

Le magmatisme quaternaire de l'arc volcanique équatorien : un exemple atypique de genèse de magmas dans un contexte de subduction

Pablo Samaniego¹
Michel Monzier²
Jean-Philippe Eissen²
Erwan Bourdon³
Claude Robin²
Minard L. Hall¹
Hervé Martin²
Michel Fornari⁴
Joseph Cotten⁵

Mots-clés : magmatisme – Équateur – Quaternaire – géochimie – adakites

Un volet fondamental de la coopération existant depuis plus de 10 ans entre l'Institut Géophysique de l'École Polytechnique Nationale (IG-EPN) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) a été l'étude des processus de genèse et de différenciation des magmas de l'arc équatorien. Au fur et à mesure qu'avancait la connaissance géologique des principaux volcans du pays, un échantillonnage systématique des roches volcaniques de la plupart (plus de 40) des édifices volcaniques d'âge quaternaire de l'arc équatorien était effectué. Le résultat de ce travail est une base de données géochimiques exceptionnelle qui comporte plus de 2 000 analyses d'éléments majeurs et d'éléments traces obtenus dans le

même laboratoire et avec le même protocole analytique.

La composition chimique et minéralogique des roches volcaniques permet d'identifier et de quantifier les processus physiques et chimiques (processus de

1 Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), Apartado postal 17-01-2759, Quito, Équateur

2 IRD, UMR « Magmas et volcans », Laboratoire Magmas et volcans, UMR 6524, OPGC-Université Blaise Pascal, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand cedex, France

3 Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, Émile Argand, 11 CP 2, 2007 Neuchâtel, Suisse

4 IRD, UMR « Géosciences Azur », Université de Nice, Parc Valrose, 06108 Nice, France

5 UMR 6538, Université de Bretagne Occidentale, BP 809, 292285 Brest cedex, France

différentiation magmatique) qui ont affecté les magmas depuis leur zone source (zone de genèse des magmas par fusion partielle) jusqu'à leur émission à la surface. La composition en éléments traces des magmas peut contribuer à la compréhension des processus profonds de fusion partielle ainsi qu'à la caractérisation de la nature de la roche source et de la profondeur à laquelle les magmas sont générés.

Dans la plupart des arcs volcaniques de la planète, les magmas sont générés par fusion partielle d'une source dans le manteau supérieur, qui a préalablement été métasomatisée par des fluides riches en eau provenant de la déshydratation de la plaque plongeante. Cependant, depuis la dernière décennie, on a retrouvé des roches volcaniques dont la composition chimique suggère une genèse par la fusion partielle d'une source basaltique (c'est-à-dire de la plaque océanique en subduction) où il existe du grenat et/ou de l'amphibole comme résidu de fusion (Defant et Drummond, 1990 ; Martin, 1999 ; Maury *et al.*, 1996). Ces roches ont été appelées « adakites », en faisant allusion à l'île d'Adak (archipel des Aléoutiennes) où elles ont été décrites pour la première fois (Kay, 1978).

Les roches volcaniques de l'arc équatorien constituent une série calco-alcaline à moyen et haut potassium (selon la classification de Gill, 1981). Du point de vue des éléments traces, la caractéristique principale de ces roches est un appauvrissement généralisé en terres rares lourdes (HREE) et Y (figure 1), qui

a conduit à proposer un caractère adakitique pour le magmatisme équatorien (Monzier *et al.*, 1997 ; Bourdon *et al.*, 2002, 2003 ; Samaniego *et al.*, 2002). Cela implique que, en plus de la fusion du coin de manteau, il faut faire intervenir la fusion partielle d'une source basaltique qui, selon le cadre géologique et géodynamique de l'arc équatorien, peut être : (a) la plaque plongeante (Bourdon *et al.*, 2002, 2003 ; Samaniego *et al.*, 2002) ; ou (b) la croûte inférieure constituée de terrains de nature océanique et/ou magmas basaltiques accumulés dans la base de cette croûte (Kilian *et al.*, 1995 ; Arculus *et al.*, 1999 ; Monzier *et al.*, 1999 ; Garrison *et al.*, 2000).

