

Consideraciones geoquímicas y petrogenéticas para establecer la evolución magmática del Complejo Volcánico Nevado del Huila

GEOCHEMICAL AND PETROGENETIC CONSIDERATIONS IN ORDER TO EXPLAIN MAGMATIC THE EVOLUTION OF THE NEVADO DEL HUILA VOLCANO COMPLEX

ANA MARÍA **Correa Tamayo**¹
EUMENIO **Ancochea Soto**²

Resumen

El Complejo Volcánico Nevado del Huila está formado por rocas de composición intermedia a ácida, afinidad calcoalcalina y contenido medio en K_2O . Según el contenido en SiO_2 hay tres tipos geoquímicos: andesitas ss (57-60%), andesitas dacíticas (60-63%) y dacitas (63-66%). Presentan tendencia adakítica (por ejemplo, altos contenidos de Sr y LREE bajos contenidos de Y y HREE, altas Sr/Y y La/Yb, y $^{87}Sr/^{86}Sr < 0,7045$). Esta tendencia es más notoria en lavas más recientes, que suelen tener composiciones más dacíticas. El comportamiento de los elementos mayores, REE, LFSE y HFSE son típicos de andesitas de margen continental activo. La composición isotópica Sr-Nd es similar a la de otros volcanes de la ZVN de los Andes. Las relaciones isotópicas Sr-Nd son homogéneas ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7041-0,7042$ y $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,51279-0,51283$) y típicas de fundidos mantélicos, con limitada participación de contaminantes derivados de placa subducente o de corteza continental. Los contenidos en elementos traza, compatibles e incompatibles, indican que la cristalización fraccionada controla la evolución magmática, sin descartar la participación puntual de contaminación cortical y mezcla de magmas. Los magmas se formaron probablemente por fusión parcial de cuña mantélica enriquecida por componentes de placa subducente. La cristalización fraccionada, posterior, produjo la mayor parte de variabilidad composicional de este complejo volcánico.

Palabras clave

Complejo Volcánico Nevado del Huila, andesita, dacita, adakita, fundidos mantélicos, cristalización fraccionada.

Abstract

The Nevado del Huila Volcano Complex is made of rocks that have intermediate to acid composition, calc-alkaline affinity and middle content in K_2O . According to SiO_2 content, there are three geochemical types: andesites ss, dacitic andesites and dacites. Adakitic tendency in more recent lavas and more dacitic composition. Behaviors of major elements, REE, LFSE and HFSE are typical of orogenic andesites of active continental margin. Isotopic composition Sr-Nd resemble to volcanoes of ZVN Andes (Ecuador's volcanoes, Galeras and Nevado del Ruiz volcanoes from Colombia). Homogeneous isotopic rate Sr-Nd ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7041-0,7042$ and $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,51279-0,51283$) are typical of mantle melts, with limited taking part of derived components of subducted slab or continental crust. Compatible and incompatible trace elements indicate that fractional crystallization is petrogenetic process that has controlled magmatic evolution. Besides to reject others mechanisms: crustal contamination and magmas mixing. These rocks have probably been generated from partial melting of enriched mantle wedge by components of subducted slab. Later fractional crystallization drove magmatic differentiation of this volcano complex.

Key words

Nevado del Huila volcano complex, andesite, dacite, adakite, mantle melts, fractional crystallization.

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

¹ Servicio Geológico Colombiano, acorrea@sgc.gov.co

² Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (España), geodec@geo.ucm.es

Introducción

El Complejo Volcánico Nevado del Huila (CVNH) tiene una altura de 5364 msnm. Es el volcán activo más alto de Colombia y está ubicado en la cordillera Central, en la unión entre los departamentos Cauca, Huila y Tolima (figura 1). Antes de 1995 era catalogado un estratovolcán con actividad principalmente efusiva. En 1995 se encontró la primera evidencia de que en el pasado también hubo emisión de material piroclástico. La población más cercana es el municipio de Belalcázar (Cauca) a 30 km al SE de su cima. Su área de influencia pertenece al Parque Nacional Natural Nevado del Huila. La labor de vigilancia está a cargo, desde 1992, del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPo) de Ingeominas.



Figura 1. Ubicación del Complejo Volcánico Nevado del Huila.

Estudios geomorfológicos y volcanoestratigráficos detallados, además de haber permitido establecer, de forma preliminar, cierto grado de variación composicional en las lavas del CVNH, permitieron definir tres posibles estadios en el desarrollo de su historia eruptiva, cuyas edades han podido ser definidas por dataciones radiométricas: Estadio Pre-Huila que se inició hace 1,5 Ma aproximadamente (Pleistoceno Inferior), Estadio Huila Antiguo que empezó hace 100.000 años (Pleistoceno Superior) y Estadio Huila Reciente que comenzó hace 11.000-10.000 años, una vez finalizada la última Glaciación, y que se ha prolongado durante el

Holoceno. Toda esta historia queda enmarcada en la segunda etapa del volcanismo cenozoico colombiano. Cada uno de los tres estadios de la historia eruptiva del CVNH presenta características petrográficas y geoquímicas particulares.

