

Procesos de mezcla incompleta entre un magma granodiorítico y una intrusión diorítica parcialmente consolidada en Llafranc (Cordillera Litoral Catalana, NE de la Península Ibérica)

Incomplete mixing processes between a granodiorite magma and a partially consolidated diorite intrusion in Llafranc (Catalonian Coastal Ranges, NE Iberian Peninsula)

Pere Enrique, Jingyao Xu y Sergi Esteve

Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. C/ Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona, España;
pere.enrique@ub.edu, jingyao.xu@ub.edu, sergi.esteve@ub.edu

ABSTRACT

The presence of heterogeneous intrusive rocks originated by mixing of magmas is common in different geological areas. In this paper the possible processes that have led to the formation of the Hercynian quartz-diorites of Llafranc are studied. The morphology of contacts between granodioritic and quartz-dioritic areas and the distribution of phenocrysts suggest that there was an injection of granodiorite magma in a partially consolidated quartz-diorite intrusion still enough fluid to mix in a limited way. The joint development of the two magmas at decreasing temperatures generates a sequence in the type of contacts that begins with curvilinear diffuse contacts with marked exchange of mineral phases, and ends with straight sharp contacts, without appreciable crystal exchange.

Key-words: *Magma mixing, hybridism, Hercynian, Catalanian Coastal Ranges.*

RESUMEN

La presencia de rocas intrusivas heterogéneas originadas por mezcla de magmas es frecuente en distintos ámbitos geológicos. En este trabajo se estudian los posibles procesos que han dado lugar a la formación de las cuarzodioritas hercínianas de Llafranc. La morfología de los contactos entre las zonas granodioríticas y cuarzodioríticas y la distribución de los fenocristales sugieren que se produjo una inyección de magma granodiorítico, en una intrusión cuarzodiorítica parcialmente consolidada pero aún con fluidez suficiente para mezclarse de forma limitada. La evolución conjunta de los dos magmas a temperaturas decrecientes genera una secuencia en la tipología de los contactos que empieza con contactos difusos curvilíneos, con marcado intercambio de fases minerales, y acaba con contactos netos, rectilíneos sin intercambio cristalino apreciable.

Palabras clave: *Mezcla de magmas, hibridismo, hercínico, Cadenas Costeras Catalanas.*

Geogaceta, 61 (2017), 123-126
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 15 de julio de 2016
Revisión: 3 de noviembre de 2016
Aceptación: 25 de noviembre 2016

Introducción

Es frecuente, en distintos contextos magmáticos, la presencia de rocas intrusivas con gran heterogeneidad composicional y textural a diferentes escalas que implican procesos de mezcla incompleta de magmas distintos (Didier, 1973; Didier y Barbarin, 1991). Las características de las rocas resultantes dependen principalmente del grado de cristalización de los magmas en el momento de su encuentro y de la historia del emplazamiento conjunto hasta la consolidación final.

El batolito calcoalcalino hercíniano que aflora a lo largo de la Cordillera Costera

Catalana se considera un batolito compuesto debido a que su formación se llevó a cabo por intrusiones sucesivas bien individualizadas. Esta característica es común en los batolitos calcoalcalinos de las zonas de subducción y particularmente manifiesta en los de la costa pacífica americana (Pitcher *et al.*, 1985). La escasa modificación textural de las intrusiones en contacto con las rocas plutónicas adyacentes indica un contraste térmico muy bajo y, en consecuencia, diferencias de edad de emplazamiento poco significativas (Enrique, 1985). Sin embargo, en algunas intrusiones de dicho batolito, como en las cuarzodioritas de Llafranc y Palamós (Girona), las relaciones texturales su-

gieren la interacción de dos magmas de composiciones contrastadas antes de su cristalización total (Enrique, 1990, Pérez *et al.*, 1996, 1997; Pérez, 1997; Xu, 2014). El estudio petrológico, macroscópico y microscópico, de los afloramientos de Llafranc (Fig. 1) permite elaborar algunas hipótesis sobre la evolución de dichos magmas, lo cual representa el objeto de este trabajo.

