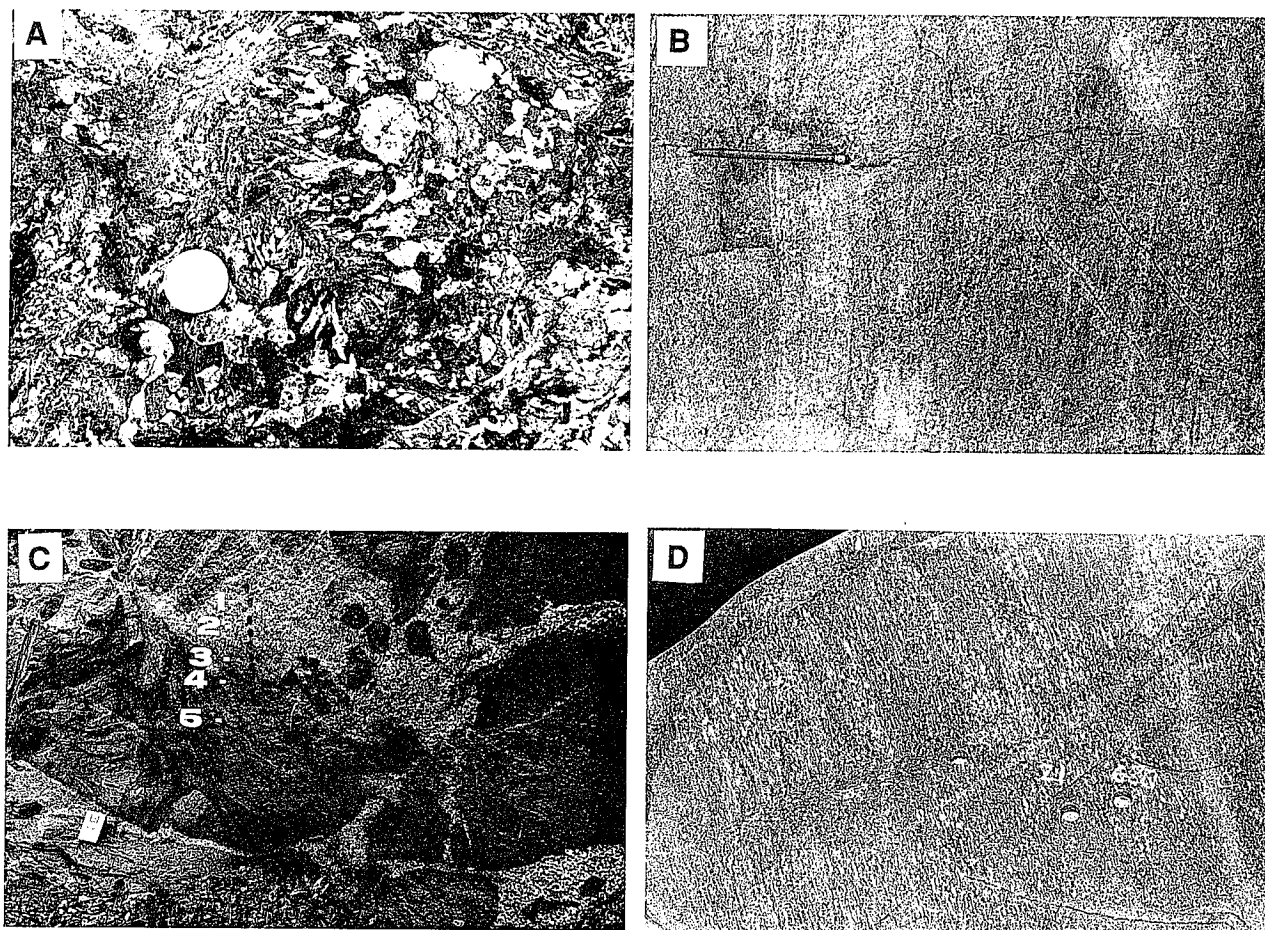


Fig. 2. —A) Gabro pegmatoide con textura gráfica en el contacto entre rocas acumuladas y básicas. B) Gabro anortositico bandeado con laminación paralela y truncada. C) Dique simplutónico del Macizo de Gerena donde se observa un contacto gradual desde el granitoide encajante (I-1 y I-2) a la tonalita de tamaño de grano fino (I-4 y I-5) a través de una tonalita híbrida (I-3). D) Tonalita híbrida con (G-20) y sin (G-21) fenocristales de plagioclasa del Macizo de Gil Márquez.

cos. Los monzogranitos con granate afloran en el sector más oriental de la ZSP. Poseen un quimismo peraluminico y están constituidos fundamentalmente por feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa y biotita. Minerales accesorios son granate, cordierita, moscovita, y minerales opacos, entre otros. En el Macizo de Navahonda se observan distintas relaciones entre el monzogranito con granate, granitoides biotíticos con enclaves de corneanas y monzogranitos con enclaves de fayalita. El estudio petrológico de estas rocas pone de manifiesto cómo la variación composicional existente en parte es reflejo de la composición heterogénea de la fuente, y en parte es adquirida por procesos de fraccionación y asimilación. Los granitoides subvolcánicos tienen un quimismo subalcalino y afloran en grandes alineaciones de varias decenas de kilómetros de longitud y en macizos de dimensiones más reducidas. Están asociados a rocas básicas a través de zonas de interacción magmáticas como la existente en el Macizo de Gerena. Poseen una intensa alteración metasomática consistente en la cloritización de biotita y sericitización de los feldespatos. En facies menos alteradas existen agregados de hornblenda y biotita y restos de ortopiroxeno sin transformar de posible origen restítico. Los granitoides subvolcánicos poseen una amplia variedad textural consistente en la presencia de facies porfídicas, aplíticas y granofídicas. Todas ellas

sugieren la cristalización, en niveles muy superficiales, de magmas saturados en volátiles.