Para establecer la evolución magmática del CVNH, es necesario efectuar un análisis, lo más detallado posible, de las características y las variaciones geoquímicas de sus productos a lo largo del tiempo y averiguar las condiciones petrogenéticas de los magmas que les dieron origen. Este estudio se constituye en una de las herramientas fundamentales para efectuar la valoración de la amenaza y el riesgo volcánico.

Antecedentes

Pocos fueron los estudios sobre el CVNH llevados a cabo antes de 1994. El sismo de Páez del 6 de junio de 1994, de magnitud 6,4 y con epicentro en la base del CVNH, marcó un cambio importante, y aunque no estuvo asociado a actividad volcánica, causó gran interés ante la sospecha de una eventual reactivación. Los trabajos más antiguos son de finales del siglo XIX y comienzos del XX, entre los que cabe destacar el trabajo de Stübel (1906), quien fue el primero en señalar que el volcán está formado por andesitas y dacitas de augita. Uno de los trabajos más importantes de la segunda mitad del siglo XX es el primer mapa de riesgos volcánicos potenciales de Nevado del Huila hecho por Cepeda et ál. (1986).

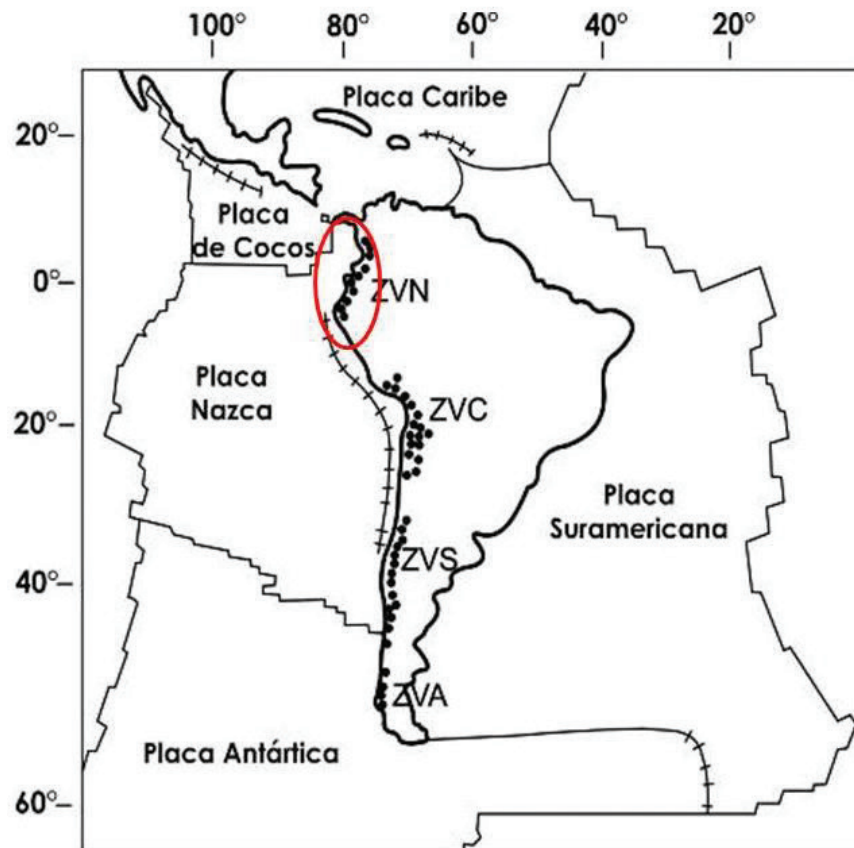
Después del sismo de Páez se llevaron a cabo diversos estudios, entre los cuales se mencionan los realizados por Ingeominas (1994), que corresponde a una evaluación sobre la emergencia ocasionada por el sismo de Páez del 6 de junio de 1994; Correa & Cepeda (1995), quienes efectuaron el primer estudio, preliminar, sobre la geología del CVNH; Correa et ál. (2000), que en un artículo presentan, brevemente, algunos rasgos generales y composicionales de este complejo volcánico; Pulgarín (2000), quien escribió su tesis de maestría sobre los depósitos masivos, del Pleistoceno tardío, asociados al colapso del flanco sur del CVNH; y por

último Correa & Pulgarín (2002), que realizaron un estudio más detallado sobre aspectos geomorfológicos, estratigráficos y petrográficos, con énfasis en el lado occidental del CVNH. El trabajo más reciente corresponde a la tesis doctoral de Correa (2009), en la que se realiza un amplio estudio sobre la petrología, geoquímica y vulcanología del Complejo Volcánico del Huila con el fin de establecer su evolución magmática.

Marco geológico

El CVNH está ubicado en la Zona Volcánica Norte (ZVN) de los Andes, que es el resultado de la subducción activa de la Placa de Nazca debajo de la Placa Suramericana (figura 2). La ZVN ha sido escenario además de acreciones de arcos insulares, de corteza oceánica e incluso de fragmentos con-

tinental, y del choque con dorsales asísmicas, como Malpelo y Carnegie, lo que ha provocado el desplazamiento sucesivo de la zona de subducción hacia el occidente (Montes & Sandoval, 1998). Se ha conformado así el denominado Bloque Andino (Andes de Colombia), sometido desde el Mesozoico a esfuerzos de compresión y colisión combinados con distensión localizada, en los sitios donde hay volcanismo (Meissner et ál., 1980). Uno de los factores que incide en la ubicación de los volcanes y la generación de magmas en los Andes es la configuración de la zona de subducción, que a su vez es controlada por velocidad de convergencia, edad de placa subducente y rasgos corticales heredados (por ejemplo, presencia de grandes fallas que favorecen ascenso de los magmas).