Contexto geológico y caracterización petrológica

El afloramiento costero de Llafranc estudiado constituye parte de una intrusión de rocas plutónicas de composición inter-

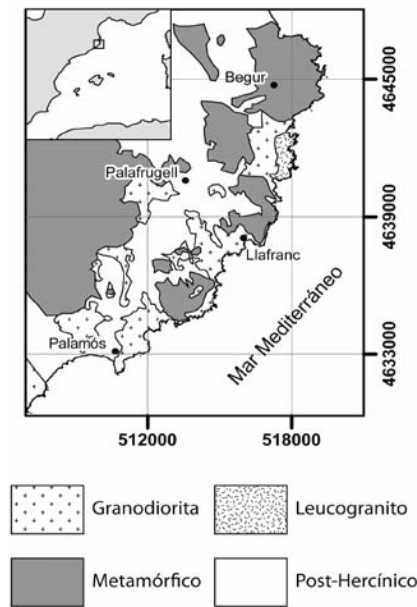


Fig. 1.- Situación y esquema geológico del área estudiada. ETRS89 UTM 31N.

Fig. 1.- Location and geological sketch of the studied area. ETRS89 UTM 31N.

media que varía entre cuarzodioritas y tonalitas (Enrique, 1990; Pérez, 1997; Xu, 2014), a las que, en adelante, nos referiremos como cuarzodioritas. Se halla situado a unos 200 m al S de la playa de Llafranc y tiene unos 175 m de longitud por unos 60 m de anchura máxima. Por el E y el S limita con el mar y por el O con terreno urbanizado. Por el N entra en contacto con materiales pelíticos cambro-ordovícicos (Losantos *et al.*, 2004) transformados en cornubianitas con cordierita por el metamorfismo de contacto.

Por el SO limita con una importante intrusión de granodiorita biotítica con megacristales de feldespato potásico (Pérez, 1997; Losantos *et al.*, 2004; Xu, 2014).

Las cuarzodioritas son de color gris oscuro y homófonas (Hughes, 1982) (Fig. 2A). Están constituidas principalmente por plagioclasa y biotita (28–31%) idiomorfas, con cantidades significativas de cuarzo y de anfíbol (~14%, Pérez *et al.*, 1997). La plagioclasa es mayoritariamente andesina (con algunos núcleos de bytownita) y el anfíbol dominante es magnesio-hornblenda.

La textura es esencialmente equigranular de grano fino (tamaño de grano de 0,5–1 mm) aunque algunas plagioclasas y anfíboles pueden alcanzar 3–5 mm de longitud dando origen a una textura ligeramente porfídica. Sin embargo, una de las características más destacables de estas cuarzodioritas es su heterogeneidad a diversas es-

calas, la cual incluye la presencia de abundantes xenocristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, de más de 1 cm de diámetro, que confieren a la roca un aspecto bastante más porfídico. La heterogeneidad más importante, no obstante, se debe a la presencia de un gran número de inyecciones de granitoides (principalmente granodioríticas) de diversas dimensiones y morfologías que afectan la totalidad del afloramiento en mayor o menor intensidad (Fig. 2B).

La composición y textura de los principales cuerpos granodioríticos son similares a los de la granodiorita que aflora inmediatamente al SO del *stock* cuarzodiorítico.

Resultados

Las relaciones entre las diversas fases minerales y entre las diferentes unidades petrológicas observadas permiten establecer una tipología preliminar de los contactos entre la granodiorita y la cuarzodiorita y sus posibles implicaciones petrogenéticas.

A la escala del afloramiento la cuarzodiorita es volumétricamente predominante y actúa como roca encajante de la granodiorita (y, en menor medida, de otros granitoides más diferenciados).