Étant donné l'âge relativement « jeune » de la croûte océanique impliquée dans la subduction (< 20 Ma), la présence de la ride de Carnegie dans la subduction et les variations temporelles et spatiales du magmatisme, on conclut qu'il existe un régime thermique anormalement élevé au niveau de la plaque plongeante. Cette caractéristique favorise plutôt la fusion partielle de la plaque plongeante que celle de la croûte inférieure. Du coup, les données actuelles montrent que les agents métasomatiques du coin de manteau ne sont pas que des **fluides riches en eau** résultant de la **déshydratation** de la plaque plongeante mais des **liquides silicatés** (magmas adakitiques) produits par la **fusion partielle** de la plaque plongeante.

Comme le suggèrent Bourdon *et al.* (2003), un modèle pétrogénétique

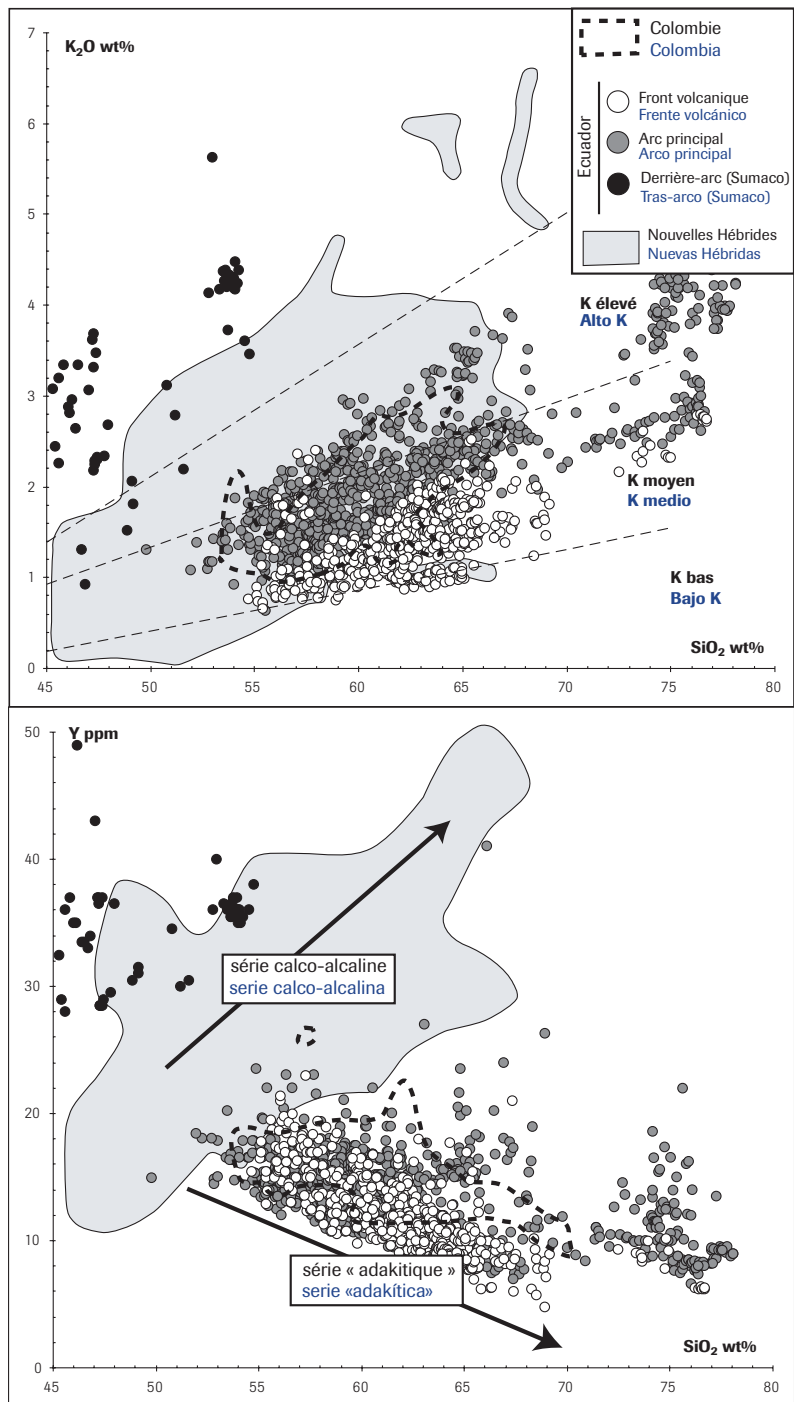
général de l'arc équatorien doit prendre en compte : (1) la fusion partielle de la plaque plongeante ; (2) la montée de ces magmas à travers la coin de manteau avec les changements qui s'en suivent dans la composition chimique des magmas ainsi que de la source mantellique (métasomatisme) ; (3) la fusion partielle de ce manteau préalablement métasomatisé par des magmas adakitiques ; et (4) des processus complexes de différenciation par cristallisation fractionnée, mélange de magma et pollution au niveau crustal. Ce modèle « hybride » de genèse des magmas représente une situation intermédiaire entre un modèle de fusion partielle de la plaque plongeante (magmatisme adakitique *stricto sensu*) et un scénario de fusion partielle du coin de manteau (magmatisme calco-alcalin « classique »).