■ Figura 2. El entorno tectónico de la esquina noroccidental de Suramérica, en el cual se enmarca el CVNH, está definido por cuatro placas litosféricas principales: Suramericana, Nazca, Cocos y Caribe. La cadena de volcanes andina ha sido dividida en cuatro segmentos o zonas volcánicas: norte (ZVN), a la cual pertenece el CVNH; la central (ZVC), la sur (ZVS) y la austral (ZNA).

Fuente: Tomada y modificada de Alvarado et ál., 1999.

El CVNH, además de ser uno de los 30 volcanes activos de Colombia, y estar ubicado sobre el cruce de dos sistemas de fallas (Sistema de Fallas Moras, de tendencia NE, y Sistema de Fallas Salento, de tendencia NW), es uno de los rasgos que permitieron a Hall & Wood (1985) definir el límite que separa a dos de los ocho segmentos volcano-tectónicos en que dividieron a los Andes del Norte. El CVNH está separado de los demás grupos de volcanes, que constituyen la cadena volcánica colombiana, por *gaps* o zonas de ausencia de volcanismo, originados probablemente por cambios en la inclinación de la subducción. Su historia eruptiva está enmarcada en la segunda etapa del volcanismo cenozoico, colombiano, que va del Plioceno superior al Holoceno. Este volcanismo, típicamente calcoalcalino, se ha desarrollado en un arco de margen continental activo ubicado a 200 km, aproximadamente, de la Fosa Colombia-Ecuador y a 150 km por encima de la zona de *Benioff*. El basamento del CVNH está formado por rocas metamórficas del Paleozoico (por ejemplo, neis de Quintero y Complejo Cajamarca), rocas intrusivas del Mesozoico (por ejemplo, Batolito de La Plata), rocas metasedimentarias y sedimentarias del Cretácico y rocas intrusivas del Terciario.

Con base en criterios geomorfológicos, estratigráficos y petrográficos, además de obtener el mapa geológico del CVNH, se pudo definir una secuencia de 13 unidades volcanoestratigráficas, conformadas principalmente por secuencias de gruesos flujos de lavas andesíticas y escasos depósitos de flujos piroclásticos, intercalados (Correa, 2009).

Desde el punto de vista petrográfico, en el CVNH se han identificado diversos tipos de andesitas: de dos piroxenos (cpx + opx), clinopiroxénicas, anfíolicas, clinopiroxénicas con anfíbol y ortopiroxeno, etc. En general, las unidades volcanoestratigráficas en cada uno de los tres estadios definidos en este complejo volcánico muestran el predominio de uno de estos tipos petrográficos. Las lavas del Estadio Pre-Huila son principalmente andesitas de dos piroxenos. Un rasgo notable es el aumento en el porcentaje de anfíbol que se va

dando hacia el Estadio Huila Antiguo, donde predominan las andesitas clinopiroxénicas, y especialmente en el Estadio Huila Reciente, con andesitas anfíolicas como tipo petrográfico predominante (Correa, 2009).

Metodología

Como pilares fundamentales para este trabajo, fueron realizadas diversas actividades previas: revisión bibliográfica exhaustiva (Correa & Pulgarín, 2002), elaboración de mapa fotogeológico en escala 1:25.000, levantamiento volcanoestratigráfico en cuatro campañas de campo y un concienzudo estudio petrográfico. Como complemento de todas estas labores, se llevó a cabo el análisis químico de las diferentes fases minerales en 45 muestras seleccionadas entre dichas unidades y la datación por K/Ar en roca total en 11 muestras representativas de las lavas del CVNH y su basamento. Una presentación detallada de los resultados y las interpretaciones obtenidas en esos estudios previos puede encontrarse en la tesis de Correa (2009).

Para el estudio de las características y variaciones geoquímicas y de las condiciones petrogenéticas, que son el objeto de discusión principal de este artículo, fueron efectuados 51 análisis químicos de roca total en muestras representativas de las diferentes unidades volcanoestratigráficas del CVNH (Correa, 2009). En cada una de estas se determinaron los elementos mayores y algunos elementos trazas por el método ICP; y la mayoría de elementos trazas, incluido REE, por el método ICP/MS (en los laboratorios Actlabs Ltda., Canadá). Se midieron, además, las relaciones isotópicas de Sr y Nd en cinco muestras representativas de las principales unidades del CVNH (Correa, 2009). Estos análisis isotópicos se realizaron en el Centro de Geocronología y Geoquímica Isotópica de la Universidad Complutense de Madrid.