Algunas morfologías significativas de las intrusiones de granitoides (granodioritas biotíticas, monzogranitos biotíticos y leucogranitos) son las siguientes: a) diques rectilíneos (Fig. 3A), b) diques de formas curvas más o menos sinuosas (Fig. 3B), c) diques fragmentados y dispersados como fragmentos redondeados aislados (Fig. 3C).

Otros aspectos estructurales interesantes se refieren a las interacciones que se producen entre las dos unidades magmáticas: a) contactos netos (Fig. 3B, zona superior), b) contactos graduales formando zonas

híbridas (Fig. 3D), c) alineaciones de xenocristales con aspecto de diques difusos (Fig. 4A) y d) xenocristales dispersos en la cuarzodiorita (Fig. 4B).

Discusión

Las diferentes relaciones entre la granodiorita y la cuarzodiorita observadas en el cuerpo intrusivo de Llafranc sugieren que ambos materiales entraron en contacto en estado magmático (Fig. 5), lo cual permitió una mezcla limitada tanto entre las fases cristalizadas como entre las fases fundidas.

Además, las distintas tipologías de los contactos parecen indicar que la mezcla se produjo durante un prolongado lapso de tiempo a medida que los magmas iban cristalizando hasta la su solidificación total. En ese sentido, las primeras inyecciones de magma granodiorítico, con numerosos fenocristales en suspensión, habrían intruído en un magma cuarzodiorítico más cristalizado pero aún con la viscosidad suficientemente baja como para permitir la incorporación de muchos fenocristales del magma granodiorítico (Fig. 4B).

Se propone que un mecanismo eficaz para tal incorporación podría deberse a la formación de disrupciones del material cuarzodiorítico plástico dando origen a fracturas más o menos curvilíneas que se rellenarían con el magma, esencialmente granodiorítico (Fig. 6). En una segunda fase, producida por el movimiento generalizado durante el emplazamiento, algunas de esas fracturas se volverían a cerrar atrapando los fenocristales de la granodiorita en la masa cuarzodiorítica y exprimiendo los líquidos residuales del magma granodiorítico, dando lugar a diques difusos, zonas híbridas o xenocristales dispersos según la cantidad de líquido residual

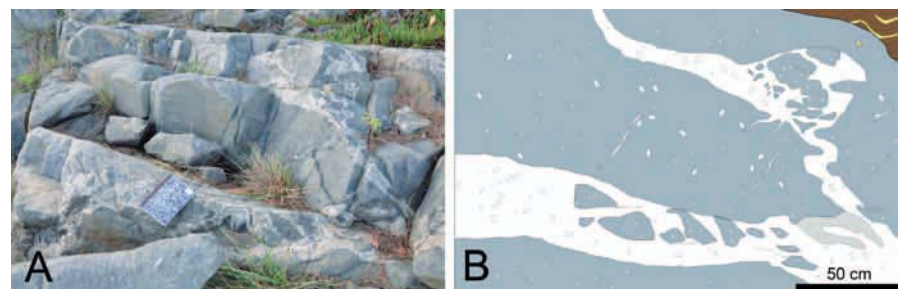


Fig. 2.- A) Aspecto general de la cuarzodiorita de Llafranc en el afloramiento. Destaca su aspecto masivo y su color gris oscuro así como la presencia de numerosas inyecciones muy irregulares de granodiorita. B) Esquema detallado de las inyecciones granodioríticas de la fig. 2A. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- A) General view of the Llafranc quartz-diorite outcrop. It is remarkable its massive look, dark grey colour and its numerous irregular granodiorite injections. B) Detailed sketch of the granodiorite injections in figure 2A. See color figure in the web.

