

# Firma Adakítica en los productos recientes de los volcanes Nevado del Huila y Puracé, Colombia

## ADAKITIC SIGNATURE IN THE RECENT PRODUCTS FROM NEVADO DEL HUILA AND PURACÉ VOLCANOES, COLOMBIA

MARÍA LUISA **Monsalve**  
ANA MARÍA **Correa Tamayo**  
MÓNICA **Arcila**<sup>1</sup>  
JAQUELINE **Dixon**<sup>2</sup>

### Resumen

En Colombia, lavas recientes de los volcanes Nevado del Huila y Puracé, ubicados en la parte media de la cordillera Central, muestran características geoquímicas con clara tendencia adakítica (por ejemplo, contenidos altos en Sr y LREE y bajos en Y y HREE, altas Sr/Y y La/Yb,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,7045$ ). Dichas características usualmente se asocian a contextos tectónicos particulares que permiten la participación de fundidos de la placa subducente en la génesis de los magmas. Análisis de sismicidad y anomalías gravimétricas, permite inferir la geometría de la subducción, e información de anomalías magnéticas y edades del piso oceánico, llevan a postular la participación de un rasgo en la Placa de Nazca (Dorsal fósil de Buenaventura) en la petrogénesis de los magmas que alimentan a dichos volcanes, originados por fusión parcial de la cuña mantélica, probablemente metasomatizada por fundidos provenientes de la placa oceánica subducente, con poca o limitada participación cortical.

### Abstract

In Colombia, recent lavas from Nevado del Huila and Puracé volcanoes, located in the middle part of the Cordillera Central, show geochemical characteristics with a adakitic signature (i.e. high Sr and LREE contents, low Y and HREE contents, high Sr/Y and La/ Yb,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,7045$ ). These geochemical characteristics have been associated to specific tectonic settings that allow the participation of subducted slab melts in the genesis of the magmas. Analysis of seismicity and gravimetric anomalies allows to infer the geometry of the subduction, and the information from magnetic anomalies and ages of the oceanic floor, make possible to postulate the participation of a Nazca Plate feature (Buenaventura paleo-rift), in the petrogenesis of the magma feeding those volcanoes, that could be originated by the partial melting of a mantle wedge, probably metasomatized by melts from the subducting slab, with little or limited crustal assimilation.

### Palabras clave

Adakita, volcán Nevado del Huila, volcán Puracé, Placa de Nazca, Centro de expansión fósil de Buenaventura.

### Key words

Adakite, Buenaventura paleo-rift, Nazca Plate, Nevado del Huila Volcano, Puracé Volcano.

Artículo recibido el 29 de agosto del 2009. Aprobado el 16 de diciembre del 2009.

1 Servicio Geológico Colombiano, mmonsalve@sgc.gov.co, acorraa@sgc.gov.co, marcila@sgc.gov.co

2 University of South Florida, jdixon@usf.edu

## Introducción

Durante la subducción, materiales de la placa oceánica subducente o de la cuña mantélica, son modificados por procesos de deshidratación, metamorfismo, metasomatismo y fusión parcial, originando productos en forma de fundidos, fluidos acuosos y volátiles. En general, el magmatismo en las márgenes convergentes es el resultado de la fusión parcial de la cuña mantélica, que ha sido afectada por fluidos derivados de la litosfera oceánica subducida (Wyllie, 1979; Schmidt & Poli, 1998 & Van Keken, 2003); sin embargo, algunas lavas de márgenes convergentes, denominadas adakitas, presentan componentes que indican su origen por fusión parcial de la placa subducida (Defant & Drummond, 1990; Kay et ál., 1993).

El vulcanismo reciente en la Zona Volcánica Norte de los Andes (ZVNA), donde se encuentran localizados los volcanes de Colombia y Ecuador, es el resultado de la convergencia de las placas de Nazca y Suramérica. Con base en análisis geoquímicos, diversos autores han asignado un carácter calcoalcalino a este vulcanismo, que ha sido interpretado como producto de la fusión parcial de la cuña mantélica, metasomatizada por fluidos provenientes de la deshidratación de la placa oceánica subducente, con algún grado de contaminación cortical (Hawkesworth et ál., 1979; Harmon et ál., 1984; James & Murcia, 1984; Marriner & Millward, 1984; Kilian & Pichler, 1989; Droux & Delaloye, 1996; Marín-Cerón 2007). Además, desde hace algunos años, con la identificación de adakitas en el Ecuador, explicada en parte por subducción de la Dorsal de Carnegie (Robin et ál., 1997; Beate et ál., 2001; Bourdon et ál., 2002a; Bourdon et ál., 2002b; Samaniego et ál., 2002; Samaniego et ál., 2005) se demuestra el papel importante que cumple la complejidad tectónica de la región en la génesis de estos magmas.

Adakita es un término petrológico introducido por Defant & Drummond (1990) para referirse a rocas volcánicas o intrusivas, cuya génesis relacionaron con la fusión parcial de litosfera oceánica caliente y joven ( $\leq 25$  Ma) en arcos de subducción

cenozoicos. Generalmente, se refiere a rocas de composición intermedia a ácida (andesitas y dacitas) con alto contenido de Estroncio (Sr) (raramente  $< 400$  ppm), bajas concentraciones de HREE e Y (por ejemplo, Yb  $< 1,9$ - $2,0$  ppm e Y  $< 18$ - $20$  ppm), altas relaciones Sr/Y ( $> 40$ - $50$ ), baja concentración de elementos de alto potencial iónico o *high field strength element* (HFSE), enriquecimiento en LREE (i.e. La/Yb  $> 9$ - $20$ ) y en elementos de bajo potencial iónico o *low field strength element* (LFSE o LILE = *large ion lithophile element*), y relaciones  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,7040$ - $0,7045$  (Kay, 1978; Defant & Drummond, 1990; Maury et ál., 1996; Martin, 1999). Autores como Martin (1999) y Defant & Kepezhinskas (2001) indican otras características distintivas de las adakitas: altos contenidos de Ni y Cr ( $\sim 24$  y  $36$  ppm respectivamente), bajas relaciones de Fe/Mg y de  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  ( $\sim 0,42$ ) y un valor moderadamente alto de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2$  de aproximadamente 7% peso.

Igualmente, el término se ha empleado para designar rocas que presentan características similares a las de adakitas típicas, en ambientes tectónicos diferentes donde normalmente no se produciría este tipo de magmas, lo que llevó a plantear diversos modelos y procesos para explicar su generación en dichos ambientes tectónicos. Ha sido tema de gran debate el reporte de adakitas, cenozoicas, asociadas a la zona de subducción de los Andes Centrales y los Andes del Norte (Garrinson & Davidson, 2003) o a sistemas de subducción fósiles mesozoicos y paleozoicos (Ramos et ál., 2004).

En este trabajo se presentan datos geoquímicos de los volcanes Nevado del Huila y Puracé, este último en la Cadena Volcánica de Los Cococucos (CVLC), localizados ambos en la cordillera Central de Colombia (figura 1), a 285 km y 360 km al SW de Bogotá, respectivamente, y a 83 km al NE y 28 km al E de Popayán, en su orden. Estos dos volcanes muestran una tendencia adakítica en su composición, que podría estar indicando un proceso diferente o adicional al modelo tradicional de generación de magmas en los Andes colombianos.

