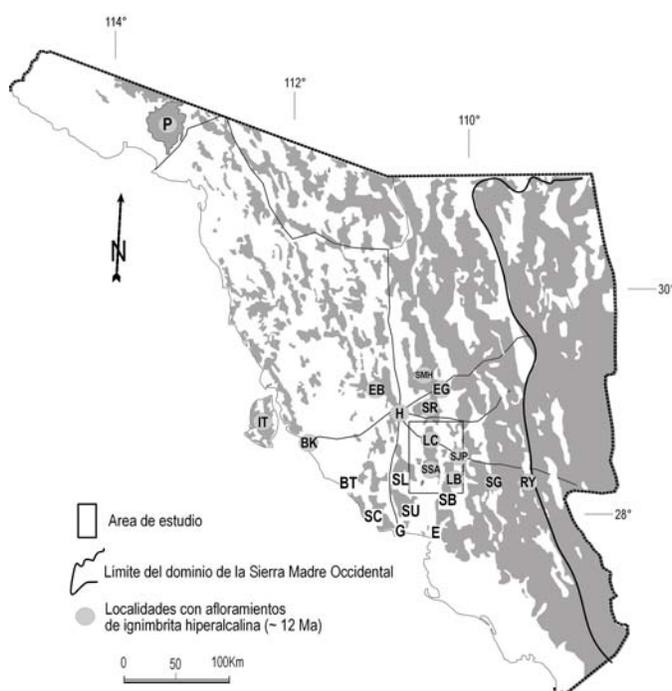


# Una serie pigeonítica del Mioceno medio-superior en Sonora: Marcador de la evolución magmática en el rift del Proto-Golfo de California.

Jesús Roberto Vidal Solano <sup>a</sup>, Francisco A. Paz Moreno <sup>a</sup> y Alain Demant <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Apdo. Postal 847, 83000 Hermosillo, Sonora, México. E-mail: [jvidal@ciencias.uson.mx](mailto:jvidal@ciencias.uson.mx) ; [paz@geologia.uson.mx](mailto:paz@geologia.uson.mx)

<sup>b</sup> Pétrologie Magmatique, Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III), CC 441, 13397 Marseille Cedex 20, France. E-mail: [alain.demant@univ.u-3mrs.fr](mailto:alain.demant@univ.u-3mrs.fr)



**Figura 1:** Localización y fisiografía de la región de estudio: Ilustración de la tectónica distensiva en el Estado de Sonora (Cochemé, 1985; Paz-Moreno, 1992); las áreas en gris representan a los relieves y las áreas en blanco a las cuencas (59.2% de la superficie); IT, Isla Tiburón; BK, Bahía de Kino; BT, Bahía Tastiota; SC, San Carlos; G, Guaymas; SSA, Sierra San Antonio; SB, Sierra Bacatete; SL, Sierra Libre; SU, Sierra Santa Ursula; E, Empalme; H, Hermosillo; SMH, San Miguel de Horcasitas; EB, Rancho El Bajío; SR, Santa Rosalía; LC, La Colorada; RY, Cuenca del Río Yaqui; SG, Suaqui Grande; LB, Sierra Lista Blanca; SJP, San José de Pimas; EG, El Gavilán.