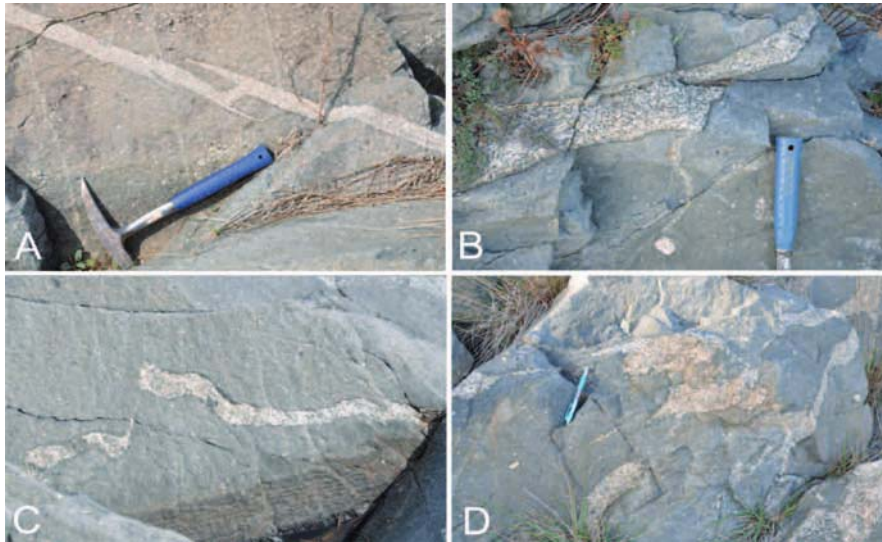


Fig. 3.- A) Diques rectilíneos de granito en una cuarzdiorita con comportamiento frágil. B) Apófisis delgada y de morfología ondulada de granodiorita en la cuarzdiorita. C) Dique de granodiorita ondulado y desmembrado en fragmentos globulares en el interior de la cuarzdiorita, mostrando un comportamiento viscoso de ambos materiales. D) Contacto difuso de varias inyecciones granodioríticas con la cuarzdiorita sugiriendo un comportamiento semifluido de ambos cuerpos magmáticos. Se observa la incorporación de xenocristales en la cuarzdiorita. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- A) Straight granite dykes in a quartz-diorite with brittle behaviour. B) Undulated thin granodiorite apophyses in quartz-diorite. C) Undulated granodiorite dyke and dismembered in round-shaped fragments into quartz-diorite, suggesting both materials were viscous. D) Diffuse contact between some granodiorite injections with quartz-diorite, suggesting a semi-fluid behaviour, incorporating xenocrysts into the quartz-diorite. See color figure in the web.

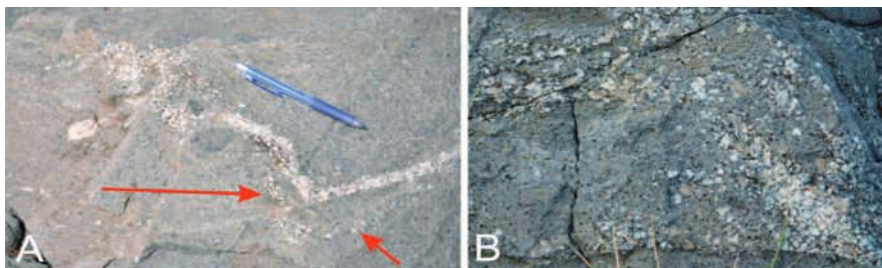


Fig. 4.- A) Alineaciones de xenocristales con aspecto de dique difuso (indicado con flechas) paralelo a un dique posterior con contacto neto (ver texto). B) Xenocristales dispersos en el seno de la cuarzdiorita. See color figure in the web.

Fig. 4.- A) Aligned xenocrysts forming a diffuse dyke (arrows) parallel to a later dyke (see text). B) Disperse xenocrysts into quartz-diorite. See color figure in the web.