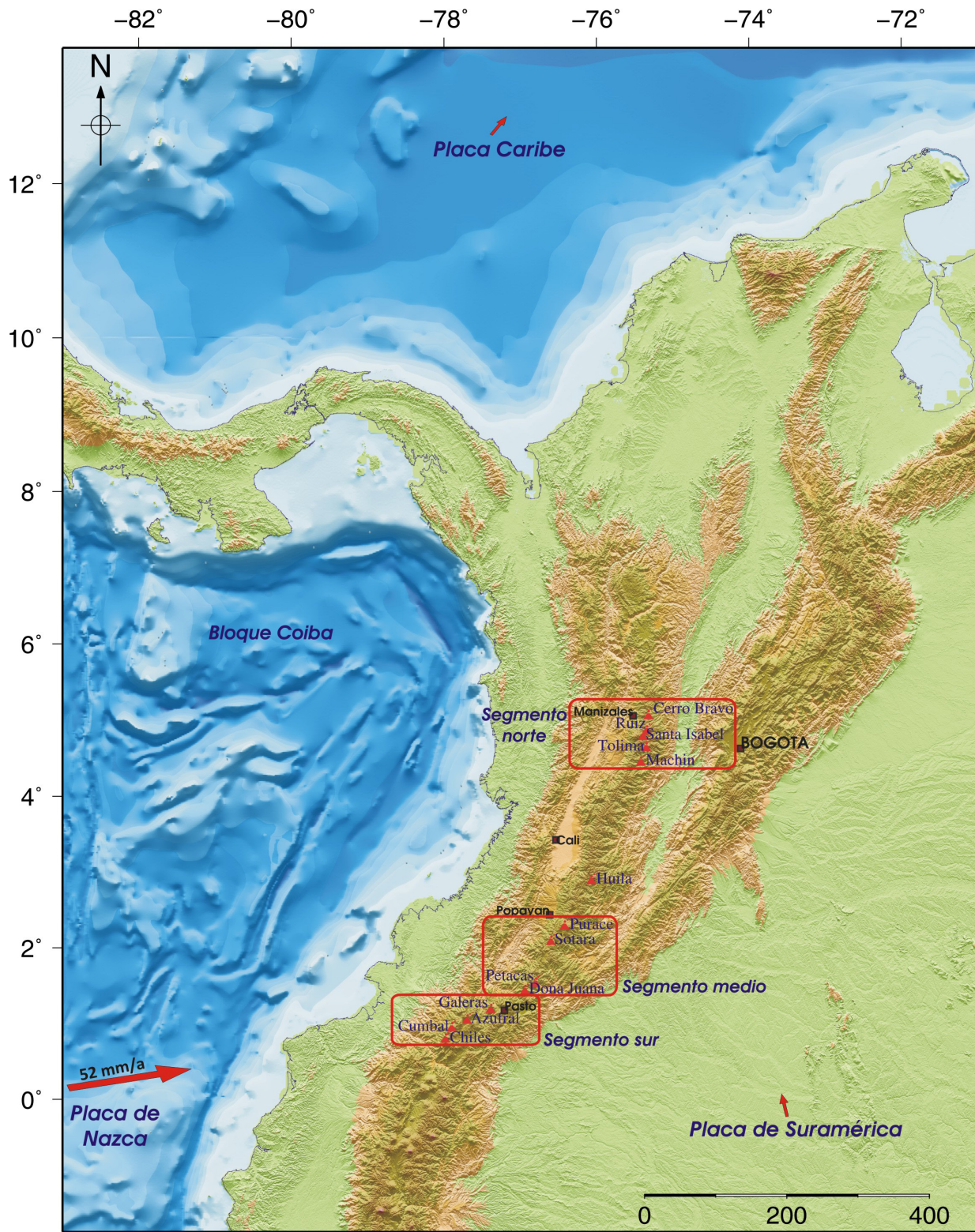


Figura 1. Localización de los volcanes activos colombianos en el contexto tectónico del NW de Suramérica, marcado por la convergencia de las placas de Nazca y Suramérica, agrupados en los tres segmentos principales. Se resalta el volcán Nevado del Huila, ubicado en el gap de 280 km, entre los segmentos norte y centro. Origen de los magmas adakíticos

Varios modelos han sido planteados para explicar la génesis de las adakitas y se piensa que la heterogeneidad geoquímica refleja varios mecanismos por los cuales se pueden producir este tipo de magmas. En general, estos modelos tienen en cuenta la participación de un componente del tipo basalto metamorfizado a facies eclogita, en la fuente magmática, en un ambiente de subducción (Martin, 1986; Defant & Drummond, 1990; Drummond & Defant, 1990; Sajona et ál., 1995; Maury et ál., 1996; Kelemen et ál., 2003a). Se han propuesto cuatro modelos petrogénéticos, entre los cuales existen, a veces, solo diferencias sutiles en las “firmas geoquímicas” consideradas.

#### **Fusión parcial de corteza oceánica subducida**

Puede ocurrir si la corteza es joven (Defant & Drummond, 1990; Martin, 1999; Martin et ál., 2005), si el ángulo de subducción es bajo (subducción plana) o si existe proximidad de un manto caliente a través de ventanas mantélicas o “desgarraduras” (*tears*) en la placa subducente. Estas ventanas o desgarres pueden producirse por subducción de dorsales (*ridges*) o fracturas presentes en la litosfera subducente (Abratis & Wörner, 2001; Yogodzinski et ál., 2001; Rogers et ál., 2002; Calmus et ál., 2003; Levin et ál., 2005). Tales desgarres permiten el ascenso de material astenosférico caliente, que funde los bordes de la placa subducente (Yogodzinski et ál., 1995; Yogodzinski et ál., 2001; Thorkelson & Breitsprecherb, 2005).

#### **Fusión parcial de cuña astenosférica metasomatizada por fundidos provenientes de la placa subducida**

Puede producir rocas “exóticas”, desde basaltos ricos en Nb hasta andesitas altas en Mg, o rocas con geoquímica similar a las adakitas (Sajona et ál., 1996; Kepezhinskias et ál., 1996; Maury et ál., 1998; Rapp et ál., 1999; Prouteau et ál., 2001; Kelemen et ál., 2003b). El magma generado por fusión directa de la placa subducida y el magma producido por fusión parcial de la cuña peridotítica metasomatizada pueden tener relaciones de elementos tra-

za y abundancias isotópicas similares; sin embargo, presentan diferencias en el contenido de elementos mayores (por ejemplo, Si, Al, Ti y Mg), acoplado a la concentración de elementos traza compatibles (Martin et ál., 2005).

#### **Fusión parcial de la corteza continental inferior**

Atherton & Petford (1993) sugieren que algunos magmas adakíticos podrían producirse por la fusión parcial de corteza máfica resultado de acreción subcortical (*underplating*) bajo cinturones orogénicos de gran espesor (>50 km). Estos magmas presentan características similares a los producidos por fusión parcial de la corteza oceánica metamorfizada a facies eclogita (Atherton & Petford, 1993; Petford & Atherton, 1996; Xu et ál., 2002). Esta hipótesis se ha planteado para explicar la génesis de lavas generadas en numerosos volcanes de la Zona Volcánica Central Andina (Hildreth & Moorbath, 1988). El segundo mecanismo para generar magmas a partir de la corteza inferior es la delaminación cortical, en el cual la corteza inferior delaminada puede “hundirse” en el manto relativamente caliente y sufrir fusión parcial (Kay et ál., 1993; Lustrino, 2005; Gao et ál., 2004; Wang et ál., 2004 & Wang et ál., 2006).

#### **Cristalización fraccionada y asimilación de la corteza continental superior**

La combinación de estos procesos puede producir rocas con tendencia adakítica, las cuales no presentan las altas relaciones Sr/Y y La/Yb propias de las adakitas de otras regiones (Sajona et ál., 1993 y 1994). Estas lavas coexisten espacial y temporalmente con lavas basálticas y se encuentran en la asociación normal de Basalto-Andesita-Dacita (Castillo et ál., 1999; Castillo, 2006). Los magmas pueden haberse derivado desde la cuña mantélica metasomatizada, en combinación con asimilación de material de la corteza. Este modelo ha sido aplicado en zonas de subducción de placa oceánica fría (por ejemplo, volcán Nevado de Longavi, Chile, Rodríguez et ál., 2005).

## Volcanes Nevado del Huila y Puracé

### Generalidades

El vulcanismo reciente de Colombia se encuentra distribuido en tres segmentos principales (figura 1). En la cordillera Central se encuentran el segmento norte, que comprende la Provincia Volcánica Cerro Bravo-Machín, y el segmento medio o central, que comprende la Provincia Volcánica Coconucos-Dona Juana. Entre estos dos hay un intervalo (*gap*) de 280 kilómetros, donde el volcán Nevado del Huila, localizado a 200 km al SW del volcán Machín y a 80 km al NE de la CVLC, es la única evidencia de vulcanismo reciente identificada. El segmento sur comprende al volcán Galeras, situado en la Depresión Interandina Cauca-Patía y los otros volcanes localizados en la cordillera Occidental.

### Volcán Nevado del Huila

El volcán Nevado del Huila (2° 56' N y 76° 02' W) es el volcán activo de Colombia más alto (5364 msnm) y la mayor altura de la cordillera Central. Está localizado en el límite entre los departamentos Cauca, Huila y Tolima, a 85 km al NE de Popayán. Tiene forma alargada en dirección N-S. En su cima hay cuatro picos, alineados, cubiertos por un extenso glaciar de montaña: Pico Norte, Pico La Cresta, Pico Central y Pico Sur. Diversos criterios geomorfológicos han permitido considerar el Nevado del Huila como un Complejo Volcánico (*volcano complex*), entre estos la presencia de diversas geoformas volcánicas individuales con una relación compleja, que se superponen entre sí; la ausencia de un único cono central; las evidencias de por lo menos un colapso sectorial, y la posibilidad de que los picos que están en la cima correspondan a diferentes centros de emisión (Correa & Cepeda, 1995; Correa & Pulgarín, 2002; Correa, 2009). Diferentes rasgos geomorfológicos y vulcanológicos del Complejo Volcánico Nevado del Huila (CVNH), además de reflejar cierto grado de variación composicional en sus lavas, han permitido establecer una historia eruptiva que se divide en tres estadios: PreHuila, Huila Antiguo y Huila Reciente (Correa & Pulgarín, 2002; Correa, 2009), formados en la segunda etapa del vulcanismo cenozoico colombiano.

En el CVNH predominan las secuencias de gruesos flujos de lavas andesíticas y escasos depósitos de flujos piroclásticos, intercalados. Dataciones radiométricas (Correa, 2009) indican que el Estadio PreHuila se inició hace un millón de años aproximadamente (Pleistoceno Inferior) y el Estadio Huila Antiguo empezó hace 100.000 años (Pleistoceno Superior). Por último, el Estadio Huila Reciente comenzó hace 11.000-10.000 años, después de la última Glaciación. Son rocas microporfídicas a microcristalinas, con plagioclasa (principalmente andesina), clinopiroxeno, anfíbol, ortopiroxeno, y óxidos de Fe-Ti, como fases principales, y olivino, flogopita y apatito como fases accesorias (Correa, 2009).