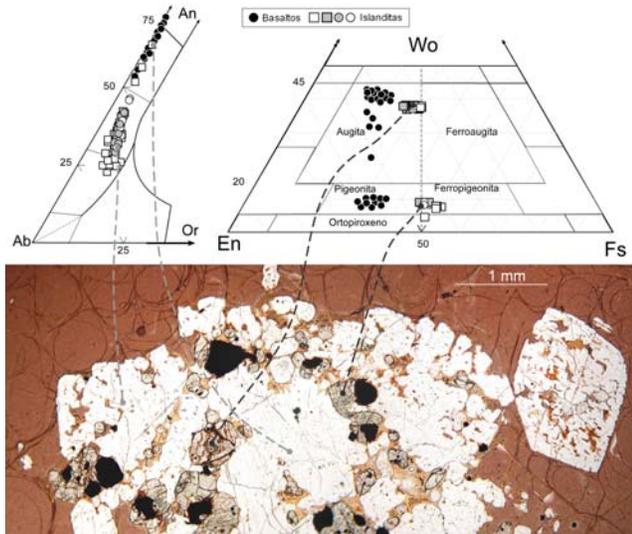
## Marco geológico

La evolución tectono-magmática terciaria en el NW de México registró un episodio notable durante el Mioceno medio-superior con la llegada de magmas anorogénicos asociados al establecimiento del rift del Proto-Golfo de California. La aparición de lavas toleíticas en Sonora, ocurre a ca. 12 Ma, poco después del emplazamiento de ignimbritas hipercalcalinas y basaltos transicionales que marcan la etapa inicial de la ruptura continental. Las primeras manifestaciones toleíticas (12-11 Ma) corresponden a líquidos ácidos que se manifiestan en forma de lavas e intrusivos subvolcánicos. El segundo ciclo de extrusión (10-8 Ma) de líquidos toleíticos lo constituyen mesas basálticas. La identificación de las rocas formadas durante la primera etapa del volcanismo toleítico, ha sido hasta la fecha enmascarada, debido a que coexisten con lavas calco-alcalinas ampliamente representadas y estudiadas en la región de Guaymas (Figura 1). De esta manera, el objetivo principal de este trabajo se enfoca en la caracterización de la mineralogía y química de las lavas de naturaleza toleítica, con el fin de establecer su génesis y significado dentro

de la sucesión de eventos tectono-magmáticos en la región.

## Caracterización de la serie pigeonítica en Sonora

**Mineralogía** - La presencia de lavas intermedias a ácidas de naturaleza toleítica ocurre en la región comprendida entre La Colorada y La Sierra San Antonio (Figura 1), donde cubren a las unidades ignimbríticas hipercalcínicas. Estas rocas se presentan como derrames oscuros, vítreos y porfíricos. Los datos mineralógicos proporcionan información que permiten la caracterización de estas lavas (Figura 2): [1] Su mineralogía está constituida por una asociación de minerales anhidros de plagioclasa + augita + pigeonita-ferropigeonita + óxidos de Fe-Ti; [2] las plagioclasas de tipo andesina son relativamente ricas en potasio y se caracterizan por una gran abundancia de inclusiones vítreas; esta incorporación de líquido en los cristales sugiere una cristalización rápida, originadas por la intrusión de un magma básico y/o, una convección activa en un reservorio de gran tamaño



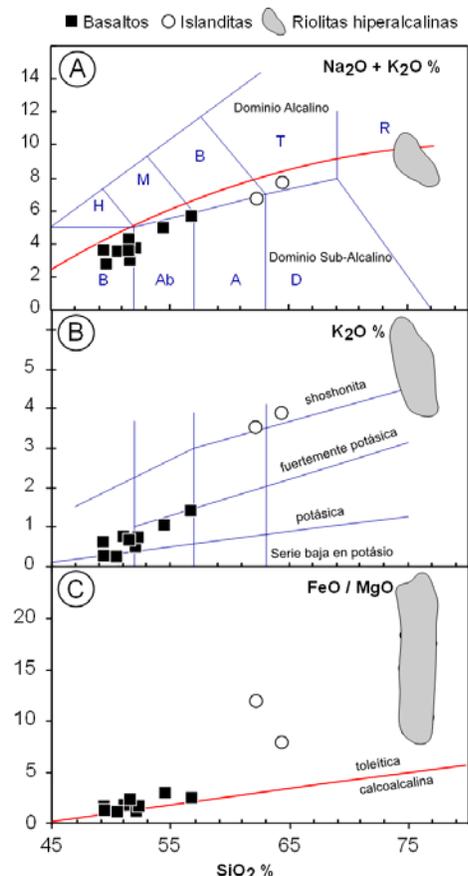
**Figura 2:** Mineralogía de las lavas de la serie pigeonítica y aspecto en lámina delgada de las islanditas. Se puede notar el aspecto glomeroporfírico (agregados de plagioclasa, piroxenos y opacos) y la matriz vítrea-perlítica.

