

Caracterización geoquímica básica de lavas de El Salvador (Centroamérica): principales tendencias registradas en el Frente Volcánico Costero

Introductory chemical characterization of lavas from El Salvador (Central America): main trends detected in the Coastal Volcanic Front

A. Hernández de la Cruz^{1,2}, D. Gimeno¹ y G. Gisbert¹

1. Dpt. Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona 08028 Barcelona. agushernandez@ub.edu, domingo.gimeno@ub.edu, ggisbertp@ub.edu
2. Instituto de Volcanología de la Universidad de El Salvador, Final 25 Avda. Norte s/n, San Salvador, El Salvador, C.A.

Resumen: Se ha llevado a cabo el estudio de una nueva serie de 176 muestras de lavas del volcanismo reciente de El Salvador, principalmente concentradas en la región central del país en el sector del estratovolcán de San Salvador (basáltico a andesítico)-caldera de Ilopango (dominantemente riolítica). El estudio incluye además también el volcán San Miguel (en tanto que ejemplo de estratovolcán de composición intermedia-básica en un estadio de evolución menos avanzado que el de San Salvador), la caldera de Coatepeque (en tanto que caldera en un estadio de evolución menos avanzado que el de la caldera de Ilopango) y el substrato volcánico relativo de todos estos materiales (cordillera de El Bálsamo, de composición predominantemente andesítica). Todo este conjunto es bien representativo de la geología de El Salvador, dominada por rocas volcánicas calcoalcalinas con afinidad de arco y rangos composicionales entre basalto y riolita, así como diferentes tendencias de evolución magmática (variable grado de alcalinidad) y composiciones básicas en los estratovolcanes más recientes.

Palabras clave: El Salvador, volcanismo calcoalcalino, volcán San Salvador, caldera de Ilopango, volcán San Miguel.

Abstract: We carried out the study of a new set of 176 samples from El Salvador recent volcanism, mainly focused in the central region of the country at the area San Salvador stratovolcano complex (basaltic to andesitic)-Ilopango caldera (mainly rhyolitic). The study also includes the San Miguel volcano (as an example of a stratovolcano basic to intermediate in composition and in a step of evolution previous to the San Salvador one), Coatepeque caldera (as an example of caldera less evolved than the Ilopango one) and their relative volcanic substratum (Balsamo range, mainly andesitic in composition). This set of samples is representative of the geology of El Salvador and show calc-alkaline rocks with arc affinity and a compositional range going from basalt to rhyolite, as well as several evolutionary trends (with variable degree in alkalinity) and dominant basic compositions in the youngest stratovolcanoes.

Key words: El Salvador, calc-alkaline volcanism, San Salvador volcano, Ilopango caldera, San Miguel volcano.

INTRODUCCIÓN

El frente costero pacífico de la costa centroamericana comprendida entre Guatemala y Panamá presenta una importante alineación de volcanes activos (usualmente denominado Frente Volcánico Costero, FVC), fruto de la subducción de la corteza oceánica de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe. Los límites extremos de esta alineación de unos 1000 kms de longitud coinciden a grosso modo con la interacción de las citadas placas con el límite de la placa Norteamericana (en el sector central de Guatemala) en la zona septentrional, y con la separación transformante dextra de las placas de Cocos y Nazca (en el sector sudoriental). Estos volcanes aparecen dispuestos paralelamente a la fosa de

subducción centroamericana a una distancia variable entre unos 160 y 200 km, y presentan en general las características geoquímicas propias de un volcanismo de afinidad calcoalcalina propio de arco colisional, con la particularidad de que en el tramo meridional (sur de Nicaragua y Costa Rica) presentan la superposición de las características geoquímicas propias de una signatura de tipo OIB, hecho que ha sido interpretado como el producto de la imposición de una traza de hot spot (Galápagos) en la corteza de Cocos en proceso de subducción, sobre las características propias de una zona de arco (Gazel et al. 2009 y referencias ahí incluidas).

En su conjunto, esta zona ha sido objeto de abundantes y sistemáticos estudios desarrollados a lo largo de los últimos 40 años principalmente por autores

de las escuelas norteamericanas universitarias de Rutgers y Michigan Technological (Carr, Rose y colaboradores), de manera que existe un notable cuerpo de datos geoquímicos disponible sobre la composición de estas rocas volcánicas (Carr 2011). Sin embargo, aunque ocupa una parte importante del tramo septentrional del FVC, el volcanismo de El Salvador ha sido aún poco estudiado, en especial si comparamos con el tramo meridional; en este hecho probablemente han influido aspectos estrictamente de interés petrológico y volcanológico (la citada superposición de signaturas geoquímicas de arco y de hot spot, la presencia en el sur de volcanes de gran actividad como El Arenal, etc.) como también tristemente de la convulsa situación social en el país, que incluyó en el pasado reciente una prolongada guerra civil. Por último, pero no en rango de importancia, la ausencia de la Geología como disciplina universitaria en El Salvador ha ocasionado que los estudios petrológicos en el país procedan de iniciativas en muchas ocasiones esporádicas o surgidas desde el exterior.