Las rocas intermedias son tonalitas y granodioritas con frecuentes enclaves microgranulares. Poseen un quimismo metaluminoso. Están constituidas fundamentalmente por plagioclasa, cuarzo, anfíbol, biotita y feldespato potásico, y minoritariamente apatito, circón, allanita y minerales opacos. Las plagioclasas poseen un núcleo sin zonar y una zona intermedia y borde con zonado oscilatorio. El estudio de contraste de interferencia diferencial Nomarski (Anderson, 1983; Nixon y Pearce, 1987) muestra como el zonado oscilatorio está constituido por frecuentes zonas de reabsorción que cortan el zonado original (fig. 3). Este hecho ha sido interpretado en enclaves microgranulares y granitoide encajante debido a la interacción de magmas de composiciones contrastadas. Además, la comparación de las características petrológicas de estas rocas con el patrón petrológico de las rocas híbridas de las zonas de interacción, sugiere que las rocas intermedias son el resultado de la hibridación de magmas.

Las zonas de interacción en el BSNS están ampliamente representadas en los contactos entre los cuerpos de rocas básicas y granitoides. Se han estudiado en detalle dos zonas de interacción localizada una de ellas en niveles subvolcánicos (Macizo de Gerena) y la otra en niveles más profundos (Macizo de Gil Márquez). Esta última, deformada por la Zona de Cizalla Suribérica (Crespo-Blanc y

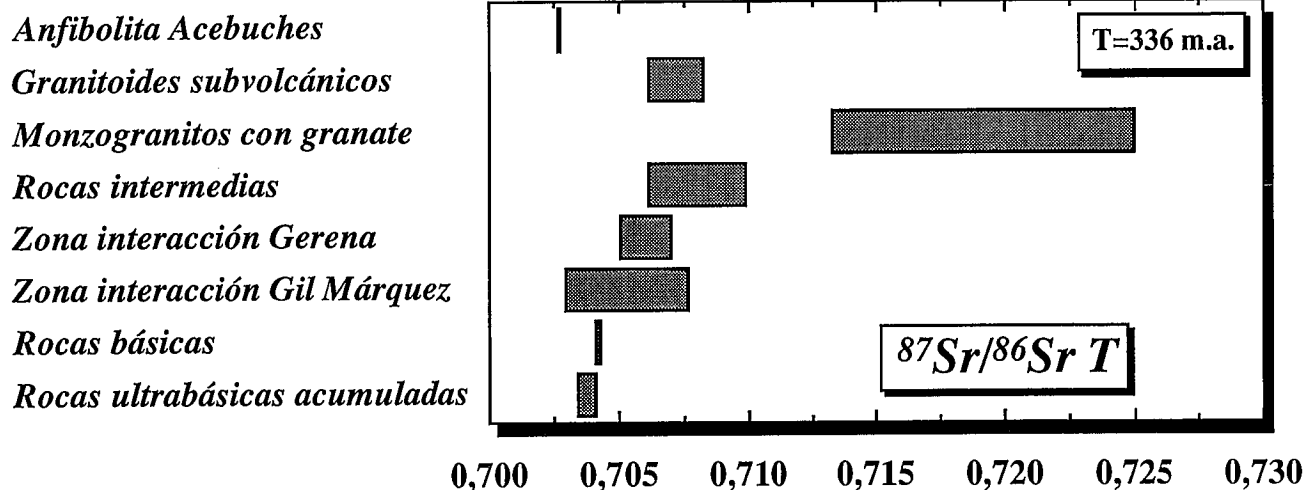


Fig. 4.—Rangos de variación de las relaciones isotópicas iniciales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($T=336 \text{ m.a.}$) del BSNS.

Orozco, 1988). En ambos casos se ha observado la presencia de diques simplutónicos (fig. 2C) y zonas híbridas (fig. 2D). Las rocas híbridas que afloran en las zonas de interacción son de composición cuarzodiorítica a granodiorítica, existiendo un importante desequilibrio puesto de manifiesto en las relaciones de campo, microscópicas, química mineral y química de roca total (cf. de la Rosa y Castro, 1990; Castro *et al.*, 1990). El estudio de las zonas de interacción ha relevado un simplutonismo de los magmas que generaron las rocas básicas y ácidas, generándose diques y masas de tonalita de tamaño de grano fino con contacto transicional, a través de tonalitas, con el granitoide encajante (fig. 2C)

Metodología

Las muestras analizadas en este estudio fueron tomadas en afloramientos con escasa alteración y representativos de los tipos de rocas existentes en el BSNS. En las zonas de interacción se utilizó una máquina sacatestigos.

Se han analizado cinco muestras pertenecientes a una transversal realizada entre el interior de un dique simplutónico fragmentado y el granitoide encajante del Macizo de Gerena (fig. 2C) y dos muestras de rocas híbridas con distintas proporciones modales de xenocristales de plagioclasa del Macizo de Gil Márquez (fig. 2D).