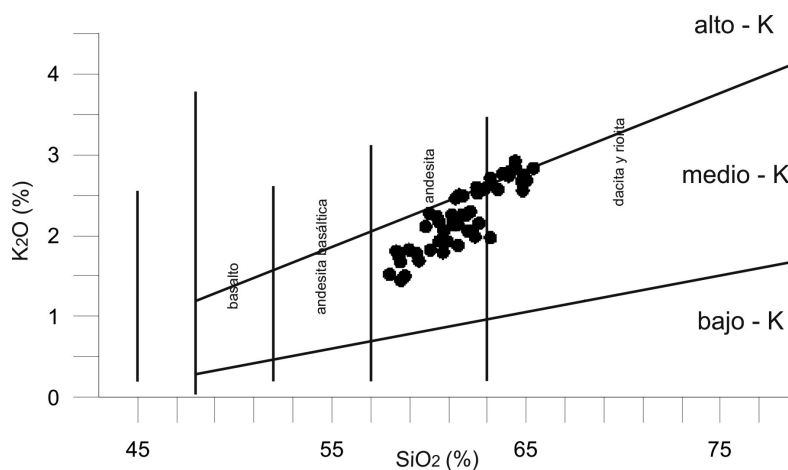
Resultados obtenidos

Desde el punto de vista geoquímico, el CVNH está conformado por rocas de composición intermedia (el 70% de las muestras analizadas) a ácida (30%),

fundamentalmente de la serie calcoalcalina y de contenido en K_2O medio (1,44-2,91%), (figura 3). Son rocas metaluminosas (Índice Saturación en Al_2O_3 entre 0,88 y 1,12%) y con SiO_2 entre 58% y 65%. Según la variación en el contenido de SiO_2 se han distinguido tres tipos litológicos: andesitas ss (57-60%), andesitas dacíticas (60-63%) y dacitas (63 - 66%).

La mayoría de los elementos mayores, excepto K_2O , Na_2O y P_2O_5 , disminuyen de andesitas a da-

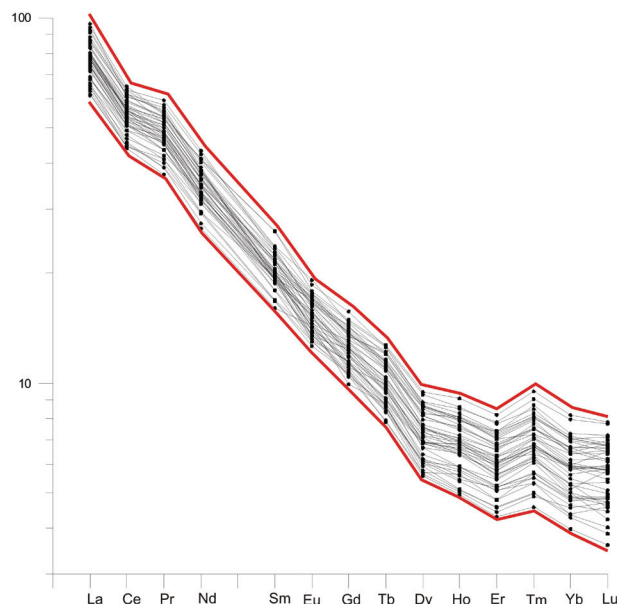
cititas, al igual que los elementos compatibles (V, Sc, Co, Zn, Cu, Cr y Ni) cuyos contenidos son también más altos en andesitas. Por el contrario, tanto los elementos incompatibles del grupo *LFSE* (Rb, Cs, Ba y Sr) como los *HFSE* (Zr, Hf, Th, U, Y, Nb, Ta y Pb) presentan mayores contenidos en las rocas más ácidas. La abundancia de las *LREE* (La a Sm) es similar en andesitas y dacitas. Las *MREE* (Eu a Tb) y las *HREE* (Dy a Lu) tienden a ser menos abundantes en las dacitas.



■ Figura 3. Diagrama Le Maitre et ál. (1989) de SiO_2 frente a K_2O con muestras de CVNH.

Los patrones de las *REE*, normalizados al condrito (Nakamura, 1984), muestran alto enriquecimiento de *LREE* respecto a *HREE*, sin anomalías importantes (figura 4). Las andesitas ss tienen enriquecimiento menor en las *LREE* (La_N promedio = 69) que las dacitas (La_N promedio = 80). Los valores de enriquecimiento de las *MREE* son bastante similares (Sm_N promedio en andesita = 21; Sm_N promedio en dacita = 19), mientras en las *HREE* se invierte la relación (Dy_N promedio en andesita = 8; Dy_N promedio en dacita = 6).

Los diagramas multielementales, normalizados al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989), presentan pautas paralelas entre sí con picos y depresiones bastante pronunciados, con enriquecimientos en los *LILE*, *HFSE* y *LREE* por encima de un orden de magnitud (> 10) respecto al manto primitivo, mientras que el enriquecimiento en las



■ Figura 4. Diagrama de *REE* del CVNH, normalizados al condrito de Nakamura (1984).

MREE, HREE, Y y Ti muestra una tendencia decreciente de 10 a 1 (figura 5). Destaca la anomalía negativa de Nb-Ta ($Nb/Nb^* < 0,3$) y positiva de Pb (Pb/Pb^* entre 1,6 y 18,1). Existen algunas anomalías positivas menores en Zr-Hf, Sr, La y Tb y depresiones menores en Ce, Pr, Sm y Ti-Dy.