Las variaciones en el contenido mineral facilitan la caracterización general de los estadios eruptivos: las rocas del Estadio PreHuila son principalmente andesitas de dos piroxenos; en las rocas de estadios Huila Antiguo y Reciente tiende a aumentar el porcentaje de anfíbol, especialmente en Estadio Huila Reciente, en el que predominan las andesitas clinopiroxénicas y andesitas anfibólicas (Correa, 2009). Desde el punto de vista geoquímico, en el CVNH se han establecido tres tipos litológicos: andesitas, andesitas dacíticas y dacitas, con contenido medio en K<sub>2</sub>O (Correa, 2009).

Antes del 18 de febrero de 2007 no existía registro de actividad histórica del CVNH, pero a partir de esta fecha un comportamiento sísmico atípico indicó el comienzo de un proceso eruptivo repentino que se concentró en la parte central del edificio, dando lugar a la extrusión de domos en noviembre de 2008 (Cardona et ál., 2009; Pulgarín et ál., 2009) y octubre de 2009.

El volcán Puracé (2° 19' N y 76° 24' W) es el extremo NW de la CVLC, cuya historia evolutiva ha sido delineada por Monsalve & Pulgarín (1999), quienes plantean que esta cadena está asociada a un vulcanismo anterior (por ejemplo, Caldera de Cha-

### Volcán Puracé

El volcán Puracé (2° 19' N y 76° 24' W) es el extremo NW de la CVLC, cuya historia evolutiva ha sido delineada por Monsalve & Pulgarín (1999), quienes plantean que esta cadena está asociada a un vulcanismo anterior (por ejemplo, Caldera de Cha-

gartón). La CVLC está compuesta por 15 centros eruptivos; la mayoría está alineada en dirección N39° W, perpendicular al tren andino. La existencia de vulcanismo, actualmente activo, asociado espacial y estructuralmente a la Caldera de Paletará, propuesta por Torres et ál. (1999), así como la afinidad composicional de sus productos, llevaron a plantear que la CVLC es producto del vulcanismo resurgente de esta caldera (Pulgarín et ál., 1996; Monsalve & Pulgarín, 1999).

Los productos volcánicos predominantes, asociados a la actividad de la CVLC, son flujos de lava de composición intermedia (Schmitt, 1983; Acevedo et ál., 1987; Monsalve & Pulgarín, 1993); en general, los depósitos del segmento NW de la CVLC son coladas masivas y cortas, mientras que las del segmento SE son, principalmente, coladas macrocordadas y en bloques, que alcanzan grandes distancias desde su centro de emisión (hasta 10 km). Los productos piroclásticos, asociados a la actividad de la CVLC, se encuentran principalmente en el volcán Puracé.

El volcán Puracé es el más conocido de los volcanes de la CVLC debido a su actividad histórica (Ramírez, 1975; Pulgarín et ál., 1994; Espinosa, 2001), es un estratovolcán cuya fase inicial de actividad fue principalmente de tipo efusivo, durante la cual se produjeron lavas de composición andesítica. En los últimos 2000 años el comportamiento del volcán ha sido de tipo explosivo, caracterizado por la alternancia de productos piroclásticos que incluyen depósitos de flujo de escorias, depósitos de cenizas y bloques generados por emplazamiento y destrucción de domos, brechas hidrotermales, resultado de actividad freática, y depósitos de caída de cenizas y bombas. Además, con base en las descripciones de erupciones históricas, en campo se han reconocido los depósitos de las correspondientes a 1849, 1869 y 1949 (Monsalve, 1993; Monsalve; Pulgarín, 1993).

Petrográficamente, los productos asociados a la CVLC corresponden a fenoandesitas de dos piroxenos con fenocristales de plagioclasa, ortopiroxeno y clinopiroxeno, a veces con anfíbol u olivino subordinado, y como accesorios apatito y magnetita (Ku-

roda & París, 1978; Acevedo et ál., 1987; Monsalve, 1993; Monsalve & Pulgarín, 1993; Droux & Delaloye, 1996; Marín-Cerón, 2007).

## Geoquímica

El vulcanismo calcoalcalino en Colombia ha sido explicado como el resultado de la interacción de la cuña mantélica y fluidos derivados de la placa oceánica subducida en una margen continental activa típica. La diferencia en la concentración de los elementos traza y tierras raras (REE, por su sigla en inglés) entre los volcanes se explica, principalmente, en función de las diferencias en el basamento de estos o de las variaciones en la proporción de contaminación cortical (James & Murcia, 1984; Droux & Delaloye, 1996).

En la ZVNA, particularmente en volcanes del Ecuador, han sido reportadas lavas que presentan características composicionales distintas a la tendencia calcoalcalina típica. Estas rocas muestran una firma adakítica:  $\text{SiO}_2 \geq 56\text{-}60\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} > 3,5\%$ , alta concentración de Sr ( $>400\text{-}600$  ppm), muy baja concentración de Y ( $<18$  ppm) e intenso enriquecimiento de elementos de tierras raras ligeras (LREE, por su sigla en inglés) respecto a Elementos de tierras raras pesadas (HREE, por su sigla en inglés), reflejado en una relación  $\text{La}/\text{Yb} > 20$  y un contenido de Yb  $<1,9$  ppm (Monzier et ál., 1997; Beate et ál., 2001; Bourdon et ál., 2002a; Bourdon et ál., 2002b; Samaniego et ál., 2002; Bourdon et ál., 2003 & Samaniego et ál., 2005). En Colombia, rocas provenientes del CVNH, del volcán Puracé y otros centros eruptivos de la CVLC, muestran una tendencia similar, indicando un componente adakítico en su composición (Correa, 2009; Monsalve & Arcila, 2009).

Las lavas del CVNH son andesitas y dacitas, de contenido medio de  $\text{K}_2\text{O}$  (Correa, 2009). Los productos recientes del volcán Puracé y las estructuras asociadas se clasifican como andesitas altas en  $\text{K}_2\text{O}$  y altas en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Los datos geoquímicos, de muestras de ambos volcanes (Marriner & Millward, 1984; Monsalve, 1993; Droux & Delaloye, 1996; Marín-Cerón, 2007; Correa, 2009; Monsalve, en

preparación), graficados en el diagrama  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{K}_2\text{O}$  de Le Maitre et ál. (1989), revelan que la mayoría se agrupa en el campo de las andesitas, para el volcán Puracé, mientras que para el CVNH es clara la pre-

sencia de dacitas (figura 2). Se observa que el volcán Puracé presenta principalmente andesitas altas en  $\text{K}_2\text{O}$  y el CVNH presenta andesitas y dacitas medias en  $\text{K}_2\text{O}$  y algunas de contenido alto en  $\text{K}_2\text{O}$ .

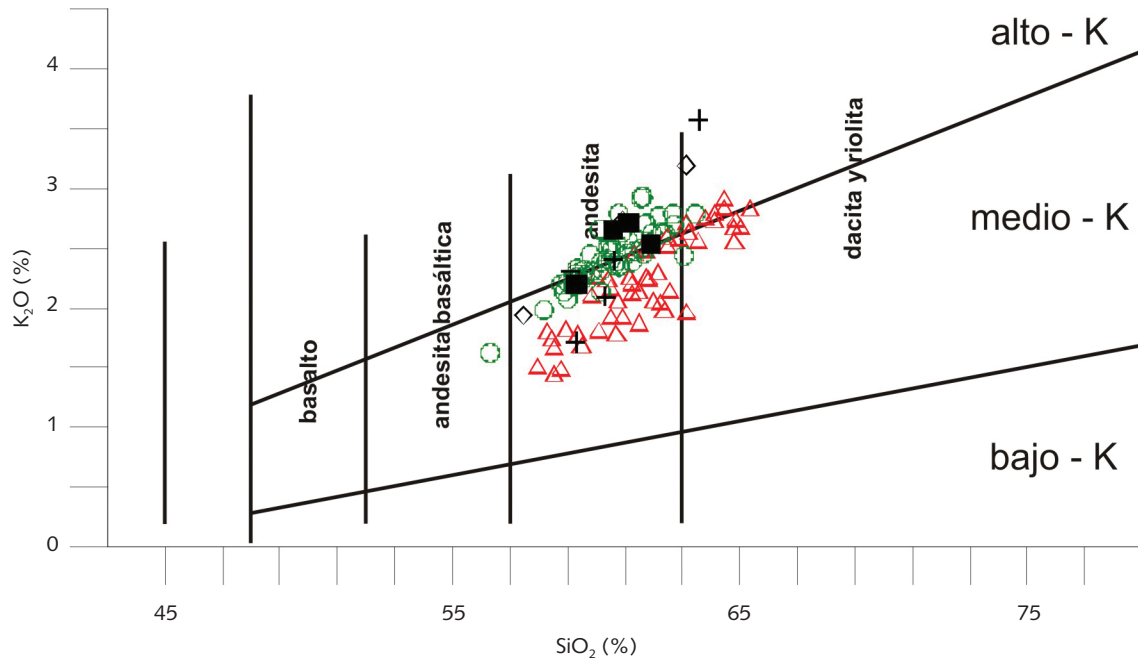


Figura 2. Diagrama  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{K}_2\text{O}$  (Le Maitre et ál., 1989) en el que han sido representadas muestras del volcán Puracé y el Complejo Volcánico Nevado del Huila. (CVNH, Correa, 2009 =  $\Delta$  rojo; volcán Puracé, Monsalve, en preparación =  $\circ$  verde; Marriner & Millward, 1984 =  $\blacksquare$  negro; Droux & Delaloye, 1996 =  $\blacklozenge$  negro; Marín-Cerón, 2007 =  $+$  negra, de las cuales una corresponde al volcán Puracé y las demás a otros volcanes de la CVLC).