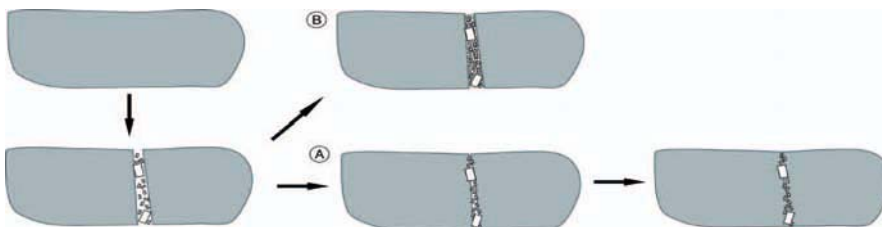


Fig. 6.- Esquema conceptual del mecanismo propuesto. El cuerpo cuarzdiorítico parcialmente consolidado es intruido por el magma granodiorítico. A) El estado plástico y relativamente poco viscoso de la cuarzdiorita permite un cierto grado de mezcla, así como el escape del líquido residual de la granodiorita, quedando los fenocristales de ésta atrapados formando un dique difuso. B) El proceso de mezcla y expulsión de los líquidos residuales se ve dificultado por un cada vez mayor grado de consolidación de la cuarzdiorita, cristalizando in situ el magma granodiorítico en forma de dique bien definido. Ver figura en color en la web.

Fig. 6.- Conceptual sketch of the proposed mechanism. The partially consolidated quartz-dioritic body is intruded by granodiorite magma. A) The plastic and relatively fluid state of the quartz-diorite allows mixing to some degree, as well as the escape of the residual granodioritic liquids, leaving its phenocrysts forming a diffuse dyke. B) The process of mixing and expulsion of residual liquids is hindered by the increasing degree of consolidation of the quartz-diorite, crystallizing in situ a well-defined dyke of granodiorite. See color figure in the web.

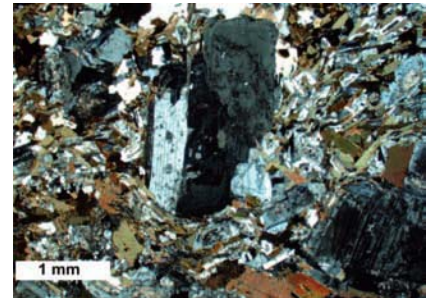


Fig. 5.- Contacto entre la cuarzdiorita (inferior) y un dique difuso de granodiorita (superior). El fenocristal de plagioclasa de la granodiorita protruye la cuarzdiorita y las biotitas de ésta lo envuelven parcialmente. Ver figura en color en la web.

Fig. 5.- Contact between quartz-diorite (down) and a diffuse granodiorite dyke (up). The plagioclase phenocryst of the granodiorite protrudes the quartz-diorite, and its biotites partially surround it. See color figure in the web.

y la efectividad de la mezcla (Fig. 6 opción A). A mayor grado de cristalización del magma cuarzdiorítico, con el consiguiente aumento de la viscosidad, las fracturas tenderían a ser más rectilíneas, y el proceso de expulsión de los líquidos residuales, así como el intercambio de cristales con el entorno, serían menos efectivos, dando lugar a diques con contactos netos (Fig. 6 opción B). La figura 7, basada en la fotografía de la figura 4A, ilustra este proceso en dos diques aproximadamente paralelos formados en estadios diferentes de consolidación.

El modelo aquí expuesto explicaría la presencia habitual de megacristales de feldespato potásico aislados y diseminados en el seno de enclaves cuarzdioríticos dentro de granitoides con megacristales (e.g. Didier y Barbarin, 1991; Pérez *et al.*, 1996) por un proceso de interacción reiterado en diferentes estadios de cristalización de los magmas implicados.

Así mismo, varias de las estructuras observadas son análogas a las obtenidas experimentalmente en ensayos de mezcla a alta presión y temperatura por Laumonier *et al.* (2014, 2015), así como a las descritas en diversos trabajos sobre la formación de enclaves (Didier, 1973; Didier y Barbarin, 1991).

Por lo tanto, como consecuencia de la distinta tipología de los contactos observada entre la cuarzdiorita y las inyecciones de magma granodiorítico en su interior, se propone un modelo evolutivo para la cristalización conjunta de los dos magmas que explicaría los distintos grados de intercambio de materiales y del hibridismo resultante.