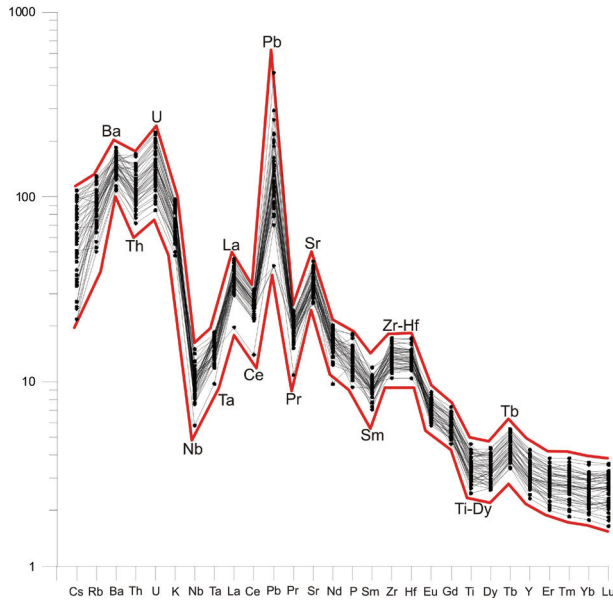


Figura 5. Diagrama de elementos incompatibles, normalizados al manto primitivo de Sun & McDonough (1989).

Las rocas del CVNH presentan características típicas de rocas adakíticas: bajos contenidos de Y (10 a 19 ppm), bajos contenidos de las HREE (Yb 0,9 a 1,8 ppm), altas concentraciones de Sr (560 a 944 ppm), enriquecimiento en los LILE y las LREE y altos valores de Sr/Y (30 a 80) y La/Yb (13 a 32). En diagramas específicos de clasificación (por ejemplo, Y vs Sr/Y e Yb_N vs La/Yb_N), la mayoría se proyectan en campo de adakitas o en franja de superposición adakita-calcoalcalina, y pocas se sitúan en el campo de la serie calcoalcalina normal (figura 6). Esta tendencia adakítica es más notoria en las lavas más recientes, que suelen tener composiciones más dacíticas.

En general, la composición isotópica Sr-Nd es homogénea, con valores $^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7041-0,7042$ y $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,51279-0,51283$, y similar a la de otros volcanes de la ZVN, específicamente de Ecua-

dor ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7040-0,704543$ y $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,512617-0,51295$; Bourdon et ál., 2002, Samaniego et ál., 2005 y Bryant et ál., 2006) y de Colombia ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,704090-0,704770$ y $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,512728-0,512975$; James & Murcia, 1984 y Marín-Cerón, 2007).

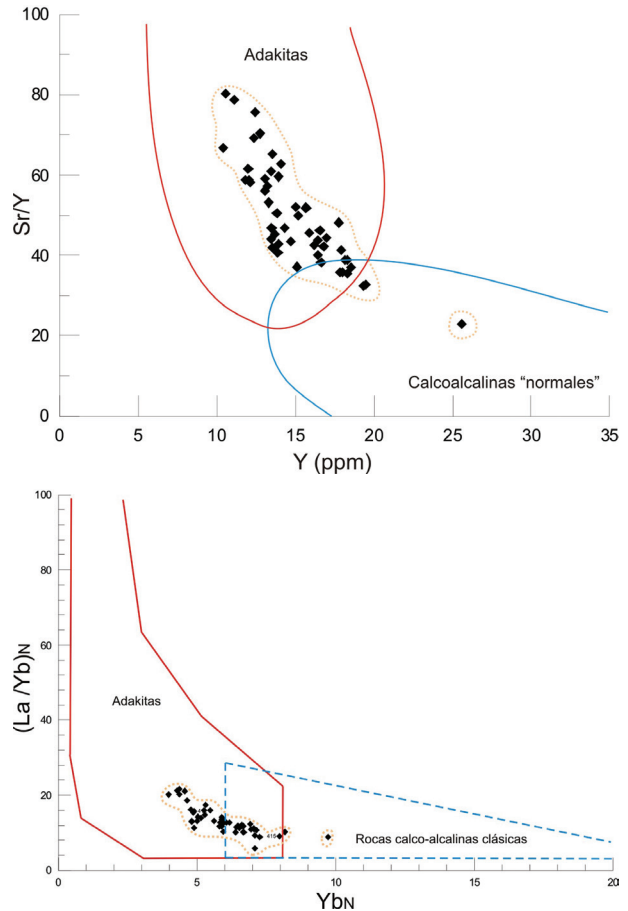


Figura 6. Dos de los diagramas de discriminación entre adakitas y calcoalcalinas típicas: Y frente a Sr/Y (modificado de Defant & Drummond, 1990) y Yb_N frente a $(La/Yb)_N$.

Fuente: Adaptado de Martin, 1999.

Discusión de resultados

Las rocas del CVNH tienen características petrológicas y geoquímicas similares a las andesitas y dacitas orogénicas de zonas de subducción en margen continental activo, descritas por diversos autores, en diferentes volcanes del mundo, principalmente en los Andes del norte. Los patrones de REE tienen rasgos típicos de andesitas de serie calcoalcalina con medio a alto K, de margen continental activa:

marcado fraccionamiento, ausencia de anomalías de Eu, inflexión negativa en Ce y pendiente cóncava en Dy-Er (Bailey, 1981 & Gill, 1982).