Los análisis isotópicos de Sr de roca total fueron realizados en la Unidad de Isótopos Radiogénicos del Scottish

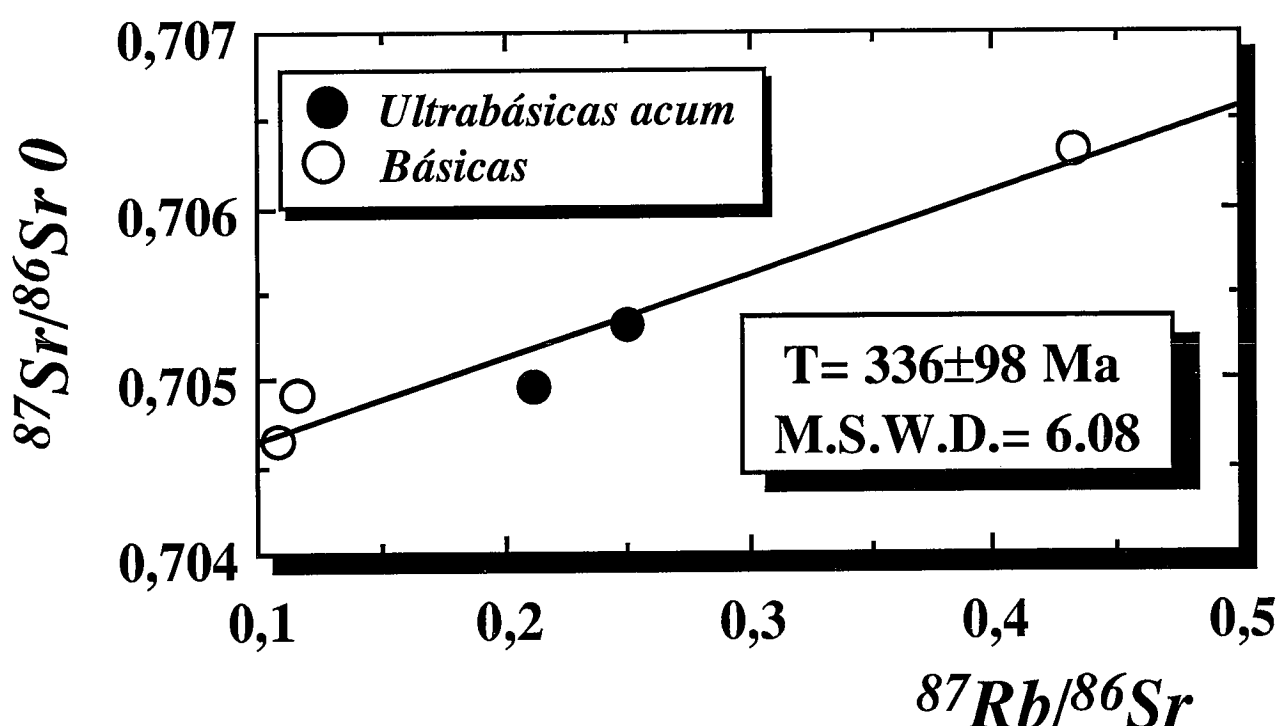


Fig. 5.—Diagrama de isocrona Rb/Sr de las rocas acumuladas y rocas básicas del BSNS

Universities Research and Reactor Centre (SURRC) en East Kilbride, Escocia.

El Sr fue separado con técnicas de cambio iónico convencionales. Los análisis fueron realizados en un espectrómetro de masas de ionización térmica VG 54E. Las relaciones isotópicas de Sr fueron corregidas debido a la fraccionación de masa usando $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$. Los análisis de NBS 987 dieron una relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71028 \pm 3$ (2s). Los datos fueron normalizados a los siguientes valores: ^{87}Rb : 1.42×10^{-11} años⁻¹ (Steiger y Jäger, 1977) y UR: $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.08470$ y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70470$. Los cálculos de isocrona fueron realizados a partir de una aproximación de mínimos cuadrados según York (1969). El error 2σ utilizado para Rb y Sr fue del 2 % y para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ fue 0.04%.

Resultados

Edad de referencia

En la Tabla 1 y figura 4 se encuentran las relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ actuales e iniciales ($T=336$ m.a.) y rangos de variación de los diferentes litotipos analizados del BSNS.

Se ha realizado un diagrama de isocrona Rb/Sr (fig. 5) con las muestras de rocas acumuladas y rocas básicas del BSNS. La validez de dicha isocrona se basa en el hecho de que en la petrogénesis de estas rocas han estado implicados esencialmente procesos de cristalización fraccional (de la Rosa 1992), aunque no se puede descartar la existencia de otros procesos subordinados como asimilación cortical.

La isocrona obtenida posee un alto índice de correla-

Tabla 1.—Relaciones isotópicas actuales e iniciales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ de los distintos litotipos del BSNS y un análisis de Anfibolita de Acebuches. Rb y Sr han sido analizados con fluorescencia de Rayos X.