El proceso consistiría en la llegada de un magma granodiorítico en proceso de cristalización que entraría en contacto con

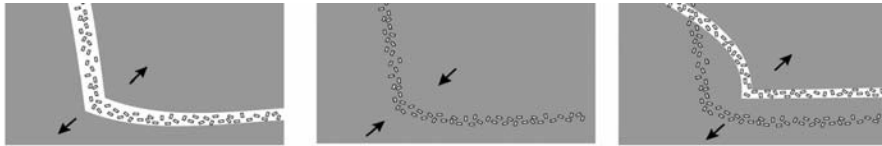


Fig. 7.- Esquema de formación de los diques de la figura 4A. El magma granodiorítico rellena una fractura en la cuarzdiorita. El movimiento de los magmas provoca el cierre de la fractura, y el estado relativamente plástico de la cuarzdiorita permite el escape de los líquidos residuales y un cierto grado de mezcla, quedando los fenocristales atrapados. Movimientos posteriores provocan la apertura de una nueva fractura paralela, pero el mayor grado de consolidación de la cuarzdiorita impide el escape y la mezcla de los líquidos residuales, formándose un dique bien definido. Ver figura en color en la web.

Fig. 7.- Schematic cartoon for the formation of the dykes in figure 4A. Granodioritic magma replenishes a fracture in the quartz-diorite. The movement of the magmas closes the fracture, and the relatively plastic quartz-diorite allows the escape of the residual liquids and some degree of mixing, leaving the phenocrysts retained. Later movements trigger the formation of a new parallel fracture, but the higher consolidation degree prevent the escaping and mixing of residual liquids, forming a well defined dyke. See color figure in the web.

un magma cuarzdiorítico más cristalizado y, por tanto, con una viscosidad más elevada pero aún con una fluidez suficiente para poder mezclarse algo con la nueva intrusión. A medida que la temperatura del conjunto intrusivo fuera descendiendo los magmas aumentarían su viscosidad llegando a solidificar. La cuarzdiorita se solidificaría antes debido a su temperatura solidus más elevada, permitiendo la formación de fracturas y la formación de diques rectilíneos con contactos netos (Fig. 8 y Fig. 2A), cuya composición leucogranítica representaría la última fase fundida de la cristalización de la granodiorita (Fig. 8C).

Conclusiones

La observación morfológica de las intrusiones granodioríticas y de sus diferenciados intrusivos sugiere que las inyecciones tuvieron lugar durante un importante lapso de tiempo con un progresivo incremento de la viscosidad del magma cuarzdiorítico.

En el estadio de mayor temperatura el magma cuarzdiorítico parcialmente consolidado se fracturaba y se volvía a soldar repetidamente debido a su gran plasticidad.

Durante ese periodo el magma granodiorítico, con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y feldespato potásico, ocupaba los espacios formados por las fracturas de superficies curvas y blandas de la cuarzdiorita. En algunos casos aislaba fragmentos redondeados de la cuarzdiorita formando enclaves.

El ligero movimiento magmático produjo el cierre de muchas de esas cavidades atrapando los fenocristales en la cuarzdiorita semiconsolidada dando origen a los abundantes xenocristales y al consiguiente hibridismo entre la granodiorita y la cuarzdiorita.

En los estadios de mayor consolidación de la cuarzdiorita, el magma granodiorítico y los líquidos residuales más ácidos ocuparon fracturas de comportamiento progresivamente más frágil, rectilíneas y con mucho menor intercambio de masas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Ramón Casillas y a un revisor anónimo, así como a Manuel Díaz, editor de Geogaceta, los planteamientos y aportaciones constructivas en la redacción de este trabajo.