El patrón de enriquecimiento de elementos trazas, normalizados al manto primitivo, de las rocas del CVNH es diferente a los patrones de *N-MORB* y de *EPR* (East Pacific Rise). Por el contrario, es similar a los patrones de corteza continental inferior promedio y corteza continental superior promedio. Puede decirse que el CVNH presenta algunos rasgos corticales típicos: mayor enriquecimiento en elementos incompatibles, respecto a material mantélico, hasta dos órdenes de magnitud para los más incompatibles y mayor de 2 para *HREE*, Y y Ti; mar-

cada anomalía negativa en Nb (típica de magmas de margen convergente); notoria anomalía positiva en Pb y anomalías menores en Ti y Hf (Kelemen et ál., 2003). También existen marcadas similitudes con los patrones de elementos incompatibles de andesita primitiva, de arco continental, promedio y andesita “tipo andino” de Bailey (1981). Igualmente hay semejanzas con patrones de andesitas y dacitas promedio del Complejo Volcánico Galeras (CVG), Volcán Nevado del Ruiz (VNR), y con patrones de andesita y dacita promedio de Ecuador. Además, el patrón de adakita cenozoica promedio se ajusta casi perfectamente al rango de variación de patrones del CVNH (figura 7).

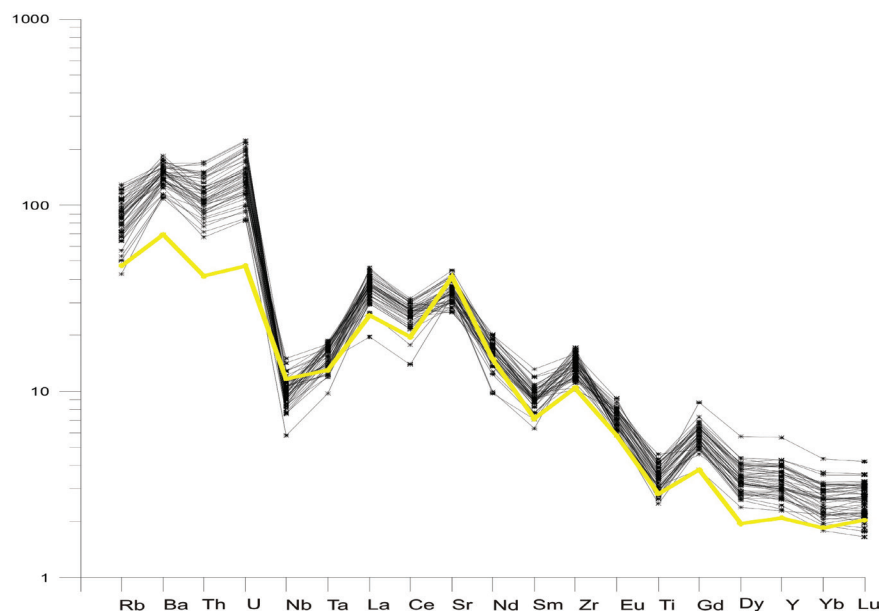


Figura 7. Patrón de elementos traza de adakita cenozoica típica (en amarillo) comparada con patrones de muestras del CVNH.

Las pautas de elementos incompatibles de las andesitas menos diferenciadas del CVNH muestran alto enriquecimiento de Sr, K, Rb, Ba, Th con respecto al *MORB*, lo que según Pearce (1983) reflejaría la posible participación de componente de zona de subducción en la petrogénesis (figura 8). El menor enriquecimiento en Ta, Nb, Ce y P, y el ligero o casi nulo enriquecimiento en Zr, Hf, Sm, Ti,

Y e Yb, respecto al *MORB*, es causado quizás por cristalización fraccionada y posible participación del manto superior, enriquecido. Además, el enriquecimiento en Th y Nb de estas andesitas menos diferenciadas indicaría una posible fuente mantélica enriquecida en Th y Nb. El enriquecimiento notable en Th quizás sea causado por componentes provenientes de la zona de subducción.

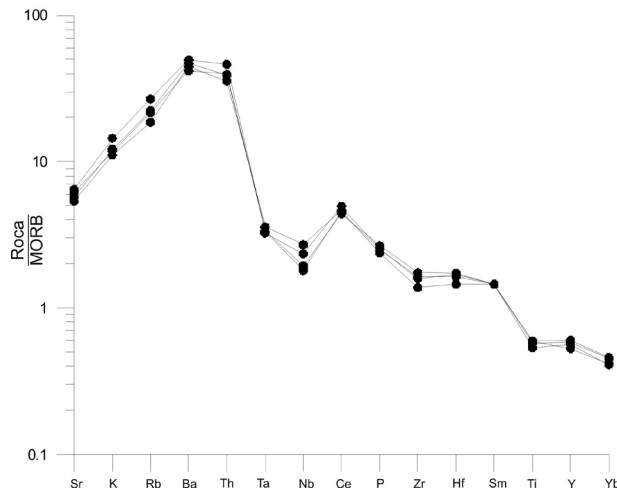


Figura 8. Andesitas menos diferenciadas del CVNH normalizadas al MORB.

Fuente: Pearce, 1983).