de anfíbol y micas indica que estos líquidos son originalmente pobres en agua; [4] los fenocristales forman agregados, como resultado de una cristalización importante del magma en profundidad, mientras que la matriz exclusivamente vítrea señala un ascenso rápido y un enfriamiento violento en la superficie, impidiendo el desarrollo de microlitos. Este vidrio tiene además una textura perlítica. Los geotermómetros de Lindsley (1983) para los piroxenos y de Carmichael (1967) para los óxidos de Fe-Ti, aplicados a los cristales de los agregados dieron, en ambos casos, temperaturas del orden de 950°C.

Al sur de la Sierra San Antonio, en los bordes del graben de Empalme, afloran las mesetas basálticas que caracterizan el segundo ciclo de volcanismo toleítico en la región. Estas lavas se caracterizan por una textura dolerítica de plagioclasa + augita + pigeonita + olivino + óxidos de Fe-Ti, con escasos fenocristales de olivino y plagioclasa. Las plagioclasas tienen una composición muy homogénea de tipo labradorita (Figura 2). Por su parte los olivinos muestran una evolución desde Fo<sub>82</sub> en los

[1] Su mineralogía está constituida por una asociación de minerales anhidros de plagioclasa + augita + pigeonita-ferropigeonita + óxidos de Fe-Ti; [2] las plagioclasas de tipo andesina son relativamente ricas en potasio y se caracterizan por una gran abundancia de inclusiones vítreas; esta incorporación de líquido en los cristales sugiere una cristalización rápida, originadas por la intrusión de un magma básico y/o, una convección activa en un reservorio de gran tamaño

(Couch *et al.*, 2001); [3] la ausencia

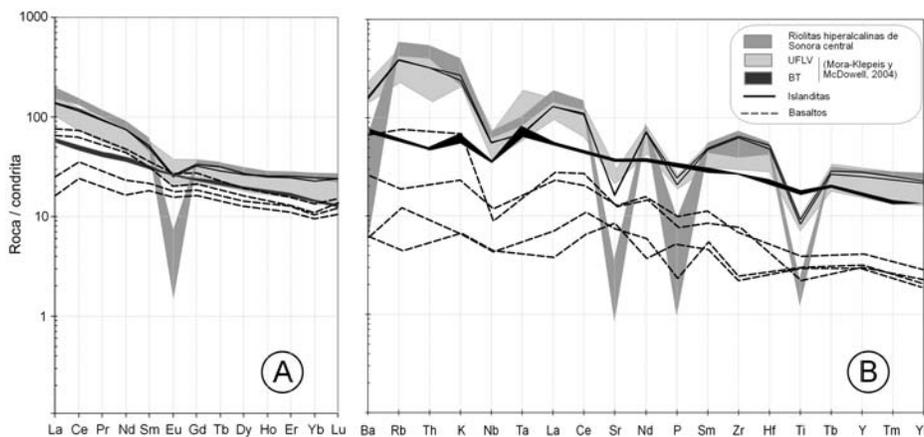


**Figura 3 :** Diagramas de clasificación química de las lavas estudiadas. A.- TAS; Peccerillo y Taylor (1976); C.- Miyashiro (1974).

fenocristales hasta  $Fo_{37}$  en los microcristales que componen la matriz. Los piroxenos siempre se presentan en posición intersticial con respecto a las plagioclasas. Los análisis de microsonda electrónica ponen de manifiesto la existencia de dos grupos de clinopiroxenos: augitas ricas en calcio y pigeonitas. La presencia de pigeonita y el enriquecimiento en hierro observado en ambos piroxenos, son rasgos propios de lavas con afinidad toleítica (Nisbet y Pearce, 1977).