Bibliografía

- Didier, J. (1973). *Granites and their enclaves*. Elsevier, Amsterdam, 393 p.
- Didier, J. y Barbarin, B. (eds.) (1991). *Enclaves and granite petrology*. Elsevier, Amsterdam, 625 p.
- Enrique, P. (1985). *La asociación plutónica tardi-Herciniana del Macizo del Montnegre, Catalánides Septentrionales (Barcelona)*. Tesis Univ. de Barcelona, 351 p.
- Enrique, P. (1990). *Acta Geológica Hispánica* 25, 39–64.
- Hughes, C.J. (1982). *Igneous Petrology*. Elsevier, Amsterdam, 551 p.
- Laumonier, M., Scaillet, B., Arbaret, L. y Champallier, R. (2014). *Lithos* 196–197, 281–300.
- Laumonier, M., Scaillet, B., Arbaret, L., Andújar, J. y Champallier, R. (2015). *Chemical Geology* 418, 158–170.
- Losantos, M., Roqué, C. y Pallí, L. (2004). *Mapa Geològic de Catalunya 1:25.000, Calella de Palafrugell 335-1-2 (79-26)*, ICC-IGC, Barcelona.
- Pérez, L. (1997). *Les complexes quartz-dioritiques de Palamós et Llafranc (chaines côtières catalanes). Etude pétrographique, géochimique et géochronologique*. Diplôme Univ. de Ginebra, 226 p.
- Pérez, L., Enrique, P. y Delaloye, M. (1996). *Geogaceta* 20(3), 605–608.
- Pérez, L., Enrique, P. y Delaloye, M. (1997). *Terra Nova* 9, Abstract Supplement No. 1, 505.
- Pitcher, W.S., Atherton, M.P., Cobbing, E.J. y Beckinsale, R.D. (eds) (1985). *Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes*. Blackie, Glasgow, 328 p.
- Xu, J. (2014). *Estudio petrológico de las dioritas de Llafranc: un ejemplo de mezcla de magmas en estado de fusión parcial*. Trabajo de fin de Grado. Univ. de Barcelona (inéd.), 50 p.

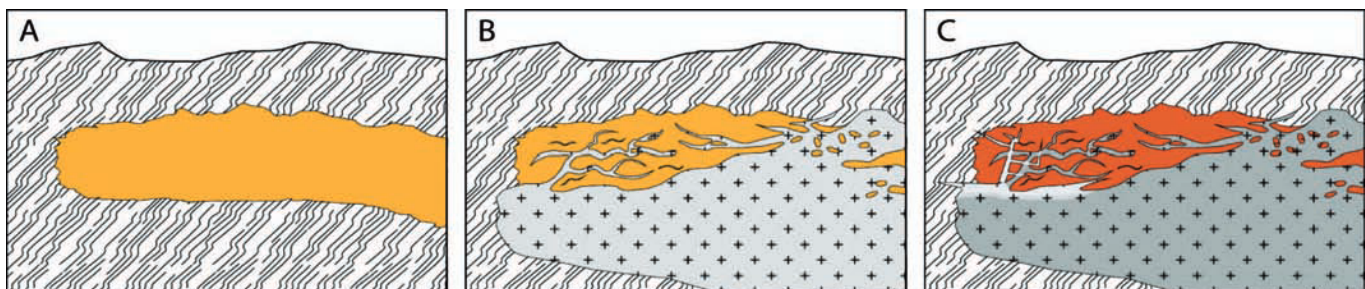


Fig. 8.- Esquema evolutivo de la intrusión cuarzdiorítica de Llafranc desde su emplazamiento (A) hasta su cristalización total (C). En un estadio de consolidación incompleta se produce la interacción con un magma granodiorítico en forma de inyecciones y mezclas de ambos componentes que prosiguen hasta la consolidación final (B y C). Ver figura en color en la web.

Fig. 8.- Evolutive sketch of the Llafranc quartz-diorite intrusion since its emplacement (A) until its total crystallization (C). In an incomplete consolidation stage, there is an interaction with granodioritic magma forming injections and mixtures of both components, persisting until the complete consolidation (B and C). See color figure in the web.