Nos travaux visent actuellement d'une part à délimiter géographiquement de manière précise la zone d'influence de la ride de Carnegie sur le magmatisme quaternaire d'Équateur ; et, d'autre part à comprendre l'évolution temporaire du magmatisme. Les variations longitudinales observées entre 2° N et 2°30' S montrent clairement que le caractère adakitique des magmas équatoriens est plus marqué juste en face de la ride de Carnegie (Monzier *et al.*, 2003). Tandis que les premiers résultats géochronologiques obtenus par la méthode $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ montrent un fort changement du magmatisme il y a 400 ka sur le volcan Cayambe, il semble que ce changement soit plus précoce (~1 Ma) sur le Pichincha (travaux en cours).

Figure 1
Diagramme K_2O (wt%) vs SiO_2 (wt %) et Y (ppm) vs SiO_2 (wt %) des roches du front volcanique, de l'arc principal et du derrière-arc. Pour comparaison sont présentés les champs de variation de l'arc des Nouvelles Hébrides, Pacifique Sud et de la Colombie.

Diagrama K_2O (wt%) vs SiO_2 (wt %) et Y (ppm) vs SiO_2 (wt %) de las rocas del frente volcánico, el arco principal y del tras-arco. Por comparación se muestran los campos de variación del arco de Nuevas Hébridias, Pacífico Sur y de Colombia.

(voir page suivante)