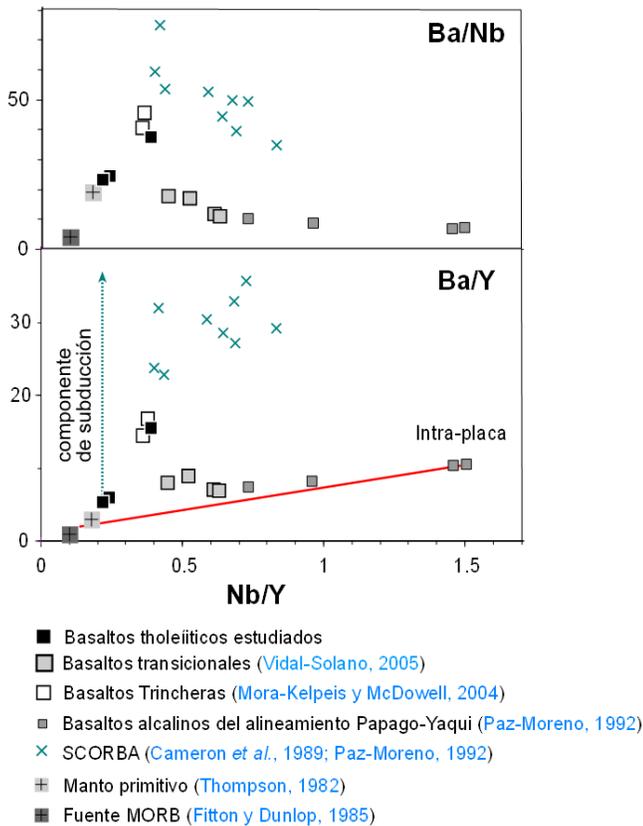
**Química** - Las lavas vítreas porfíricas contienen entre 60 y 65% de  $SiO_2$ , bajos valores en  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  y  $TiO_2$  (13-14%, ~1% y 0.7-0.9% respectivamente) y por el contrario, cantidades bastante elevadas de  $K_2O$  (>3.4%). Se reparten en el diagrama TAS (Le Bas *et al.*, 1986) en el campo de las andesitas-dacitas, justo en el límite con el dominio de las lavas alcalinas. Sin embargo, su riqueza en  $FeO^t$  (8.5-13 %) que indica una afinidad toleítica, conduce a clasificar estas lavas como **islanditas** (Figura 3; Carmichael, 1964). Las lavas básicas terminales, tienen valores en sílice entre 48 y 54%, con bajos porcentajes de  $K_2O$  (<0.5%) y altos valores en  $FeO$  y  $CaO$ . Estas lavas que tienen olivino e hiperstena normativos, presentan bajos contenidos de álcalis que las sitúan en el dominio subalcalino y dentro de los campos de los **basaltos** y **andesitas basálticas** en el diagrama TAS.

embargo, su riqueza en  $FeO^t$  (8.5-13 %) que indica una afinidad toleítica, conduce a clasificar estas lavas como **islanditas** (Figura 3; Carmichael, 1964). Las lavas básicas terminales, tienen valores en sílice entre 48 y 54%, con bajos porcentajes de  $K_2O$  (<0.5%) y altos valores en  $FeO$  y  $CaO$ . Estas lavas que tienen olivino e hiperstena normativos, presentan bajos contenidos de álcalis que las sitúan en el dominio subalcalino y dentro de los campos de los **basaltos** y **andesitas basálticas** en el diagrama TAS.



**Figura 4:** (A) Espectros de Tierras Raras normalizados con condrita (valores de normalización de Boynton, 1984); (B) diagrama de multielementos (valores de normalización de Thompson *et al.*, 1984)