Localización	Tipo de roca	Muestra	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ o	2σ	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ T	ϵ Sr
Rocas ultrabásicas acumuladas									
Embalse Minilla	Gabronorita olivínica	JR-201	6	82	0,21165	0,70497	3	0,70396	- 4,8
Embalse Minilla	Gabro anortosítico	JR-204	18	209	0,24912	0,70531	4	0,70412	- 2,5
Cerro del Moro	Gabro anortosítico	JR-325	10	205	0,14109	0,70418	3	0,70351	-11,2
Rocas básicas									
Cerro del Moro	Dique en gabro anortos	JR-326	10	268	0,10793	0,70464	4	0,70412	- 2,4
Castillo Gdas.	Diorita anfibólica	JR-103	7	175	0,11570	0,70492	3	0,70437	1,0
Castilblanco	Diorita anfibólica	JR-517	25	167	0,43306	0,70632	4	0,70425	- 0,7
Zonas de interacción									
Gerena	Cuarzodiorita	G-32	32	245	0,37779	0,70482	3	0,70301	-18,2
	Tonalita híbrida con pl	G-20	59	236	0,72339	0,70881	4	0,70535	15,0
	Tonalita híbrida sin pl	G-21	59	211	0,80912	0,70900	3	0,70513	11,9
	Granodiorita	AL 5	92	204	1,30560	0,71395	4	0,70771	48,4
	Tonalita ϕ fino	GE-19	74	305	0,70204	0,70865	4	0,70529	14,2
	Granodiorita	GE-21	93	245	1,09875	0,71226	4	0,70701	38,5
	Tonalita híbrida	GE-29	93	297	0,90620	0,71030	3	0,70597	23,7
	Granodiorita	I-1	98	254	1,11676	0,71199	3	0,70665	33,4
	Granodiorita	I-2	95	236	1,16516	0,71212	3	0,70655	32,0
	Tonalita híbrida	I-3	122	242	1,45943	0,71363	3	0,70665	33,4
	Tonalita ϕ fino	I-4	100	273	1,06009	0,71050	4	0,70543	16,1
	Tonalita ϕ fino	I-5	95	274	1,00335	0,70990	3	0,70510	11,5
Rocas intermedias									
Castillo Gdas.	Tonalita	JR-11	59	201	0,84948	0,71026	3	0,70620	27,0
Rivera de Cala	Granodiorita	JR-461	100	197	1,46999	0,71699	4	0,70996	80,4
Castilblanco	Granodiorita	JR-486	95	209	1,31572	0,71242	3	0,70613	26,0
Castilblanco	Granodiorita	JR-508	139	145	2,77707	0,72073	3	0,70745	44,8
Monzogranitos con granate									
Navahonda	Monzogranito con granate	JR-336	224	91	7,15775	0,75921	3	0,72498	293,7
Berrocal	Monzogranito con granate	JR-456	218	66	9,60472	0,75926	4	0,71332	128,2
Granitoides subvolcánicos									
Gerena	Pórfido granofídico	GE-37	203	66	8,93485	0,74893	3	0,70620	27,0
Castillo Gdas.	Pórfido granofídico	JR-95	1	160	0,01808	0,70835	4	0,70826	56,3
Anfibolita de Acebuches									
Almonaster	Anfibolita	SC-A	3	180	0,04820	0,70298	4	0,70275	-21,9

T= 336 m. a.

¹ Rb= 1.42×10^{-11} años⁻¹

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (UR)= 0.0847

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (UR)= 0.7047

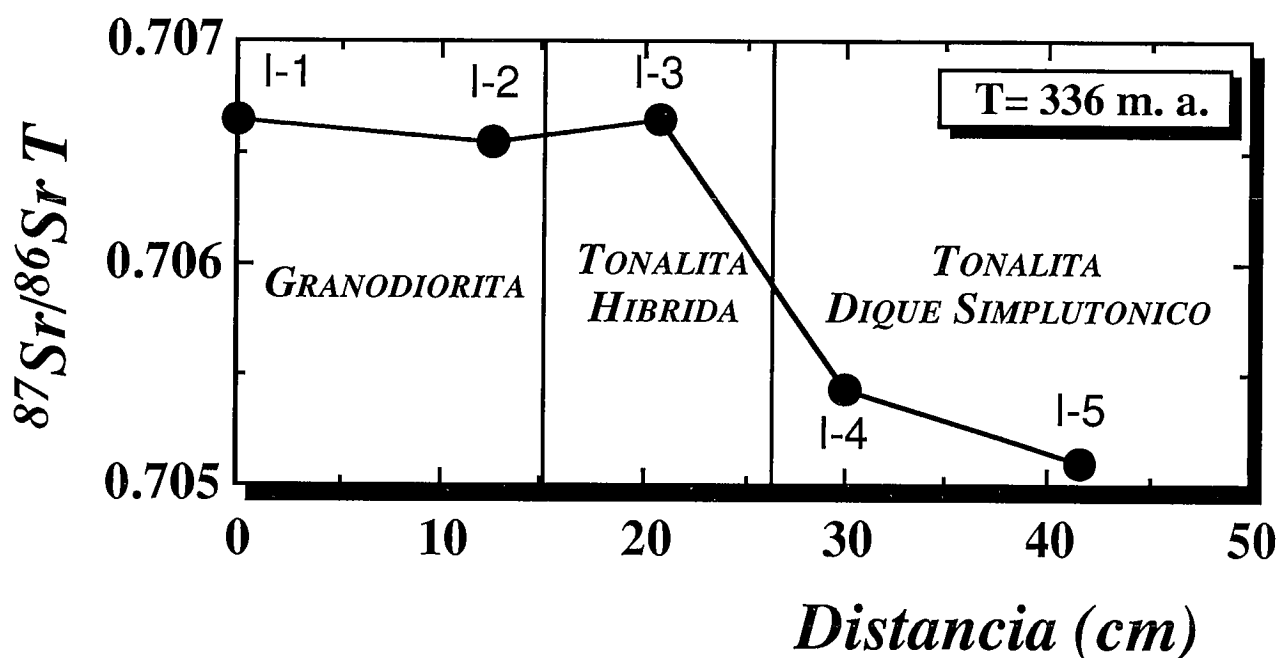


Fig. 6.—Variación de las relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_T$ (T=336 m. a.) de muestras pertenecientes al dique simplutónico de la fig. 2.C.