Références bibliographiques

- Arculus R.J., Lapierre H. y Jaillard E. (1999), Geochemical Window into Subduction and Accretion Processes: Raspas Metamorphic Complex, Ecuador. *Geology* 27: 547-550.
- Barragán R., Geist D., Hall M., Larson P. y Kurz M. (1998), Subduction Controls on the Compositions of Lavas from the Ecuadorian Andes. *Earth Planet Sci. Let.* 154: 153-166.
- Bourdon B., Eissen J.-P., Monzier M., Robin C., Martin H., Cotten J. y Hall M.L. (2002), Adakite-like Lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for Slab Melt Metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *J. Petrol.* 43: 199-217.
- Bourdon B., Eissen J.-P., Gutscher M.-A., Monzier M., Hall M.L. y Cotten J. (2003), Magmatic Response to Early Aseismic Ridge Subduction: the Ecuadorian Margin Case (South America). *Earth Planet Sci. Let.* 205: 123-138.
- Droux A. y Delaloye M. (1996), Petrography and Geochemistry of Plio-Quaternary Calc-Alkaline Volcanoes of Southwestern Colombia. *J. South Amer Earth Sci.* 9: 27-41.
- Defant M.J. y Drummond M.S. (1990), Derivation of some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature* 34: 662-665.
- Garrison J.M., Davidson J.P., Mothes P. y Hall M.L. (2000), An Alternative to Slab Melting in the NVZ: Amphibolite Melting at Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 81/48: 1309.
- Gill J.G. (1981), *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag. 390.
- Kay R.W. (1978), Aleutian Magnesian Andesites: Melts from Subducted Pacific Ocean Crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 4: 117-132.
- Kilian R., Hegner E., Fortier S. y Satir M. 1995. Magma Evolution within the Accretionary Mafic Basement of Quaternary Chimborazo and Associated Volcanoes (Western Ecuador). *Revista Geológica Chile* 22/2: 203-218.
- Martin H. (1999), Adakitic Magmas: Modern Analogues of Archean Granitoids. *Lithos* 46: 411-429.
- Maury R.C., Sajona, F.G., Pubellier, M., Bellon, H., y Defant, M.J. (1996), Fusion de la croûte océanique dans les zones de subduction/collision récentes : L'exemple de Mindanao (Philippines). *Bull Société Géol. France* 167: 579-595.
- Monzier M., Robin C., Hall M.L., Cotten J., Mothes P., Eissen J.-P. y Samaniego P. (1997), Les adakites d'Équateur : modèle préliminaire. *Comptes Rendus Acad Sci. Paris* 324: 545-552.
- Monzier M., Robin C., Samaniego P., Hall M.L., Cotten J., Mothes P. y Arnaud N. (1999), Sangay Volcano, Ecuador: Structural Development, Present Activity and Petrology. *J. Volcanol Geotherm Res.* 90: 49-79.
- Monzier M., Bourdon E., Samaniego P., Eissen J.-P., Robin C., Martin H. y Cotten J., (2003), Slab Melting and Nb-enriched Mantle beneath NVZ. EGS-AGU-EUG joint meeting, Nice, April 2003: VGP7-1FR1P-0621.
- Samaniego P., Martin H., Robin C. y Monzier M. (2002), Transition from Classical Calc-Alkalic to Adakitic Magmatism in the Cayambe Volcano, Ecuador: Insights into Slab Melts and Mantle Wedge Interactions. *Geology* 30: 967-970.
- Samaniego P. Martin H., Monzier M., Fornari M., Eissen J.-P., y Cotten J. (2005), Temporal Evolution of Magmatism at Northern Volcanic Zone of the Andes: the Geology and Petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador). *J. Petrol.*, (en prensa).

El magmatismo cuaternario del arco volcánico ecuatoriano: un ejemplo atípico de génesis de magmas en contexto de subducción

Palabras clave: magmatismo – Ecuador – Cuaternario – geoquímica – adakititas

Una parte fundamental de la cooperación que por más de 10 años existe entre el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) y el *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) ha sido el estudio de los procesos de génesis y diferenciación de los magmas del arco ecuatoriano. A medida que se avanzaba en el conocimiento geológico de los principales volcanes del país, se inició un muestreo sistemático de las rocas volcánicas de la gran mayoría (más de 40) de edificios volcánicos de edad cuaternaria del arco ecuatoriano. El resultado de este trabajo es una base de datos geoquímicos excepcional que cuenta con más de 2.000 análisis de elementos mayores y trazas obtenidos en el mismo laboratorio con el mismo protocolo analítico.

La composición química y mineralógica de las rocas volcánicas permite identificar y cuantificar los procesos físicos y químicos (procesos de diferenciación magmática) que han afectado a los magmas desde su zona fuente (zona de generación de los magmas por fusión parcial) hasta su emisión en la superficie. En particular, la composición en

elementos en traza de los magmas puede ayudar a entender los procesos profundos de fusión parcial y discriminar la naturaleza de la roca fuente y la profundidad a la que se generan los magmas.