En el diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, las muestras representativas de CVNH, CVG y VNR caen dentro del campo de la ZVN. Al comparar con materiales de origen mantélico (MORB y OIB de East Pacific Rise, Galápagos Spreading Centre y hotspot de islas Galápagos) es evidente que las muestras de CVNH se encuentran dentro de la tendencia de los tipos mantélicos (*mantle array*), con valores bajos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y relativamente altos de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, indicando que posiblemente el magma se generó por fusión parcial de fuente mantélica con poca participación cortical (figura 9). Además, las relaciones isotópicas tan homogéneas revelan que la evolución magmática tampoco fue afectada significativamente por la participación de contaminantes derivados de la corteza continental.

Si en un diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, las muestras se proyectan siguiendo trayectorias que cortan y atraviesan verticalmente la franja de composición mantélica (*mantle array*), de forma un tanto dispersa y hacia la derecha. Esto muestra la presencia de contaminante cortical en la petrogenesis (James & Murcia, 1984). En el CVNH no se da esta tendencia, lo que confirma la nula o mínima participación de contaminación cortical.

Como las rocas del CVNH presentan tendencia adakítica, la comparación con la signatura isotópica de la adakita típica podrían proporcionar información

sobre su petrogenesis. Normalmente, las adakitas tienen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ bajas, similares a los MORB, lo que indica generación directa de magmas a partir de la placa oceánica subducida y ausencia de un componente sedimentario en su petrogenesis, aunque existen también adakitas con $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ligeramente mayor que los MORB. Esto reflejaría cierto grado de asimilación cortical. Efectivamente, en el diagrama Rb vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (figura 10) las rocas del CVNH están dentro o muy cerca del campo de las adakitas cenozoicas típicas, pero con $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ligeramente mayor que estas adakitas y más baja que las rocas de la ZVC de los Andes.

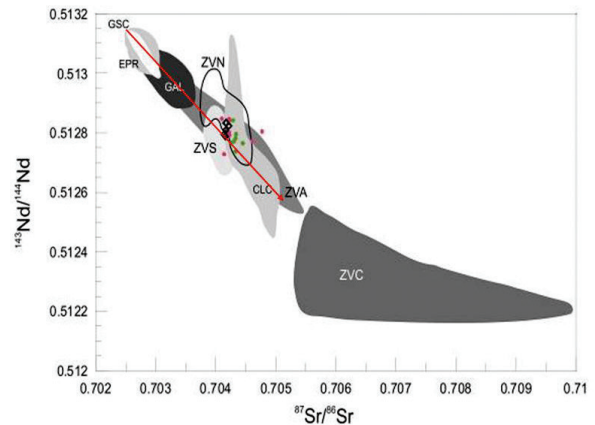


Figura 9. Diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ con muestras de CVNH (rombo negro), CVG (círculo rojo) y VNR (círculo verde) contrastadas con diversos campos delimitados por Samaniego et ál. (2005): Galápagos Spreading Centre (GSC), East Pacific Rise (EPR), Islas 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 roja: tendencia mantélica -mantle array).

Aunque la tendencia adakítica en el CVNH llevaría a considerar la génesis del magma por fusión parcial de corteza oceánica subducida, existen argumentos en contra de esta idea: las propias variaciones geoquímicas señaladas han denunciado un origen del magma por fusión parcial de cuña mantélica; la profundidad de zona de Beniof (140-200 km) es mayor que la profundidad necesaria para la “ventana adakita” (75-85 km); y no existe la correlación positiva entre Ba/Nb y Nb propia de magmas adakíticos.

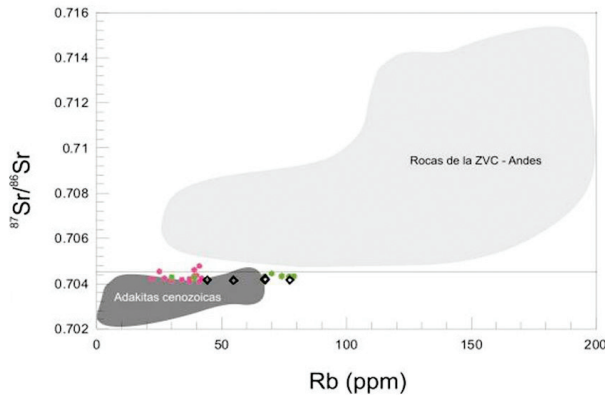


Figura 10. Variación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ según el contenido de Rb en CVNH (rombo negro), CVG (círculo rojo) y VNR (círculo verde).

Así mismo, las relaciones entre elementos traza compatibles e incompatibles en función de la variación desde términos menos diferenciados (andesitas) hasta más evolucionados (dacitas) muestran que el proceso petrogenético que controla la evolución magmática es la cristalización fraccionada. Aunque ciertos rasgos texturales y composicionales (por ejemplo, zonados complejos y dispersión o variación irregular en algunos elementos traza) reflejan la posible participación puntual de otros mecanismos como contaminación o mezcla de magmas.

Conclusiones

- El Complejo Volcánico Nevado del Huila (CVNH) está formado por andesitas y dacitas de afinidad calcoalcalina y contenido medio de K_2O . Se han identificado tres tipos litológicos principales: andesitas, andesitas dacíticas y dacitas.
- El comportamiento de los elementos mayores y de la traza es similar al de las andesitas y dacitas orogénicas de zonas de subducción en margen

Referencias

Alvarado, G., Acevedo, A., Monsalve, M., Espíndola, J., Gómez, D., Naranjo, J., Pulgarín, B., Raigosa, J., Sigarín, C. & Vanderlaat, R. (1999). Desarrollo de la vulcanología en Latinoamérica en el último cuarto del siglo XX. *Revista Geofísica*, 51, 186-241.

continental activo, descritas en otros volcanes del mundo, principalmente en los Andes del norte.