ción Pearson ($R^2=0.95$), siendo la edad calculada de 336 ± 98 m.a. (2σ), y la relación inicial de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70416$. El MSWD (Mean Square Weighted Deviates) es 6.08. El alto valor obtenido de MSWD de la isocrona de las rocas básicas y ultrabásicas significa como en realidad se trata de una errocrona.

Aunque el valor obtenido de MSWD es alto y dado que la edad es similar a la obtenida en las rocas asociadas a la Zona de Cizalla Suribérica-Pulo do Lobo, Anfíbolitas de Acebuches y Gabros de Beja—según el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (335–342 m.a., Dallmeyer *et al.* 1992), la edad T=336 m.a. ha sido utilizada en el cálculo de las relaciones iniciales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de todos los análisis isotópicos de este trabajo.

Relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Las relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iniciales calculadas en las rocas acumuladas con plagioclasa cumulus están comprendidas entre 0.70351–0.70412. El gabro olivínico posee una relación ligeramente diferente al gabro anortosítico asociado. También se observan relaciones isotópicas altas en las rocas básicas. Así un dique afanítico concordante con el bandeo de las rocas acumuladas con plagioclasa cumulus, y que supuestamente representa el magma basáltico parental posee una relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial diferente a la relación del gabro anortosítico. Las dioritas anfibólicas poseen relaciones comprendidas entre 0.70437–0.70425, ligeramente superiores a las relaciones de las rocas acumuladas.

Las relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iniciales de los monzogranitos con granates son superiores a las obtenidas en los granitoides subvolcánicos. La existencia de relaciones iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diferentes sugiere como los magmas que generaron los granitos del BSNS proceden de áre-

as fuentes distintas, más radiogénicas para los monzogranitos con granate en comparación con los granitoides subvolcánicos.

La relación isotópica inicial de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la tonalita es similar al valor obtenido para una granodiorita. Las granodioritas poseen relaciones isotópicas iniciales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ comprendidas entre 0.70613 y 0.70996. En general estos valores de las rocas intermedias son superiores a los de las rocas básicas, similares a los granitoides subvolcánicos e inferiores al monzogranito con granate.

El polo félsico (granodiorita) y máfico (cuarzodiorita) de la zona de interacción del Macizo de Gil Márquez poseen relaciones isotópicas iniciales de 0.70771 y 0.70301 respectivamente. Hay que destacar como la cuarzodiorita de Gil Márquez posee una relación isotópica inicial inferior a la de las rocas acumuladas y básicas del BSNS y comparable con la anfíbolita de Acebuches (0.70275), indicando como la fuente y/o mecanismos diferenciadores de esta roca han sido distintos que las rocas básicas de los sectores centrales y meridionales del BSNS. Las rocas híbridas con plagioclasa poseen valores intermedios entre el polo félsico y máfico (0.70535–0.70513).

Al igual que la zona de interacción de Gil Márquez, la tonalita de los cuerpos básicos de la zona de interacción del Macizo de Gerena posee la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial más baja y la roca granitoide encajante la más alta. La roca híbrida posee contenidos intermedios entre la roca básica y ácida.

Las muestras pertenecientes a un corte realizado en un dique simplutónico fragmentado con contacto transicional poseen una variación gradual en las relaciones iniciales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ desde la roca granitoide encajante (0.70665) a la tonalita del dique (0.70510) (fig. 6). La roca híbrida de la zona intermedia posee valores parecidos al del granitoide encajante (0.70665).

Discusión

Rocas básicas, ultrabásicas y granitoides

Las rocas básicas, ultrabásicas y granitoides muestran relaciones isotópicas iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ muy variables. Esto sugiere que todas las rocas no pueden estar relacionadas con un mecanismo de cristalización fraccional de un único magma en un sistema cerrado, y sí con mecanismos de diferenciación en un sistema abierto tales como contaminación y/o mezcla de magmas. Estos procesos deben incluso haber sido operativos en las rocas básicas dada la variabilidad de las relaciones isotópicas obtenidas.

Las relaciones isotópicas iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las rocas acumuladas y básicas (0.70351-0.70437) son altas en comparación con MORB (0.7028; Faure, 1986) lo que es congruente con 1) metasomatismo de una fuente mantélica empobrecida, 2) fusión parcial de un manto ligeramente enriquecido en un ambiente de borde de placa activo, y 3) contaminación cortical de magmas derivados de un manto empobrecido. Esta última hipótesis para las rocas acumuladas es poco probable dada la existencia de espinela verde con coronas de anfíbol y anfíbol muy aluminoso en las rocas acumuladas, las cuales sugirieron profundidades de cristalización infracorticales para estas rocas (De la Rosa, 1992).