Los islanditas tienen concentraciones elevadas en Ba (~1100 ppm) y Zr (400-450 ppm) y presentan un espectro de REE muy similar al de las unidades ignimbríticas subyacentes (Figura 4A), pero con una anomalía en Eu menos acentuada y un enriquecimiento en LREE ligeramente menor [(La/Yb) $_N$  = 5.6-6.1]. Dos patrones espectrales pueden ser reconocidos en las concentraciones de REE de los basaltos (Paz-Moreno, 1992), el primero forma una traza relativamente horizontal [(La/Yb) $_N$  = 1.5-2.23] con ligero enriquecimiento en LREE; el segundo, presenta una traza más enriquecida en LREE [(La/Yb) $_N$  = 4.5]. Los diagramas de multi-elementos normalizados con condrita (Figura 4B, Thompson *et al.*, 1984), muestran para las islanditas, espectros irregulares debido a anomalías negativas en Ti, P y Sr, ligadas a su grado de diferenciación. No obstante, el trazo del conjunto se enriquece hacia los elementos más incompatibles. Es de notar que estas lavas presentan una anomalía negativa en Nb-Ta y el mismo trazo espectral que las ignimbríticas hiperalcalinas subyacentes. Los diagramas multielementos de los basaltos muestran un espectro similar y menos enriquecido que el de las islanditas. Este presenta un enriquecimiento en elementos alcalinos y alcalinos terrosos (Ba, Rb, K y Sr) pero sobre todo en Ba.



**Figura 5:** Diagramas de Ba/Nb vs Nb/Y y Ba/Y vs Nb/Y mostrando la evolución de las fuentes y su componente de subducción (según Fitton et al., 1988 y 1991)

N-MORB. Las concentraciones en Ba, Y y Nb permiten caracterizar el grado de metasomatismo de la fuente de los magmas basálticos. En el diagrama de la Figura 5, se han reportado a manera de comparación, los cocientes Ba/Nb, Ba/Y y Nb/Y de lavas básicas de diferente naturaleza: [1] los basaltos y las andesitas basálticas Oligoceno-Mioceno [29-20Ma] de la SMO (SCORBA), interpretados como resultado de la fusión parcial de un manto litosférico afectado por subducciones anteriores (Cameron *et al.*, 1989), [2] los basaltos alcalinos plio-cuaternarios de fuente astenosférica del alineamiento Papago-Yaqui (Paz-Moreno, 1992), [3] los basaltos transicionales asociados a las ignimbritas hipercalinas de Sonora central (Vidal-Solano, 2005) y, [4] las fuentes de tipo MORB y Manto Primitivo (Thompson, 1982; Fitton y Dunlop, 1985).

Los cocientes de los basaltos toleíticos estudiados muestran dos tendencias, que son concordantes con las trazas espectrales de REE antes señaladas. El primer grupo con espectros de REE horizontales, tiene relaciones de Ba/Nb y Ba/Y bajas, próximas a las de los magmas de tipo MORB y Manto Primitivo, indicando un origen a partir de la fusión parcial de un manto de tipo astenosférico que conserva una impronta mínima de un componente de subducción. Las firmas de estas rocas son similares a las de los basaltos oceánicos de la fosa de Guaymas (Figura 4A, Saunders *et al.*, 1982). Por el contrario, el segundo grupo de basaltos toleíticos, presenta cocientes poco más elevados de Ba/Nb y Ba/Y, que marcan más claramente un componente de subducción. Estos basaltos más ricos en Ba, son similares a

## Discusión

Si bien han sido definidas las principales características mineralógicas y químicas que distinguen a las lavas toleíticas en la región (Ej. presencia de pigeonita, enriquecimiento progresivo en hierro de los piroxenos y elevados valores de Fe en las lavas, entre otras), otros rasgos comúnmente observados en los arcos volcánicos, están también presentes (enriquecimiento en K, Ba y Sr, así como anomalías negativas en Nb-Ta). Tales particularidades han sido señaladas por otros autores en el estudio de unidades similares en áreas adyacentes (Johnpeer, 1977; Wilson, 1978; Cochemé, 1985; Paz-Moreno, 1992; Mora-Klepeis y McDowell, 2004; Vargas-Navarro, 2005; Gans *et al.*, 2006). Sin embargo, estos autores han agrupado a estas lavas dentro de una misma secuencia magmática calco-alcalina synrift lo que ha dificultado su identificación, y correlación.