En la mayoría de arcos volcánicos del planeta, los magmas se generan por la fusión parcial de una fuente en el manto superior, la cual ha sido previamente metasomatizada por fluidos ricos en agua, provenientes de la deshidratación de la placa subducida. Sin embargo, desde la década pasada, se han venido encontrando rocas volcánicas cuya composición química sugiere que son producidas por la fusión parcial de una fuente basáltica (es decir de la placa oceánica subducida) en la cual existe granate y/o anfíbol como residuo de fusión (Defant y Drummond, 1990; Martin, 1999; Maury y otros, 1996). Dichas rocas han sido denominadas «adakititas», en alusión a la Isla de Adak (archipiélago de las Aleutianas), donde fueron descritas por primera vez (Kay, 1978).

Las rocas volcánicas del arco ecuatoriano constituyen una serie calcoalcalina de medio a alto potasio (según

la clasificación de Gill, 1981). Desde el punto de vista de los elementos en traza, la principal característica de estas rocas es un empobrecimiento generalizado en tierras raras pesadas (HREE) e Y (figura 1), característica que ha llevado a proponer un carácter adakítico para el magmatismo ecuatoriano (Monzier y otros, 1997; Bourdon y otros, 2002, 2003; Samaniego y otros, 2002). Esto implica que, a más de la fusión de la cuña del manto, se debe hacer intervenir la fusión parcial de una fuente basáltica, la cual, según el marco geológico y geodinámico del arco ecuatoriano, puede ser : (a) la placa subducida (Bourdon y otros, 2002, 2003; Samaniego y otros, 2002); o (b) la corteza inferior, constituida por terrenos de naturaleza oceánica y/o magmas basálticos acumulados en la base de la misma (Kilian y otros, 1995; Arculus y otros, 1999; Monzier y otros, 1999; Garrison y otros, 2000).

Dada la edad relativamente «joven» de la corteza oceánica subducida (< 20 Ma), la presencia en la subducción de la Cordillera de Carnegie y las variaciones temporales y espaciales del magmatismo, se concluye que existe un régimen térmico anormalmente elevado a nivel de la placa subducida. Esta característica favorece la fusión parcial de la placa subducida en lugar de la corteza inferior. Así, los datos actuales ponen de manifiesto que los agentes metasomáticos de la cuña del manto no son únicamente **fluidos ricos en agua** producto de la **deshidratación** de la placa subducida

sino que se trata de **líquidos silicatados** (magmas adakíticos) producto de la **fusión parcial** de la placa subducida.

Así, como lo sugirieron Bourdon y otros (2003), un modelo petrogenético general para el arco ecuatoriano debe involucrar: (1) la fusión parcial de la placa oceánica subducida; (2) el ascenso de estos magmas a través de la cuña del manto con los consiguientes cambios en la composición química de los magmas así como de la fuente mantélica (metasomatismo); (3) la fusión parcial de este manto previamente metasomatizado por magmas adakíticos; y, (4) procesos complejos de diferenciación por cristalización fraccionada, mezcla de magmas y contaminación a nivel crustal. Este modelo «híbrido» de génesis de los magmas representa una situación intermedia entre un modelo de fusión parcial de la placa subducida (magmatismo adakítico *sensu stricto*) y un escenario de fusión parcial de la cuña del manto (magmatismo calco-alcalino «clásico»).

En la actualidad, nuestros trabajos se orientan, por un lado hacia la delimitación geográfica precisa de la zona de influencia de la Cordillera de Carnegie en el magmatismo cuaternario de Ecuador; y, por otro lado hacia la evolución temporal del magmatismo. Las variaciones longitudinales observadas entre 2° N y 2°30' S muestran claramente que el carácter adakítico de los magmas ecuatorianos es más marcado justo frente a la Cordillera de Carnegie (Monzier y otros, 2003). Mientras que los primeros

resultados geocronológicos por el método $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ indican un marcado cambio en el magmatismo hace 400 ka en

el volcán Cayambe (Samaniego y otros, 2005), parece ser más precoz (~ 1 Ma) en el Pichincha (trabajos en curso).