Las altas relaciones iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las rocas acu-

muladas y básicas del BSNS serían debidas a la fusión parcial de un manto con afinidades litosféricas, más que a la deshidratación y fusión parcial de una litosfera oceánica que subduce (Hawkesworth y Ellam, 1989; Hawkesworth *et al.*, 1991).

Los altos valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iniciales de los monzogranitos con granate son congruentes con la fusión de una fuente pelítica radiogénica. Los intervalos de variación de estos granitos contrastan con las bajas relaciones isotópicas de los granitoides subvolcánicos. Estas son compatibles con la fusión parcial de una fuente profunda granulítica menos radiogénica en comparación con la fuente de los monzogranitos con granate.

El carácter híbrido de las rocas intermedias, puesto de manifiesto a partir de criterios de campo, microscópicos y químicos, es distinguido también a partir de las relaciones isotópicas de Sr, las cuales, al igual que ocurre con las rocas híbridas generadas en las zonas de interacción, poseen relaciones intermedias entre las rocas básicas y los granitos.

El diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial vs. Sr de las rocas intermedias (fig. 7), muestra como la relación inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la tonalita es semejante a algunas de granodiorita y distinta de otras, las cuales señalarían como los procesos de fraccionación-desmezcla de restitas e hibridación pueden estar implicados en la variación composicional de las rocas intermedias. En el diagrama de la fig. 7 también se han

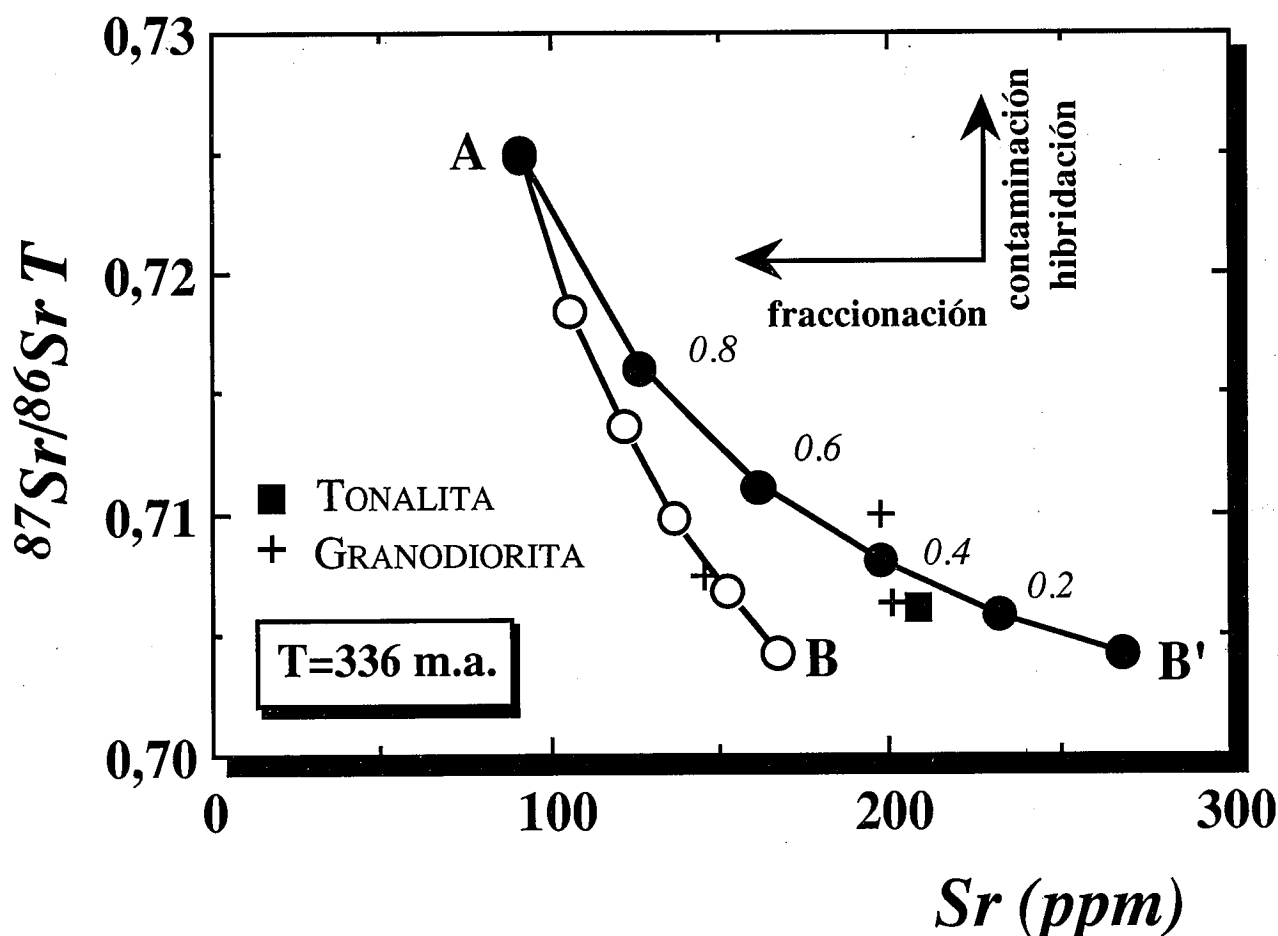


Fig. 7.—Diagrama de variación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ T (T=336 m.a.) vs. Sr de las rocas intermedias del BSNS. Se encuentra también representado las líneas de mezcla entre un monzogranito con granate (A: JR-336) y dos rocas básicas fraccionadas (B: JR-517 y B': JR-326).