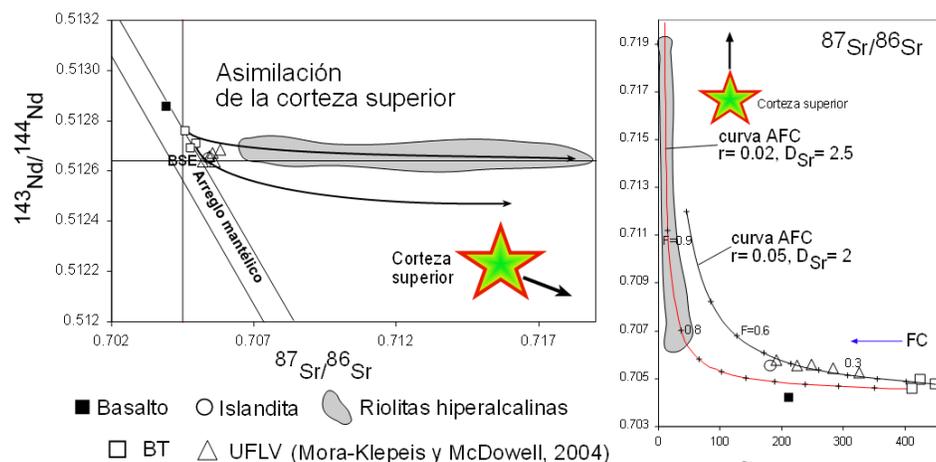
La fusión parcial de un manto meta-somatizado puede dar respuesta a la generación de magmas enriquecidos en LREE, LILE, Th, U y, empobrecidos en Nb y Ta, comparado con los

los basaltos de misma edad reportados en la Sierra Santa Ursula (Mora-Klepeis y McDowell, 2004). Por consiguiente, la fuente de las lavas toleíticas emitidas en el sur de Sonora, entre 10-8 Ma, conservan una herencia de las subducciones anteriores. Debido a eso, las lavas intermedias a ácidas que provienen de la diferenciación del magmatismo toleítico presentan características químicas parecidas a las de un arco volcánico.

## Petrogénesis

Considerando a los basaltos terminales como los magmas padres de la serie, es posible trazar **el papel de la cristalización fraccionada en la génesis de las islanditas**: [1] un ligero enriquecimiento en la suma de las REE y del cociente  $(La/Lu)_N$ , [2] un enriquecimiento en elementos fuertemente incompatibles como el Rb, K, U y Th y, [3] un empobrecimiento en Ca, Al, Eu y Sr. Tales evoluciones señalan el rol eminente de los feldespatos en la cristalización fraccionada, sin embargo, la disminución de los valores en MgO, Ti y Co, implica también un fraccionamiento de olivino, piroxeno y de minerales ferro-titaníferos. Los porcentajes en hierro más elevados en las islanditas con respecto a los basaltos son prueba de la cristalización tardía de magnetita y/o de ilmenita, un carácter típico de la evolución de los líquidos toleíticos (*Fenner trend*). La correlación entre los minerales normativos y la suma de las REE como índice de diferenciación muestra, primero de los basaltos a las islanditas, una disminución regular de los porcentajes en apatito y anortita normativa que indica un fraccionamiento regular de estos minerales y, segundo, un aumento de los valores en hiperstena normativa, como efecto de la cristalización del olivino que enriquece el líquido en sílice (Figura 2).

Los análisis isotópicos de Sr y Nd efectuados en una islandita y en un basalto dolerítico permiten establecer una correlación con otras lavas estudiadas anteriormente en la región. En los diagramas petrogenéticos (Figura 6), hemos reportado a manera de comparación, los datos geoquímicos e isotópicos de Mora-Klepeis y McDowell (2004) sobre las rocas volcánicas de la *Unidad Félsica La Ventana* (UFLV, 12-11Ma) y los *Basaltos Trincheras* (BT, 10-8Ma) en la Sierra Santa Ursula. Los valores isotópicos de Sr y Nd de la islandita analizada, muestran una buena correlación con los valores reportados para las lavas de la UFLV, indicando que ambas rocas derivan de una misma fuente mantélica. Por el contrario



**Figura 6:** Diagrama de correlación de los valores isotópicos de Sr y Nd. BSE, Bulk Silica Earth. Modelo AFC para las lavas evolucionadas de la serie pigeonítica.