Las muestras analizadas del volcán Puracé y el CVNH, así como datos disponibles de algunas muestras de la CVLC, presentan en su composición geoquímica características propias de rocas adakíticas: altas concentraciones de Sr (560 a 944 ppm en CVNH y 547 a 1001 ppm en Puracé), bajos contenidos de Y (10 a 19 ppm en CVNH y 14 a 23 ppm en Puracé), bajos contenidos en HREE (por ejemplo, Yb 0,9 a 1,8 ppm en CVNH y 1,3 a 2,0 ppm en Puracé), valores altos de Sr/Y (30 a 80 en CVNH y 27 a 52 en Puracé) y de La/Yb (13 a 32 en CVNH y 9 a 21 en Puracé), enriquecimiento en LREE y LILE y patrones fuertemente fraccionados de REE  $-(\text{La}/\text{Yb})_N > 10-$  (tabla 1).

Las relaciones isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  están en el rango de 0,7041 a 0,7045 (Murcia, 1982; Marriner

& Millward, 1984; Marín-Cerón, 2007; Correa, 2009), equivalentes o ligeramente más altos que los de la mayoría de adakitas, y similares a valores reportados en otros volcanes colombianos y ecuatorianos (Francis et ál., 1977; Hawkesworth et ál., 1979; James, 1982; Murcia, 1982; James & Murcia, 1984; Marriner & Millward, 1984; Bourdon et ál., 2003). Considerando que las principales diferencias entre adakitas y rocas calcoalcalinas típicas están dadas según el comportamiento de REE, Y y Sr, los diagramas utilizados para establecer si un grupo de rocas volcánicas pertenece a la serie “calcoalcalina normal” o al campo de las adakitas están basados en la relación de estos elementos (por ejemplo, Y vs Sr/Y,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs Yb, Yb vs La/Yb e  $\text{Yb}_N$  vs  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$ ).

Tabla 1. Criterios geoquímicos que permiten considerar a una roca como adakítica

	Adakitas <sup>1</sup>	Adakitas <sup>2</sup>	Adakitas <sup>3</sup>	CVNH <sup>4</sup>	Volcán Puracé <sup>5</sup>
SiO <sub>2</sub> (%)	> 56	≥ 56	63,89	58,0-65,4	56,3-63,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	> 15	≥ 15	17,4	15,3-17,5	15,1-18,7
Na <sub>2</sub> O (%)	3,5-7,5	3,5-7,5	4,4	3,8-4,8	3,5-4,4
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	< 0,5	< 0,5	0,345	0,4-0,7	0,4-0,9
Sr (ppm)	> 400-600	> 300	869	560 - 944	547-1001
Y (ppm)	< 18	< 15	9,5	10-19 (26)	14-23
Yb (ppm)	< 1.9	< 1.9	0,91	0,9-1,8 (2,1)	1,3-2,4*
Sr/Y	> 40	> 20	91,47	(23) 30-80	27-52
La/Yb	> 20	> 20	19,28	(9) 13-32	9-21*
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	< 0,7045	< 0,704	< 0,7045	0,7041- 0,7042	0,7042- 0,7043®
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	> 0,5129	> 0,5129	-	0,512 - 0,5128	0,5127- 0,5128®
MgO (%)	< 3	< 3	2,47	2,0-4,8	1,4-4,1
Anomalia Eu	No hay	No hay	No hay	No hay	No hay
K <sub>2</sub> O (%)	< 2	<2	1,52	1,44-2,91	1,62-3,56
Rb	-	-	30	27-82	28-144
Ni	20-40	20 - 40	39	15-80+	0,0-21
Cr	30-50	30-50	54	22-245	9-66
Ba/La	-	-	27,63	30-58	3-49*
Mg#	< 50	≈ 50	48	47-59	36-62

## Notas

1 = Adakitas según Samaniego et ál. (2002 y 2005), basados en Defant & Drummond (1990), Maury et ál. (1996) y Martin (1999).

2 = Adakitas según Castillo (2006), basado en Kay (1978), Defant & Drummond (1990), Peacock et ál. (1994) y Rollinson & Martin (2005).

3 = Adakita cenozoica promedio (n = 140) según Drummond et ál. (1996).

4 = Rocas del Complejo Volcánico Nevado del Huila según Correa (2009).

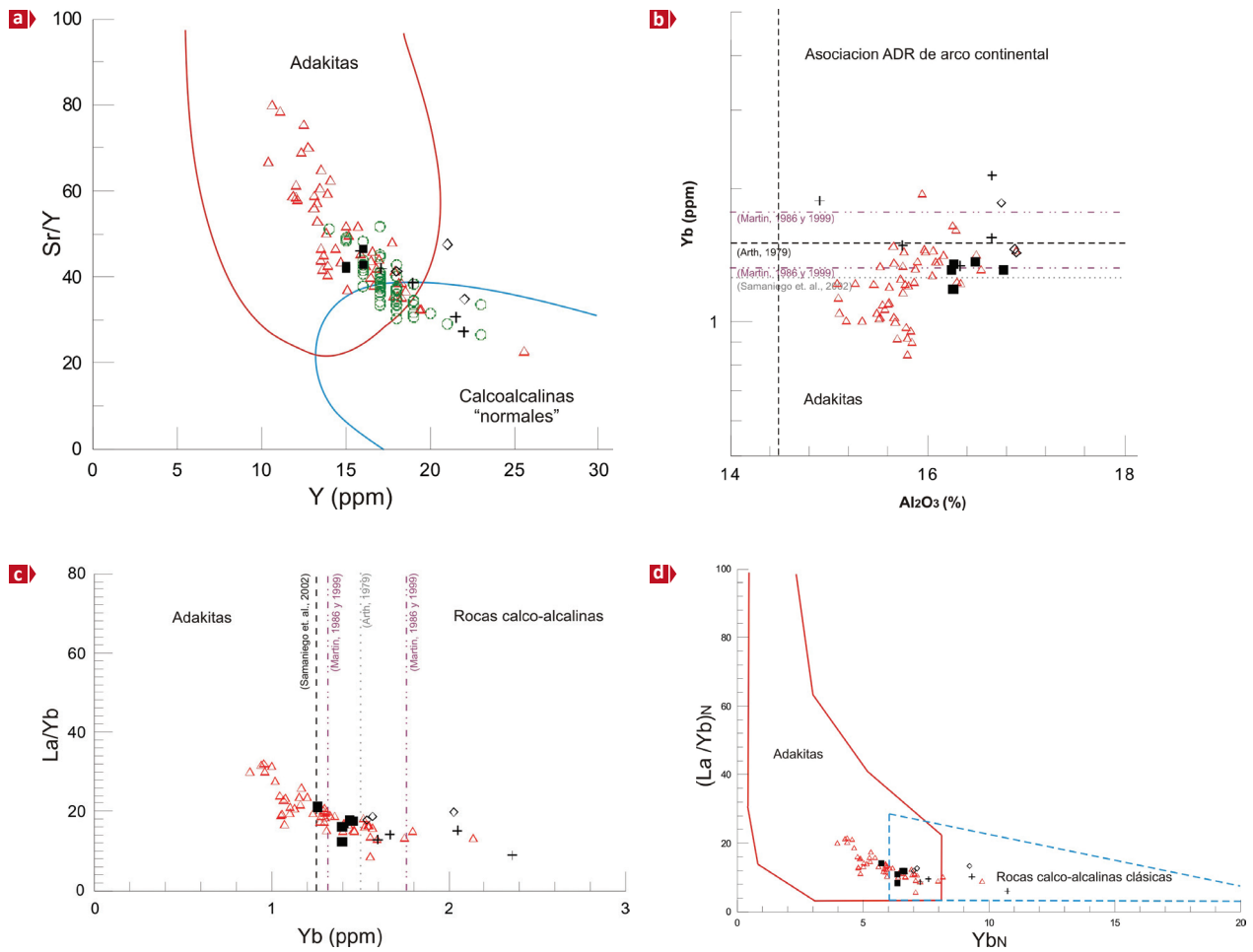
5 = En general, los datos del volcán Puracé son tomados de Marriner & Millward (1984), Droux-Delaloye (1996), Marín-Cerón (2007) y Monsalve (en preparación); y para algunos elementos específicamente de \* = Marriner & Millward (1984), Droux-Delaloye (1996) y Marín-Cerón (2007) y @ = <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr de Murcia (1982), Marriner & Millward (1984) y Marín-Cerón (2007); y <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd de Marín-Cerón (2007)

+ = Algunas muestras tienen Ni ppm por debajo de límite de detección.