representado las líneas de mezcla calculadas según la ecuación definida por Faure (1986) entre un polo félsico A (muestra JR-336, monzogranito con granate) y un polo máfico B (muestra JR-517, diorita anfibólica) y B' (muestra JR-326, dique afanítico concordante con el bandeado de las rocas acumuladas), observándose como las muestras de tonalita y granodiorita se encuentran próximas a las líneas A-B y A-B'. Si la hibridación ocurrió entre una fuente semejante al monzogranito con granate (A) y rocas básicas fraccionadas (B y B'), las rocas intermedias se habrían generado a partir de un porcentaje de participación de magma félsico del 20-45% el cual contrasta con el 61-79% obtenido con el test de mezcla de elementos mayores (de la Rosa, 1992). Dado la falta de correspondencia entre el rango de valores obtenidos con las relaciones isotópicas y el calculado con elementos mayores, los magmas híbridos serían el resultado de la interacción de magmas máficos fraccionados con fundidos generados en una fuente cortical, afín con los granitoides subvolcánicos, menos radiogénica que la que generaría los monzogranitos con granate.

Procesos de interacción

Los estudios petrológicos realizados en zonas de interacción de magmas de composiciones contrastadas han puesto de manifiesto cómo las rocas intermedias resultantes están caracterizadas por la presencia de enclaves microgranulares y por importantes disequilibrios mineralógicos tales como plagioclasas fuertemente zonadas, relaciones de cristalización complejas entre anfíbol y biotita, presencia de agregados policristalinos de anfíbol, entre otros (de la Rosa y Castro 1990, Castro *et al.* 1990). Además diversos autores han descrito la existencia de un equilibrio isotópico de Sr entre enclaves microgranulares y granitoide encajante de afinidades híbridas (Holden *et al.*, 1987; Eberz *et al.*, 1990; Stephens *et al.*, 1991; Pin, 1991; Fourcade y Javoy, 1991; Allen, 1991). Este equilibrio en parte es debido a los altos coeficientes de difusión traser de Sr, tal como se deduce de los estudios experimentales con fundidos dacíticos y riolíticos (Leshner, 1990; Baker, 1990; 1991). Los modelos teóricos muestran además como el equilibrio en las relaciones isotópicas de Sr es mayor cuanto menor sea el tamaño de los cuerpos máficos (Baker, 1991).

El estudio de las relaciones isotópicas iniciales de las muestras tomadas en el dique simplutónico y el granitoide encajante de la zona de interacción del Macizo de Garena muestra cómo los procesos de difusión traser de Sr entre líquidos no es el único mecanismo implicado en el equilibrio de las relaciones isotópicas de Sr entre enclaves microgranulares y granitoide encajante.

Las relaciones isotópicas de Sr del dique de la figura 2C (fig. 6) indican: 1) La tonalita de tamaño de grano fino del dique (muestras I-3 e I-4) posee relaciones variables, y 2) La muestra de roca híbrida tiene una relación isotópica inicial alta y similar al granitoide encajante.

La primera observación se interpreta debida a mezcla por difusión traser de Sr en líquidos cuando el magma félsico se puso en contacto con el magma máfico, ya que no se han observado cristales xenógenos en las muestras ana-

lizadas. Sin embargo, este mecanismo no explica las altas relaciones isotópicas iniciales de la muestra de tonalita híbrida, donde la mezcla ha ocurrido principalmente a partir de mecanismos de intercambio de cristales entre el magma félsico y máfico, tal como se deduce de las observaciones petrográficas (de la Rosa 1992).

El intercambio de cristales puede no generar un importante contraste isotópico entre las rocas híbridas tal como se deduce de las relaciones isotópicas de las rocas híbridas de Gil Márquez, donde una variación modal de 13.2% de plagioclase señalan una diferencia de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (T) de 0.00022. Hay que tener en cuenta que solo el núcleo de las plagioclasas es xenógeno y que dicho núcleo es pequeño cuando se incorpora al fundido híbrido.

A la luz de lo observado en estos estudios detallados, parece claro que la efectividad del proceso de hibridación para producir magmas homogéneos isotópicamente depende de procesos de difusión traser de Sr y de procesos de intercambio cristalino de difícil cuantificación.

Conclusiones

Los análisis isotópicos de roca total de muestras del batolito del BSNS muestran como las tonalitas y granodioritas con enclaves microgranulares son el producto de la interacción entre magmas derivados de una fuente mantélica con afinidades litosféricas y magmas generados por fusión parcial de una corteza inferior granulítica en un borde continental activo.

El estudio de las zonas de interacción muestra como en un procesos de mezcla de magmas, la variación isotópica inicial de Sr entre enclaves microgranulares y granitoides encajantes es debida a un mecanismo acoplado de difusión traser de Sr en líquidos e intercambio de cristales.

Agradecemos a Patricia Park, Vicent Gallagher y Anne Kelly por su experta asistencia técnica en el SURRC. También agradecemos los comentarios de dos revisores anónimos. Este trabajo ha sido financiado por la CICYT (proyecto PS89-0121) y Plan Andaluz de Investigación de la Junta de Andalucía. El trabajo isotópico en el SURRC está financiado por Scottish Universities y NERC. JR recibió una ayuda del MEC para estancia en el extranjero.