los contenidos de Sr y Nd radiogénicos de la lava basáltica analizada presentan, con respecto a los de los BT, valores más elevados en Nd y menos enriquecidos en Sr. Los valores isotópicos de las rocas básicas se distribuyen dentro del campo del arreglo mantélico. El conjunto de las rocas más evolucionadas incluyendo a la

islandita, presenta con respecto al básico, valores radiogénicos más bajos en Nd y más elevados en Sr. Se encuentra desfasado hacia la derecha, lo que señala la apertura del sistema isotópico Rb-Sr y una contaminación por una corteza superior radiogénica. Este proceso es más acentuado en las ignimbritas hiperalcalinas que subyacen a las islanditas (Vidal-Solano, 2005).

La modelización cuantitativa de los procesos de cristalización fraccionada asimilación (AFC, DePaolo, 1981) proporciona una buena visión de la génesis de las rocas diferenciadas toleíticas de la región. Debido a que los datos isotópicos de las rocas plutónicas laramídicas de la costa de Sonora han confirmado la presencia de un basamento precámbrico (Valencia-Moreno *et al.*, 2001), los valores del material cortical utilizados en la modelización, son los de corteza precámbrica reportados por Miller y otros (2000). Los cálculos muestran que las islanditas pueden derivar de los Basaltos Trincheras (más enriquecidos), por un proceso de AFC involucrando una contaminación relativamente baja ( $r=0.05$ ) por la corteza superior precámbrica y una tasa de cristalización fraccionada de 50 % ( $f = 0.5$ ). Por otro lado, dado que los contenidos en Sr son bajos en las islanditas, una ligera contaminación por la corteza superior precámbrica se traduce por un fuerte efecto sobre los valores isotópicos del Sr.

## **Conclusiones**

Los resultados mineralógicos, geoquímicos e isotópicos disponibles sobre las lavas que componen la serie pigeonítica del Mioceno Medio-Superior en Sonora, contribuyen a establecer su génesis y distribución espacio-temporal. El estudio petrográfico de las islanditas indica una fase de cristalización prolongada, un ascenso rápido hacia la superficie y un enfriamiento violento. La concentración de los elementos mayores, trazas y REE señalan la existencia de un vínculo genético entre las islanditas y los basaltos doleríticos. Los datos geocronológicos de las lavas del rift del Proto-Golfo de California, indican que la erupción de los diferentes magmas (ignimbritas hiperalcalinas, islanditas y basaltos toleíticos) se sucedieron en el tiempo. La simultaneidad de las erupciones de ignimbritas hiperalcalinas (12.5 Ma) indica que fueron controladas por una fase de distensión mayor, la formación del proto Golfo de California (Vidal-Solano, 2005). Los magmas diferenciados de la secuencia toleítica (islanditas) implican todavía una estagnación en reservorios próximos a la superficie, donde procesos de contaminación han jugado todavía un cierto papel. Finalmente, los basaltos toleíticos poco contaminados que se concentran en las cercanías del graben de Guaymas indican un acceso más fácil hacia la superficie. El transfer de Baja California hacia la Placa Pacífica y la apertura del Golfo de California a partir de 6 Ma (Klitgord y Mammerickx, 1982; Stock y Hodges, 1989) condujeron al abandono de este rift y a la apertura de la cuenca oceánica de Guaymas

## **Referencias**

- CAMERON K.L., NIMZ G.J., KUENTZ D., NIEMEYER S., GUNN S., 1989 - Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico: A link between tertiary continental arc and flood basalt magmatism in northern America. *J. Geophys. Res.*, **94**, 7817-7840.
- CARMICHAEL I.S.E., 1964 - The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in Eastern Iceland. *J. Petrol.*, **5**, 435-460.
- CARMICHAEL I.S.E., 1967 - The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **14**, 36-64.