En las figuras 3a, b, c y d, se observa que la mayoría de las muestras del CVNH se proyectan en el campo de adakitas o en la franja de superposición adakita-calcoalcalina, y pocas quedan en el campo de la serie calcoalcalina normal. Esta tendencia adakítica es más notoria en las lavas más recientes, que suelen tener composiciones más dacíticas (Correa, 2009).

En la gráfica de Y vs Sr/Y se observa que la mayoría de las muestras del volcán Puracé y CVLC se encuentran enmarcadas en el campo de las adakitas (figura 3a), mientras que en otros diagramas (por ejemplo, Yb<sub>N</sub> vs La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>) se ubican principalmente en la zona de superposición entre adakita y “calcoalcalina normal o típica”.





■ **Figura 3.** Diagramas de discriminación entre adakititas y rocas calcoalcálicas "normales" o "típicas" en los cuales se han representado muestras del volcán Puracé y el CVNH, a. Y vs Sr/Y (diagrama base modificado de Defant & Drummond 1990), b.  $Al_2O_3$  vs Yb (modificado de Drummond et ál., 1996, en Correa, 2009), c. Yb vs La/Yb (modificado de Samaniego et ál., 2002, en Correa, 2009), y d.  $Yb_N$  vs  $La_N/Yb_N$  (adaptado de Martin 1986 y Martin 1999, en Correa, 2009). (símbolos como en la figura 2).

Cuando se comparan el patrón de los elementos incompatibles normalizados al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989), de las rocas del volcán Puracé y del CVNH (figura 4), con el patrón de la "adakita típica", definida por Drummond et ál. (1996), se observa que se ajusta al rango de variación de los elementos incompatibles normalizados al manto primitivo, lo cual es más notorio para CVNH. Ambos volcanes muestran un mayor enri-

quecimiento de LREE (La a Sm) respecto a HREE (Dy a Lu), y de los LILE (Rb, Ba y Sr).

La tendencia adakítica que muestran los productos recientes del volcán Puracé y el CVNH, podría estar relacionada con la configuración de la Placa de Nazca bajo el continente, formada en centros de expansión diversos y caracterizada por segmentos de extensión cortos separados por largas zonas de fractura.

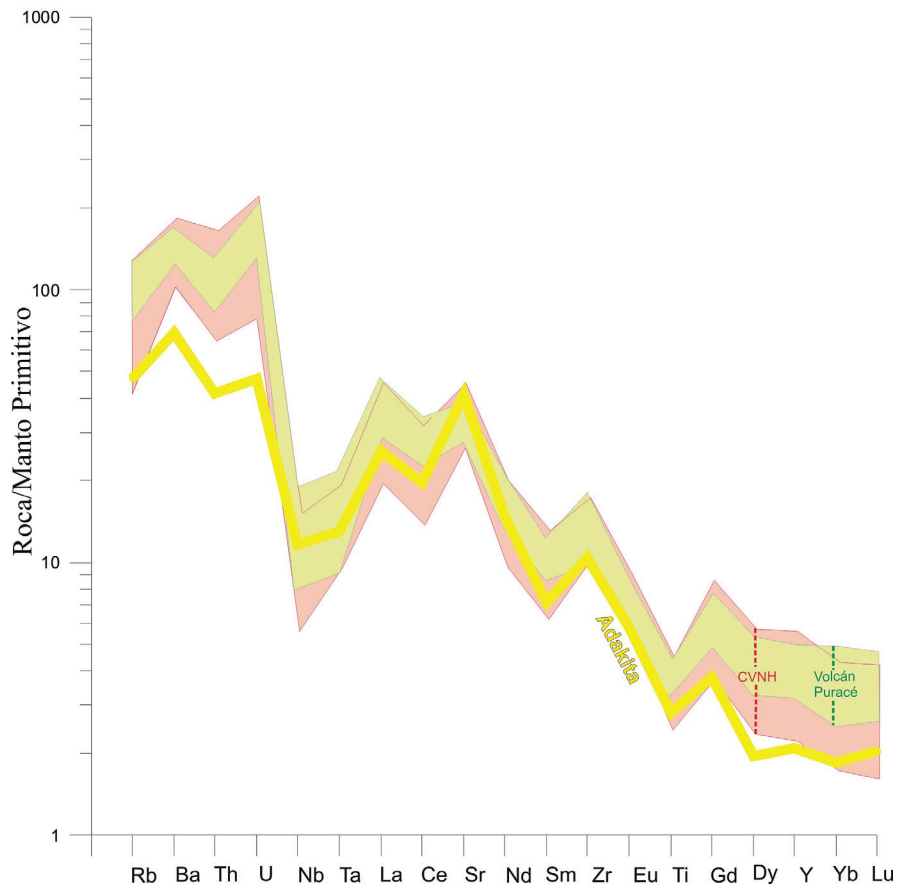


Figura 4. Patrones elementos incompatibles normalizados al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989) del volcán Puracé y CVNH comparado con el patrón de una adakita cenozoica promedio, correspondiente al promedio de 140 adakitas cenozoicas de diversos lugares del mundo (Drummond et ál., 1996). (CVNH, Correa, 2009; volcán Puracé, Marriner & Millward, 1984; Droux & Delaloye, 1996; Marín-Cerón, 2007).

### Tectónica

El análisis integrado de la sismicidad, las anomalías gravimétricas y la morfología de la parte oriental de la cuenca de Panamá y la fosa colombiana han permitido postular tres zonas de comportamiento aproximadamente homogéneo para la zona de subducción bajo el occidente de Colombia (figura 5): 1. Subducción Norte, que representa la subducción del bloque Coiba bajo el extremo noroeste de Colombia; 2. Subducción Centro, frente a las costas del sur de Chocó y Valle del Cauca, orientada hacia los 20°, y que permite definir una zona de *Benioff* hasta 200 km de profundidad, buzando 40° hacia los 110°, y 3. Subducción Sur, frente a las costas de Cauca, Nariño y norte del Ecuador, en un tramo de fosa orientado 40° de azimut, con un plano que buza 30° hacia los 130° (Arcila & Dimaté, 2005).

La limitación de los datos no permite diferenciar si los cambios y las transiciones entre segmentos se deben a plegamientos o a rasgaduras de la placa.

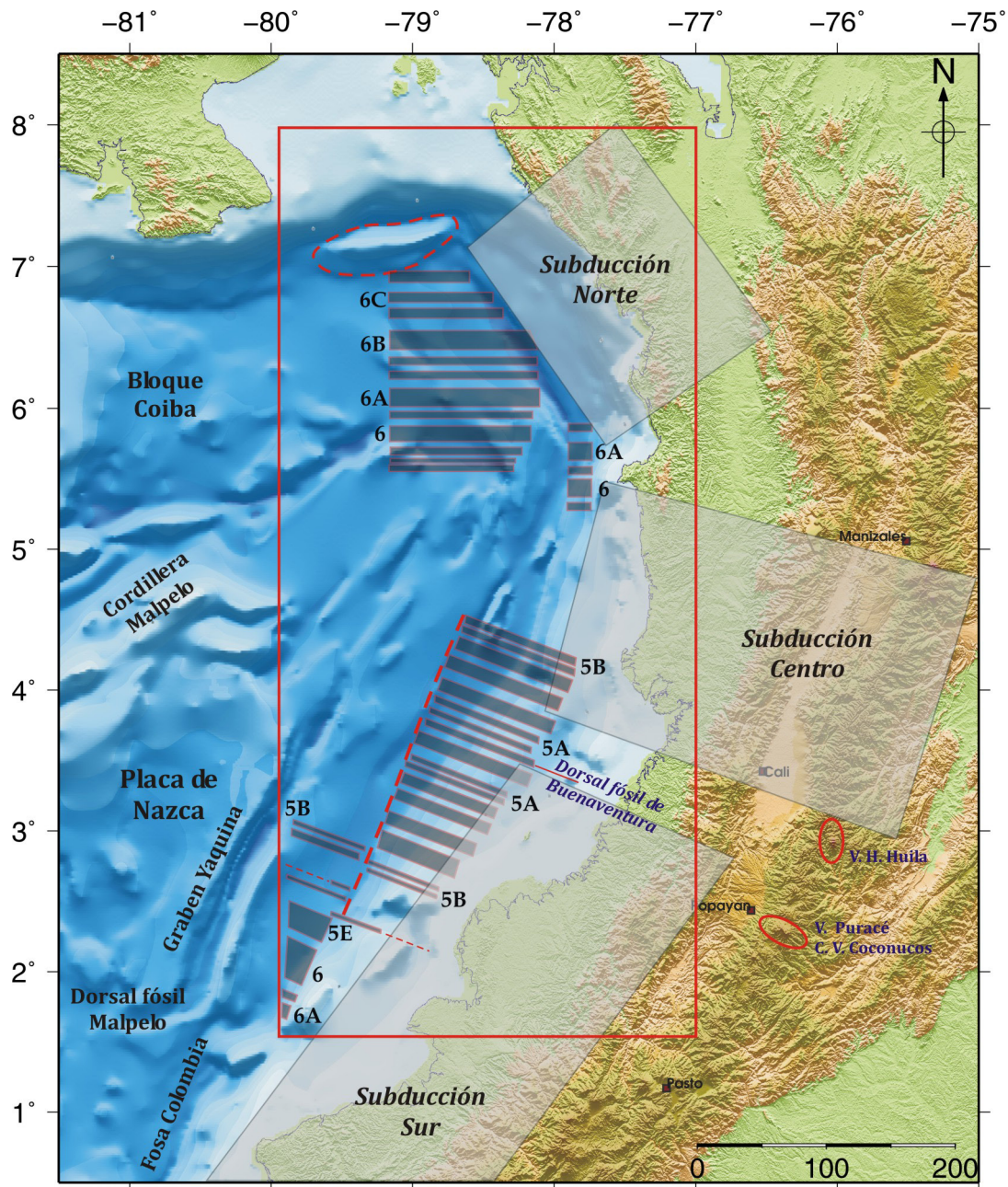
Las interpretaciones de las anomalías magnéticas y edades del piso oceánico permiten inferir que bajo la zona donde se encuentran el volcán Puracé y el CVNH subduce una corteza oceánica joven (10 a 15 Ma) y que en esta se halla un centro de expansión extinto definido por Hardy (1991), denominado dorsal fósil de Buenaventura (figura 5), que podría marcar la transición entre las zonas de Subducción Centro y Sur.