Bibliografía

- Anderson, A. T. (1983): Oscillatory zoning of plagioclase: Nomarski interference contrast microscopy of etched polished sections. *Am. Mineral.* 68: 125-129.
- Allen, C. M. (1991): Local equilibrium of mafic enclaves and granitoids of the Turtle pluton, southeast California: mineral, chemical and isotopic evidence. *Am. Mineral.* 76: 574-588.
- Baker, D. R. (1990): Chemical interdiffusion of dacite and rhyolite: anhydrous measurements at 1 atm and 10 kbar, application of transition state theory, and diffusion in zoned magma chambers. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 104: 407-423.
- Baker, D. R. (1991): Interdiffusion of hydrous dacitic and rhyolitic melts and the efficacy of rhyolite contamination of dacitic enclaves. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 106: 462-473.
- Castro, A., De la Rosa, J. D., Stephens, W. E. (1990): Magma mixing in the subvolcanic environment: petrology of the Ge-

- rena interaction zone near Seville, Spain. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 105:9-26.
- Castro, A., Moreno-Ventas, I., de la Rosa, J. D. (1991): H-type (hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite-type classification and nomenclature. *Earth Science Reviews*, 31: 237-253.
- Crespo-Blanc, A. y Orozco M. (1988): The Southern Iberian Shear Zone: A major boundary in the Hercynian folded belt. *Tectonophysics*, 148: 221-227.
- 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 SW Iberia. *Tectonophysics* 222: 177-194.
- De la Rosa, J. D. (1992): *Petrología de las Rocas Básicas y Granitoides del batolito de la Sierra Norte de Sevilla, Zona Surportuguesa, Macizo Ibérico*. Tesis Doctoral. Univ. de Sevilla: 312 pp.
- De la Rosa, J. D. y Castro, A. (1990): Estudio petrológico de una zona de interacción magmática al sur del Macizo de Gerena (Zona Surportuguesa, Sevilla): Modelo de mezcla. *Boletín Geológico y Minero*, 101: 315-332.
- Eberz, G. W., Nicholls, I. A., Maas, R., Mc Culloch, M. T., Whitford, D. J. (1990): The Nd- and Sr-isotopic composition of I-type microgranitoid enclaves and their host rocks from the Swifts Creek Pluton, southeast Australia. *Chemical Geology*, 85: 119-134.
- Faure, G. (1986): *Principles of Isotope Geology*. Second Edition. John Wiley & Sons. 589 pp.
- Fourcade, S., Javoy, M. (1991): Sr-Nd-O isotopic features of mafic microgranular enclaves and host granitoids from the Pyrenees, France: Evidence for their hybrid nature and inference on their origin. In Didier, J., Barbarin, B (eds) *Granites and their enclaves* 2 nd ed. Amsterdam, Elsevier: 345-364.
- Hawkesworth, C. J. y Ellam, R. M. (1989): Chemical fluxes and wedge replenishment rates along recent destructive plate margins. *Geology*, 17: 46-49.
- Hawkesworth, C. J., Hergt, J. M., Ellam, R. M., Mc Dermott F., (1991): Element fluxes associated with subduction related magmatism. In *the behavior and influence of fluids in subduction zones*. Eds Tarney J., Pickering K. T., Knipe R. J., Dewey J. F.. *Phil. Trans. R. Soc. London*:: 167-179.
- Holden, P., Halliday, A. N., Stephens, W. E. (1987): Neodymium and strontium isotope content of microdiorite enclaves points to mantle input to granitoid production. *Nature* 330, 53-56.
- Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribeiro, A., Conde, C. (1974) Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares E 1 : 1.000.000. *Instituto Geológico y Minero de España*, Madrid.
- Leshner C. E. (1990): Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing. *Nature*, 344: 235-238
- Lotze, F. (1945): Zur Gliederung der Varisciden der Iberischen Mesetas. *Geoth. Porsch.*, 6: 78-92.
- Nixon, G. T. y Pearce, T. H. (1987): Laser-interferometry study of oscillatory zoning in plagioclase: the record of magma mixing and phenocryst recycling in calc-alkaline magma chambers, Iztaccihuatl volcano, Mexico. *Am. Mineral.* 72: 1144-1162.
- Pin, C. (1991): Sr-Nd isotopic study of igneous and metasedimentary enclaves in some Hercynian granitoids from the Massif Central, France. In Didier, J. y Barbarin, B (eds) *Granites and their enclaves* 2 nd ed. Amsterdam, Elsevier: 313-343.
- Steiger, R. H. y Jäger, E. (1977): Subcommission on Geochronology: Convention on the use of decay constants in Geo and Cosmochronology. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 36: 359-362.
- Stephens, W. E., Holden, P., Henney, P. J. (1991): Microdioritic enclaves within the Scottish Caledonian granitoids and their significance for crustal magmatism. In Didier J. y Barbarin B. (eds) *Granites and their enclaves* 2 nd ed. Amsterdam, Elsevier: 125-134.
- York, D. (1969): Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth. Planet. Sc. Lett.*, 3: 320-324

Revisado el 20 de noviembre de 1992;
aceptado el manuscrito revisado el 5 de abril de 1993