- Las lavas del CVNH presentan tendencia adakítica. Esta tendencia es más notoria en las lavas más recientes, que suelen tener composición más dacítica.
- Con base en los patrones de las REE y de elementos incompatibles y en las relaciones isotópicas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$), se puede concluir que los magmas que han alimentado al CVNH, se generaron por fusión parcial de la cuña mantélica, relativamente enriquecida por componentes derivados de placa subducente.
- El principal proceso petrogenético que ha controlado la evolución magmática es la cristalización fraccionada, sin descartar participación –en menor medida– de mecanismos como contaminación cortical y mezcla de magmas.

Agradecimientos

Agradecemos al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán de Ingeominas, a la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid y a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín. Agradecemos también al Centro de Microscopia Electrónica Luís Bru y al Centro de Geocronología y Geoquímica Isotópica, ambos de la Universidad Complutense de Madrid. Esta investigación fue apoyada, en parte, por el Programa de Becas del Ictex de Colombia y por el Programa de Becas Alban de la Unión Europea. Agradecemos también a todas las personas, colegas, familia y amigos por su invaluable apoyo a la investigación de varios años, que finalmente se ha convertido en ‘materia prima’ para este artículo. ■

Bailey, J. (1981). Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites. *Chemical Geology*, 32, 139-154.

Bourdon, E., Eissen, J. P., Monzier, M., Robin, C., Martin, H., Cotton, J. & Hall, M. (2002). Adakite-like lavas from Antisana volcano (Ecuador): Evidence

- for slab melt metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *Journal of Petrology*, 43(2), 199-217.
- Bryant, J., Yogodzinski, G., Hall, M., Lewicki, J. & Bayley, D. (2006). Geochemical constraints on the origin of volcanic rocks from the Andean Northern Volcanic Zone, Ecuador. *Journal of Petrology*, 47(6), 1147-1175.
- Cepeda, H., Méndez, R., Murcia, A. & Vergara, H. (1986). *Mapa preliminar de riesgos volcánicos potenciales del Nevado del Huila, escala 1:200.000*. Informe interno 1981. Popayán: Ingeominas.
- Correa, A. (2009). *Estudio petrológico, geoquímico y vulcanológico para establecer la evolución magmática del Complejo Volcánico del Huila, Colombia*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Correa, A. & Cepeda, H. (1995). *Informe preliminar sobre la geología del Complejo Volcánico Nevado del Huila*. Informe interno. Popayán: Ingeominas.
- Correa, A., Cepeda, H., Pulgarín, B. & Ancochea, E. (2000). El volcán Nevado del Huila (Colombia): rasgos generales y caracterización composicional. *Revista Geogaceta*, 27, 51-54.
- 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.
- Defant, M. & Drummond, M. (1990). Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662-665.
- Gill, J. (1982). *Orogenic andesites and plate tectonics*. Berlín: Springer-Verlag.
- Hall, M. & Wood, C. (1985). Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology*, 13, 203-207.
- James, D. & Murcia, L. (1984). Crustal contamination in northern Andean volcanics. *Journal of the Geological Society London*, 141, 823-830.
- Kelemen, P., Hanghoj, K. & Greene, A. (2003). 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*, pp. 593-569, vol. 3 The Crust. Oxford: Elsevier-Pergamon.
- Ingeominas (1994). *El sismo de Páez, Cauca -6 de junio de 1994-. Evaluación de emergencia*. Informe presentado al Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres de Colombia (SNPAD). Santafé de Bogotá.
- Le Maitre, R., 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 Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- 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*. Ph.D. Thesis. Okayama University.
- Martin, H. (1999). Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46, 411-429.
- Meissner, R., Fluh, E. & Muckelmann, R. (1980). *Sobre la estructura de los Andes septentrionales. Resultados de investigaciones geofísicas. Nuevos Resultados de la Investigación Geocientífica Alemana en Latinoamérica*. Bonn: Deutsche Forschungsgemeinschaft.
- Montes, N. & Sandoval, A. (1998). *Base de datos de fallas activas, recopilación bibliográfica*. Informe interno. Bogotá: Ingeominas.
- Nakamura, N. (1984). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, 757-775.
- Pearce, J. (1983). Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. En C. Hawkesworth & M. Norry (Ed.). *Continental basalts and mantle xenoliths*, pp. 230-249. Nantwich: Shiva Pub. Ltd.
- Pulgarín, B. (2000). *Depósitos masivos del Pleistoceno tardío, asociados al colapso del flanco sur del volcán Nevado del Huila (Colombia)*. Tesis de maestría. México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Samaniego, P., Martin, H., Monzier, M., Robin, C., Fornari, M., Eissen, J-P. & Cotten, 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(11), 2225-2252.
- Stübel, A. (1906). *Die vulkanberge von Colombia. 154 Seiten, 3 Tafeln Karten, 53 Bildern*. Dresden: Verlag von Wilhelm Baensch.
- 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*, 42, 313-345.