La zona de Subducción Sur (que participaría en la génesis del vulcanismo de los segmentos medio y sur de Colombia) se caracteriza como de bajo ángulo, en la cual la escasa sismicidad de profundidad intermedia no permite identificar y

postular una zona de *Benioff*. La ausencia de sismicidad en esta zona se ha explicado por la edad de la placa subducente, que al ser joven y caliente, rápidamente pierde su capacidad de generar sismos (Pennington, 1981).

Los rasgos tectónicos de la Placa de Nazca, para este sector, llevarían a postular la posible par-

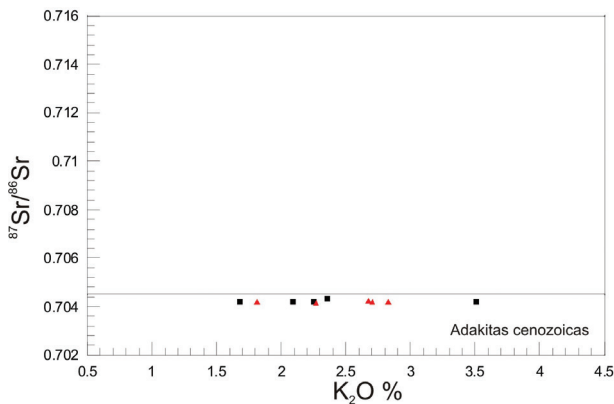
ticipación de la dorsal fósil de Buenaventura, que actúa como desgarre (Monsalve & Arcila, 2009), favoreciendo potencialmente la formación de una ventana en la placa subducida, lo cual contribuye a la fusión de la placa oceánica. Esto se relaciona directamente con la petrogénesis de los magmas que alimentan los volcanes Puracé y Huila.



■ Figura 5. Esquema tectónico de la parte oriental de la cuenca de Panamá y el occidente colombiano, donde se identifican los principales rasgos, se bosquejan las tres zonas de subducción y se muestra la localización de los volcanes Nevado del Huila y Puracé. En el recuadro rojo, mapa de anomalías magnéticas (cronas 5A, 5B, 5E, 6, 6A, 6B y 6C, edades entre 10 y 25 Ma), y localización de la dorsal fósil de Buenaventura (modificado de Hardy, 1991).

Las rocas del CVNH y del volcán Puracé presentan características de rocas adakíticas halladas en otras regiones del mundo, por ejemplo la ZVNA, concretamente en algunos de los volcanes de Ecuador. Las rocas de CVNH y del volcán Puracé-CVLC son de composición intermedia ( $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ ), con  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$  y  $\text{MgO} \leq 3\%$  (rara vez  $> 4\%$ ). En cuanto a rasgos adakíticos distintivos, definidos por el contenido y las variaciones de los elementos traza, presentan altas concentraciones de Sr ( $> 500$  ppm), bajos contenidos de Y y HREE ( $\text{Y} \leq 23$  ppm e  $\text{Yb} \leq 2,0$  ppm) y enriquecimiento en LILE y LREE. Los

contenidos de Cs (0,8 a 2,5 ppm en CVNH y 1,2 a 2,9 en Puracé) e Y (10 a 19 ppm en CVNH y 14 a 23 en Puracé), las sitúan en la categoría de adakitas cenozoicas según criterios presentados por Drummond et ál. (1996). Efectivamente, en los diagramas  $\text{K}_2\text{O}$  vs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  y  $\text{Rb}$  vs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (figuras 6 y 7), las muestras de los dos volcanes están dentro o muy cerca del campo de las adakitas cenozoicas típicas, aunque con  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ligeramente mayor, pero inferior al de las rocas pertenecientes a la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes (figura 7).

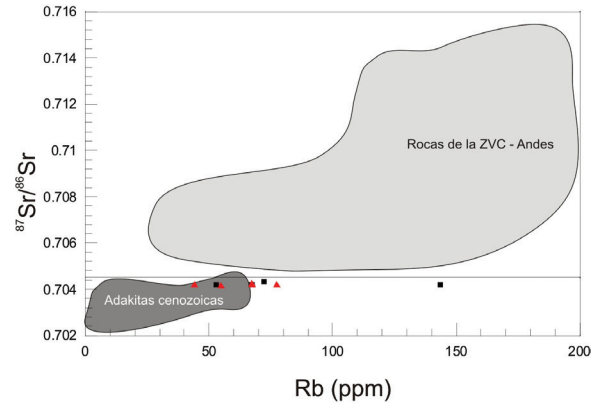


y volcán Puracé. El límite  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7045$  separa el campo de las adakitas cenozoicas de las rocas calcoalcalinas andinas típicas de los Andes Centrales (Drummond et ál., 1996). (CVNH, Correa, 2009 = ▲ rojo; volcán Puracé, Marín-Cerón, 2007 = ■ negro).

Figura 7. Diagrama  $\text{Rb}$  vs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  con muestras

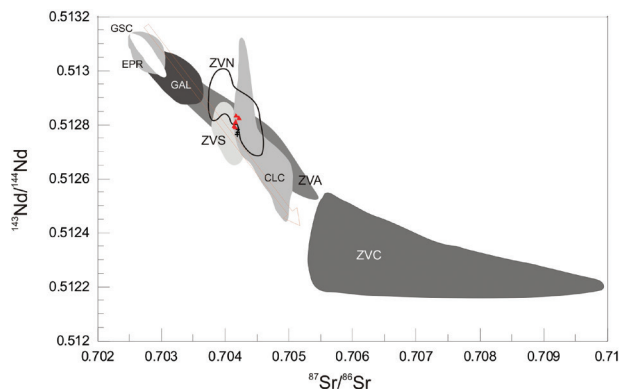
En el diagrama  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (figura 8) las muestras representativas de CVNH y del volcán Puracé están en el campo de ZVNA, o muy cerca. Al comparar con materiales de origen mantélico (provenientes del *East Pacific Rise*, del *Galápagos Spreading Centre* y del *hotspot* de Islas Galápagos), se evidencia que las muestras se encuentran en la franja de composición mantélica o tendencia mantélica (*mantle array*), con relaciones  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  relativamente altas y relaciones  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  bajas, lo cual confirma que los magmas se generaron posi-

Figura 6. Diagrama  $\text{K}_2\text{O}$  vs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  con muestras de CVNH



representativas de CVNH y volcán Puracé. El límite  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7045$  separa el campo de las adakitas cenozoicas de las rocas calcoalcalinas andinas típicas de los Andes Centrales (Drummond et ál., 1996) (Símbolos como en la figura 6).

blemente por fusión parcial de fuente mantélica con poca participación cortical. Según James & Murcia (1984), si en este diagrama las muestras siguen trayectorias descendentes que cortan y atraviesan (hacia la derecha de forma un tanto dispersa) la traza que corresponde a la tendencia mantélica, esto demuestra la presencia de contaminante cortical en la petrogénesis. Ni en el CVNH ni en el volcán Puracé las muestras siguen tal tipo de trayectorias, lo que confirma la nula o escasa contaminación cortical.



■ **Figura 8.** Diagrama  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  con muestras de CVNH y volcán Puracé comparadas con diversos campos delimitados por Samaniego *et ál.* (2005), Galápagos Spreading Centre (GSC), East Pacific Rise (EPR), Islas Galápagos (GAL), Zona Volcánica Norte de los Andes (ZVN), Zona Volcánica Sur de los Andes (ZVS), Zona Volcánica Austral de los Andes (ZVA), Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) y xenolitos de corteza continental inferior en SW de Colombia (CLC). (Flecha = tendencia mantélica) (Símbolos como en la figura 6).

## Conclusiones

Rocas de composición intermedia (andesitas y dacitas) del volcán Puracé, perteneciente a la Cadena Volcánica de Los Coconucos, y del Complejo Volcánico Nevado del Huila presentan características geoquímicas tanto en el contenido de elementos mayores como en el comportamiento de elementos traza, que indican una clara tendencia adakítica.