- COACHEME J.-J., 1985 - Le magmatisme dans le Nord-Ouest du Mexique. Cartographie de la région de Yécora-Maicoba-Mulatos. Illustration magmatique de la fin d'un régime en subduction et du passage à un régime distensif. *Thèse Doct. Etat Univ. Aix-Marseille III*, 209 p.
- COUCH S., SPARKS R.S.J., CARROLL M.R., 2001 - Mineral disequilibrium in lavas explained by convective self-mixing in open magma chambers. *Nature*, **411**, 1037-1039
- DEPAOLO D.J., 1981 - Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractionnal crystallization. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **53**, 189-202.
- FITTON J.G., DUNLOP H.M., 1985 - The Cameroon line, West Africa, and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalts. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **72**, 23-38.
- GANS P.B., BLAIR K., MACMILLAN I., WONG M., TILL C; HERMAN S; ROLDÁN-QUINTANA J., 2006 - Structural and magmatic evolution of the Sonoran rifted margin: Lithospheric Rupture in the Gulf of California - Salton Trough Region: Abstracts, MARGINS – RCL Workshop, Ensenada, México, 9-13 January; 91p.
- JOHNPEER G.D., 1977 - Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area, Sonora, México. *MS thesis, Arizona State University, Tempe*, 67 p.
- KLITGORD K.D., MAMMERICKX J., 1982 - North East Pacific Rise: Magnetic anomaly and bathymetric framework. *J. Geophys. Res.*, **87**, 6725-6750.
- Le BAS M.J., Le MAITRE R.W., STRECKEISEN A., ZANETTIN B., 1986 - A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, **27**, 745-750.
- LINDSLEY D.H., 1983 - Pyroxene thermometry. *Am. Mineral.*, **68**, 477-493.
- MILLER J.S., GLAZNER A.F., FARMER G.L., SUAYAH I.B., KEITH L.A., 2000 - A Sr, Nd, and Pb isotopic study of mantle domains and crustal structure from Miocene volcanic rocks in the Mojave Desert, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **112**, 1264-1279.
- MORA-KLEPEIS G., McDOWELL F.W., 2004 - Late Miocene calc-alkalic volcanism in northwestern Mexico: an expression of rift or subduction-related magmatism? *J. South Am. Earth Sci.*, **17**, 297-310.
- NISBET E.G., PEARCE J.A., 1977 - Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **63**, 149-160.
- PAZ-MORENO F.A., 1992 - Le volcanisme mio-plio-quadernaire de l'Etat du Sonora (nord-ouest du Mexique) : évolution spatiale et chronologique ; implications pétrogénétiques. *Thèse Univ. Aix-Marseille III*, 220 p.
- SAUNDERS D.J., FORNARI D.J., MORRISON M.A., 1982 - The composition and emplacement of basaltic magmas produced during the development of continental margin basins: the Gulf of California, Mexico. *J. Geol. Soc. London*, **139**, 335-346.
- STOCK J.M., HODGES K., 1989 - Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate. *Tectonics*, **8**, 99-115.
- THOMPSON R.N., 1982 - British Tertiary volcanic province. *Scott. J. Geol.*, **18**, 49-107.
- THOMPSON R.N., MORRISON M.A., HENDRY G.L., PARRY S.J., 1984 - An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Phil. Trans. R. Soc. London*, **A310**, 549-590.
- VALENCIA-MORENO M., RUIZ J., BARTON M.D., PATCHETT P.J., ZÜRCHER L., HODKINSON D.G., ROLDÁN-QUINTANA J., 2001 - A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: identification of the southern edge of the North American Precambrian basement. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **113**, 1409-1422.
- VARGAS-NAVARRO P.P., 2005 - La cuenca de Empalme, Sonora : petrogénesis de las rocas ígneas neógenas y su análisis estructural: Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 107 p.
- VIDAL-SOLANO J.R., 2005 - Le volcanisme hyperalkalin d'âge miocène moyen du nord-ouest du Mexique (Sonora). Minéralogie, géochimie, cadre géodynamique: Université Paul Cézanne (Aix-Marseille 3), Thèse de doctorat, 256 p. [<http://tel.ccsd.cnrs.fr/tel-00010346>]
- WILSON R.T., 1978 - Reconnaissance geology and petrology of the San Carlos area, Sonora, México: *MS thesis, Arizona State University*, 107 p.