La complejidad de la subducción en la esquina NW de Suramérica podría explicar las variaciones en la composición de los magmas que sustentan el vulcanismo en la Zona Volcánica Norte de los Andes. Las características tectónicas y evolución de la parte más oriental de la cuenca de Panamá permitirían ubicar bajo la zona de los volcanes Nevado del Huila y Puracé, un centro de expansión extinto (dorsal fósil de Buenaventura), con las implicaciones que esta zona de debilidad tendría para la génesis del magmatismo.

Con los datos geoquímicos y tectónicos disponibles hasta el momento, se plantea la hipótesis de

que la firma adakítica presente en los productos emitidos por el volcán Puracé y el CVNH pueden reflejar fusión parcial de la Placa de Nazca en los bordes de una ventana astenosférica (*slab window*) formada en la Dorsal fósil de Buenaventura. Los fundidos así generados interactúan con la cuña mantélica, metasomatizándola y provocando el enriquecimiento en componentes provenientes de la placa subducida; la fusión de esta cuña mantélica genera los magmas con firma adakítica identificados en dichos volcanes. Este modelo estaría de acuerdo con las hipótesis propuestas por Rapp *et ál.* (1999) y Martin *et ál.* (2005), las cuales consideran la fusión parcial de un manto peridotítico previamente metasomatizado por fundidos de la corteza oceánica para explicar la génesis de algunas adakitas.

La realización de estudios geoquímicos más detallados para este sector, sobre todo en los volcanes de la CVLC, e investigaciones geofísicas en el área permitirán definir modelos más precisos sobre el origen y la evolución espacio-temporal de los magmas en estos volcanes, lo que supone un aporte importante para el conocimiento del vulcanismo en la Zona Volcánica Norte de los Andes.

## Agradecimientos

Al Geólogo Mario Cuéllar y su tutor de doctorado doctor Ángel Nieto-Samaniego, del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, y al revisor anónimo, que con sus comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar este texto. A los doctores Jacqueline Dixon, Tim Dixon y Zachary Atlas, de la Universidad de Miami, por las discusiones y el apoyo en la investigación relacionada con el Volcán Puracé, y al doctor Eumenio Ancochea, profesor y decano de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, por el apoyo recibido en la investigación sobre el Complejo Volcánico Nevado del Huila. ▀

## Referencias

- Abratis, M. & Worner, G. (2001). Ridge collision, slab-window formation, and the flux of Pacific asthenosphere into the Caribbean realm. *Geology*, 29, 127-130.
- Acevedo, A. P., Monsalve, M.L. & Cepeda, H. (1987). *Petrografía de algunas lavas de la Cadena de Los Cocunucos*. Informe interno. Bogotá: Ingeominas.
- Arcila, M. & Dimaté, C. (2005). *Caracterización de fuentes sísmicas de subducción. Estudio de Microzonificación sísmica de Santiago de Cali*. Informe 1-6: Bogotá: Ingeominas-Dagma.
- Atherton, M. P. & Petford, N. (1993). Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362, 144-146.
- Beate, B., Monzier, M., Spikings, R., Cotten, J., Silva, J., Bourdon, E. & Eissen, J-P. (2001). Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador, the Quimsacocha volcanic center. *Earth and Planetary Science Letters*, 192, 561-570.
- Bourdon, E., Eissen, J-P. Monzier, M., Robin, C., Martin, M., Cotton J. & Hall, M. L. (2002a). Adakite-like lavas from Antisana volcano, evidence for slab melt metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *Journal of Petrology*, 43, 199-217.
- Bourdon, E., Eissen, J-P., Gutscher, M-A., Monzier, M., Samaniego, P., Robin, C., Bollinger, C. & Cotten, J. (2002b). Slab melting and slab melt metasomatism beneath the North Andean Volcanic Zone, adakites and high-Mg andesites from Pichincha volcano. *Bulletin de la Societe Geologie*, 173, 195-206.
- Bourdon, E., Eissen, J-P., Gutscher, M-A., Monzier, M., Hall, M. L. & Cotton, J. (2003). Magmatic response to early aseismic ridge subduction, the Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 205, 123-138.
- Calmus, T., Aguilon-Robles, A., Maury, R. C., Benoit, H., Bellon, M., Cotton, J., Bourgois, J. & Michaud, F. (2003). Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites (“bajaites”) from Baja California, Mexico, the role of slab melts. *Lithos*, 66, 77-105.
- Cardona, C. E., Santacoloma, C., White R., McCausland, W., Trujillo, N., Narváez, A., Bolaños, R. & Manzo, O. (2009). Sismicidad tipo “Drumbeat” asociada a la erupción y emplazamiento de un domo en el volcán Nevado del Huila, noviembre de 2008. XII Congreso Colombiano de Geología. Paipa.
- Castillo, P. R. (2006). An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3), 257-268.
- Castillo, P. R., Janney, P. E. & Solidum, R. U. (1999). Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines, insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 33-51.
- Correa, A. & Cepeda, H. (1995). *Informe preliminar sobre la geología del Complejo Volcánico Nevado del Huila*. Informe interno. Popayán: Ingeominas.
- Correa, A. & Pulgarín, B. (2002). *Morfología, estratigrafía y petrografía general del Complejo Volcánico Nevado del Huila (CVNH) – Énfasis en el flanco occidental*. Informe interno. Popayán: Ingeominas.
- Correa, A. (2009). *Estudio petrológico, geoquímico y vulcanológico para establecer la evolución magmática del Complejo Volcánico del Huila, Colombia*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- Defant, M. J. & Drummond, M. S. (1990). Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662-665.
- Defant, M. J. & Kepezhinskas, P. (2001). Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS*, 82, 65-69.
- Droux, A. & Delaloye, M. (1996). Petrography and geochemistry of Plio-Quaternary calc-alkaline volcanoes of Southwestern Colombia. *Journal of South America Earth Science*, 9, 27-41.
- Drummond, M. S. & Defant, M. J. (1990). A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting, archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95(21), 503-521.
- Drummond, M. S., Defant, M. J. & Kepezhinskas, P. K. (1996). Petrogenesis of slab-derived trondhjemites-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 87, 205-215.
- Espinosa, A. (2001). *Erupciones históricas de los volcanes colombianos (1500-1995)*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Colección Jorge Álvarez Lleras.
- Francis, P., Moorbath, S., & Thorpe, R. (1977). Strontium isotope data for recent andesites in Ecuador and North Chile. *Earth and Planetary Science Letters*, 37, 197-202.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., Liu, X. M., Liu, Y. S. & Xu, W. L. (2004). Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432, 892-897.

- Garrinson, J. & Davidson, J. (2003). Dubious case for slab melting in the Northern volcanic zone of the Andes. *Geology*, 31, 565-568.
- Hardy, N. C. (1991). Tectonic evolution of the easternmost Panama Basin: Some new data and inferences. *Journal of South America Earth Science*, 4, 261-269.
- Harmon, R. S., Barreiro, B. A., Moorbath, S., Hoefs, J., Francis, P. W., Thorpe, R. S., Déruelle, B., McHugh, J. & Viglino, J. A. (1984). Regional O-, Sr-, and Pb-isotope relationships in late Cenozoic calc-alkaline lavas of the Andean Cordillera. *Journal of the Geological Society London*, 141, 803-822.
- Hawkesworth, C. J., Norry, M. J., Roddick, J. C., Baker, P. E., Francis, P. W. & Thorpe, R. S. (1979).  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , and incompatible element variations in calc-alkaline andesites and plateau lavas from South America. *Earth and Planetary Science Letters*, 42, 45-57.
- Hildreth, W. & Moorbath, S. (1988). Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98, 455-489.
- James, D. E. (1982). A combined O, Sr, Nd, and Pb isotopic and trace element study of crustal contamination in central Andean lavas. I. Local geochemical variations. *Earth and Planetary Science Letters*, 57, 47-62.
- James, D.E. & Murcia, L.A. (1984). Crustal contamination in northern Andean volcanics. *Journal of the Geological Society London*, 141, 823-830.
- Kay, R. W. (1978). Aleutian magnesian andesites, melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4, 117-132.
- Kay, S.M., Ramos, V.A. & Márquez, M. (1993). Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *Journal of Geology*, 101, 703-714.
- Kelemen, P., Hanghoj, K. & Greene, D. (2003a). One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust (Chapter 3.18), En, Holland, H. & Turekian, K. (Eds), *Treatise on Geochemistry*, Vol. 3 The Crust. Oxford: Elsevier-Pergamon, pp. 593-659.
- Kelemen, P. B., Yogodzinski, G. M. & Scholl, D. W. (2003b). Alongstrike variation in the Aleutian island arc, genesis of high-Mg# andesite and implications for continental crust. En J. Eiler (Ed.), *Inside the Subduction Factory. Geophysical Monograph, American Geophysical Union*, 138, 223-276.
- Kepezhinskas, P., Defant, M. J. & Drummond, M. S. (1996). Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1217-1229.
- Kilian, R. & Pichler, H. (1989). The North Andean Volcanic Zone. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, I, 1075-1085.
- Kuroda, G. & Paris, G. (1978). Petrographical notes of some dacites and andesites of Puracé volcano, Cauca, Colombia. Report of Andean Studies, Special vol. 21-32. Shizuoka University.
- Le Maitre, R. (Ed.), Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, M., Le Bas, M., Sabine, P., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A. & Zanettin, B. (1989). A classification of igneous rocks and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Levin, V., Shapiro, N. M., Park, J. & Ritzwoller, M. H. (2005). Slab portal beneath the western Aleutians. *Geology*, 33, 253-256.
- Lustrino, M. (2005). How the delamination and detachment of lower crust can influence basaltic magmatism. *Earth-Science Reviews*, 72, 21-38.
- Marín-Cerón, M. (2007). *Major, trace element and multi-isotopic systematics of SW Colombian volcanic arc, northern Andes, implication for the stability of carbonate-rich sediment at subduction zone and the genesis of andesite magma*. PhD Thesis. Okayama University.
- Marriner, G.F. & Millward, D. (1984). Petrochemistry of cretaceous to recent volcanism in Colombia. *Journal of the Geological Society London*, 141, 473-486.
- Martin, H. (1986). Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14, 753-756.
- Martin, H. (1999). Adakitic magmas, modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46, 411-429.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F. & Champion, D. (2005). An overview of adakite, tonalite-trondhjemitic-granodiorite (TTG), and sanukitoid, relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79, 1-24.
- Maury, R. C., Sajona, F. G., Pubellier, M., Bellon, H. & Defant, M. J. (1996). Fusion de la croûte océanique dans les zones de subduction/collision récentes,

- l'exemple de Mindanao (Philippines). *Bulletin de la Societe Geologie*, 167, 579-595.
- Maury, R. C., Defant, M. J., Bellon, H., Jacques, D., Joron, J. L., McDermott, F. & Vidal, P. (1998). Temporal geochemical trends in northern Luzon arc lavas (Philippines), implications on metasomatic processes in the island arc mantle. *Bulletin de la Societe Geologie*, 169, 69-80.
- Monsalve, M. L. (1993). Geoquímica y dataciones de episodios tipo San Vicente en el volcán Puracé. *Boletín Geológico*, 33, 3-17. Bogotá: Ingeominas.
- Monsalve, M. L. (en preparación). *Geología, geoquímica y petrogenesis de los depósitos del volcán Puracé, Colombia*.
- Monsalve, M. L. & Pulgarín, B. (1993). Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Puracé. *Revista Ingeominas*, 2, 3-27. Bogotá: Ingeominas.
- Monsalve, M. L. & Pulgarín, B. (1999). Cadena volcánica de los Coconucos (Colombia), centros eruptivos y productos recientes. *Boletín Geológico*, 37, 17-51. Bogotá: Ingeominas.
- Monsalve, M. L. & Arcila, M. (2009). Contexto tectónico de la Zona Volcánica del Puracé y Provincia Alcalina del Valle Superior del Magdalena. XII Congreso Colombiano de Geología. Paipa.
- Monzier, M., Robin, C., Hall, M. L., Cotten, J., Mothes, P., Eissen, J-P. & Samaniego, P. (1997). Les adakites d'Equateur, modele preliminaire. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 324, 545-552.
- Murcia, L. A. (1982). El vulcanismo Plio-Cuatemario de Colombia, depósitos piroclásticos asociados y mediciones isotópicas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$   $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  y  $^{18}\text{O}$  en lavas de los volcanes Galeras, Puracé y Nevado del Ruiz. Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas, 10, 3-17.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, 757-775.
- Peacock, S.M., Rushmer, T., & Thompson, A. B. (1994). Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(1-2), 227-244.
- Pennington, W. (1981). Subduction of the Eastern Panama basin and sismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*, 86(10), 753-770.
- Petford, N. & Atherton, M. (1996). Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust, the Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37, 1491-1521.
- Prouteau, G., Scaillet, B., Pichavant, M. & Maury, R. (2001). Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature*, 410, 197-200.
- Pulgarín, B., Monsalve, M. L., Arcila, M. & Cepeda, H. (1994). Actividad histórica y actual del volcán Puracé, Colombia. *Boletín Geológico*, 34(2-3), 39-53. Bogotá: Ingeominas.
- Pulgarín, B., Monsalve, M. L., Torres, P. & Cepeda, H. (1996). La Cadena Volcánica de los Coconucos, producto de vulcanismo resurgente. VII Congreso Colombiano de Geología, *Proceedings*, tomo III, pp. 367-377. Santafé de Bogotá.
- Pulgarín, B., Cardona, C. E., Agudelo, A., Santacoloma, C., Monsalve, M. L., Calvache, M. L., Murcia, H., Ibáñez, D., García, J., Murcia, C., Cuellar, M., Ordóñez, M., Medina, E., Balanta, R., Calderón, Y. & Leiva, O. (2009). Erupciones históricas recientes del volcán Nevado del Huila, cambios morfológicos y lahares asociados. XII Congreso Colombiano de Geología, Paipa.
- Ramírez, J. E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia* (2.ª edición. Bogotá: IGAC.
- Ramos, V., Kay, S. M. & Singer, B. S. (2004). Las adakitas de la cordillera Patagónica, nuevas evidencias geoquímicas y geocronológicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(4), 693-706.
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D. & Applegate, G. S. (1999). Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge, experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160, 335-356.
- Robin, C., Hall, M., Jiménez, M., Monzier, M. & Escobar, P. (1997). Mojanda volcanic complex (Ecuador), development of two adjacent contemporaneous volcanoes with contrasting eruptive styles and magmatic suites. *Journal of South America Earth Science*, 10, 345-359.
- Rodríguez, C., Sellés, D., Dungan, M., Leeman, W. & Langmuir, C. (2005). Nevado de Longaví volcano (Chilean Andes, 36.2°S), the origin of adakitic magmas by fractional crystallization of amphibole-rich assemblages from water-rich parent magmas. 6th International Symposium on Andean Geodynamics, Extended Abstracts, pp. 608-611. Barcelona.



- Rogers, R. D., Karason, H. & Van der Hilst, R. D. (2002). Epeirogenic uplift above a detached slab in northern Central America. *Geology*, 30, 1031-1034.
- Rollinson, H. & Martin, H. (2005). Geodynamic controls on adakite, TTG and sanukitoid genesis: implications for models of crust formation. Introduction to the Special Issue (Editorial). *Lithos*, 79, IX-XII.
- Sajona, F. G., Maury, R. C. & Bellon, H. (1993). Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 21, 1007-1010.
- Sajona, F. G., Bellon, H., Maury, R. C., Pubellier, M., Cotton, J. & Rangin, C. (1994). Magmatic response to abrupt changes in tectonic setting, Pliocene-Quaternary calcalkaline lavas and Nb-enriched basalts of Leyte and Mindanao (Philippines). *Tectonophysics*, 237, 47-72.
- Sajona, F. G., Maury, R. C., Bellon, H., Cotton, J., Defant, M. J. & Pubellier, M. (1995). Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 21, 1007-1010.
- Sajona, F., Maury, R., Bellon, H., Cotton, J. & Defant, M. (1996). High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines). *Journal of Petrology*, 37, 693-726.
- Samaniego, P., Martin, H., Robin, C., & Monzier, C. M. (2002). Transition from calcalkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador, Insights into slab melts and mantle wedge interactions. *Geology*, 30, 967-970.
- Samaniego, P., Martin, H., Monzier, M., Robin, C., Fornari, M., Eissen J-P. & Cotton, J. (2005). Temporal evolution of magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes, The geology and petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Petrology*, 46, 2225-2252.
- Schmidt, M. W. & Poli, S. (1998). Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 163, 361-379.
- Schmitt, C. (1983). Young volcanism in the Cordillera ranges of Southern Colombia. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, I (3/4), 318-328.
- Sun, S. & McDonough, W. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts, implications for mantle composition and processes. En A. Saunders & M. Norry (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications*, 42, 313-345.
- Thorkelson, D. J. & Breitsprecher, K. (2005). Partial melting of slab window margins, genesis of adakitic and non-adakitic magmas. *Lithos*, 79, 25-41.
- Torres, P., Monsalve, M. L., Pulgarín, B. & Cepeda, H. (1999). Caldera de Paletará, Aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila (Colombia). *Boletín Geológico*, 37, 1-15. Bogotá: Ingeominas.
- Van Keken, P. E. (2003). The structure and dynamics of the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 215, 323-338.
- Wang, Q., Xu, J-F., Zhao, Z-H., Bao, Z. W., Xu, W. & Xiong, X-L. (2004). Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China, Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal*, 38, 417-434.
- Wang, Q., Xu, J-F., Jian, P., Bao, Z-W., Li, C-F., Xiong, X-L. & Ma, J. L. (2006). Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China, Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47, 119-144.
- Wyllie, P. J. (1979). Magmas and volatile components. *American Mineralogist*, 64, 469-500.
- Xu, J.F., Shinjo, S., Defant, M.J., Wang, Q. & Rapp, R.P. (2002). Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China, Partial melting of delaminated lower continental crust. *Geology*, 30, 1111-1114.
- Yogodzinski, G. M., Kay, R. W., Volynets, O. N., Koloskov, A. V. & Kay, S. M. (1995). Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region, Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geological Society of America Bulletin*, 107, 505-519.
- Yogodzinski, G. M., Lees, J. M., Churikova, T. G., Doren-dorf, F., Woerner, G. & Volynets, O. N. (2001). Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges. *Nature*, 409, 500-504.