El trabajo que aquí se expone pretende en parte cubrir este hueco referido al conocimiento petrológico de los volcanes activos salvadoreños, y ha consistido hasta el momento en el muestreo sistemático de las diferentes unidades lávicas aflorantes en el área del complejo volcánico de San Salvador-caldera de Ilopango (Fig. 1), así como de numerosas unidades volcánicas representativas de otros estratovolcanes (San Miguel) y en el sector de la caldera de Coatepeque. Es decir, se ha priorizado el estudio de la faja volcánica actualmente activa, aunque también se ha muestreado su substrato volcánico relativo (materiales de la Cordillera del Bálsamo). En conjunto se han analizado hasta el momento 176 muestras de lavas, lo que constituye una base de datos totalmente nueva comparable volumétricamente (y espacialmente complementaria) a la disponible agrupando todos los datos válidos lávicos previos existentes en la bibliografía (Carr 2011, Agostini et al 2006). Se pretende obtener una buena representación de las manifestaciones volcánicas presentes en el país, para disponer de un mejor conocimiento del posible comportamiento de los volcanes activos en erupciones futuras y también para comprobar y matizar la validez de los modelos petrogenéticos desarrollados a escala regional. Igualmente se trata de una colaboración UB-UES que tiene como objetivo el formar un profesor de la UES para implantar a su regreso el germen de una escuela petrológica en el país.

ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS

El Salvador carece de una cartografía geológica realizada de manera sistemática comparable a la que conocemos en España. El conocimiento volcánico del país se comenzó a desarrollar a partir del trabajo de Williams y Meyer-Abich (1955), aunque los primeros

trabajos de caracterización geoquímica del estilo del que hemos afrontado comienzan con el estudio de Fairbrothers et al (1978) referido a El Boquerón en San Salvador. Refiriéndonos siempre a las lavas, los datos geoquímicos obtenidos posteriormente aparecen en su mayoría en estudios de ámbito más regional (recogidos en la base de datos de Carr, 2011) o bien de ámbito mucho más local relacionados con dos áreas extremas del país en la que existen campos geotérmicos en explotación (Ahuachapán en el oeste y Berlín en el este, Agostini et al 2006), que han sido justamente generadas a partir del interés industrial. En el caso de los productos piroclásticos es remarcable el volumen y calidad de datos obtenidos sobre el volcanismo diferenciado de la caldera de Ilopango por Kwasnitschka (2009). Existen también otros esbozos cartográficos y datos geoquímicos correspondientes a diferentes sectores volcánicos, algunos muy remotos (p.e. los realizados por la cooperación internacional Checa) y algún trabajo más específico como el referido a la erupción de Santa Ana de 2005.

Una vez analizada toda la información disponible hemos procedido a un muestreo concentrado sobre los cuerpos lávicos a partir de dos campañas estivales en 2010 y 2011. La primera ha recogido principalmente el estudio sistemático del sector comprendido entre el volcán de San Salvador y la caldera de Ilopango, de la manera más sistemática posible, teniendo en cuenta la falta de cartografía geológica detallada de referencia, el importante recubrimiento vegetal (y urbano, en el sector metropolitano de San Salvador) y las facilidades proporcionadas por la red de comunicación, la presencia de antiguas canteras y explotaciones, y el apoyo de la interpretación fotogeológica. Todas las muestras tomadas han sido cuidadosamente georeferenciadas y enclavadas en su contexto vulcanoestratigráfico preciso.

Las muestras han sido desecadas, serradas, trituradas y pulverizadas para su análisis petrográfico y geoquímico. Se ha procedido a realizar para cada muestra una lámina delgada y el análisis geoquímico en los servicios comunes de la UB (Centres Científics i Tecnològics). Se han analizado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (elementos mayoritarios: perla de tetraborato de Li, dilución 1:20, por triplicado en crisol y plato de Pt -original, réplica y perla de limpieza-, elementos en traza: discos de 6 gr de muestra aglomerados con resina Elvacite prensados sobre una base de ácido bórico; Na monitorizado en paralelo mediante espectrometría de absorción atómica. La determinación de los contenidos elementales ha sido realizada mediante una curva de regresión que incluye más de 60 estándares de roca de composición certificada internacionalmente (datos disponibles en la web de la UB). El contenido en volátiles de las muestras se ha determinado por calcinación sobre 1 gr de muestra (previamente deshidratada 12 h a 120 °C) en crisol cerámico, empleando un horno en ambiente

oxidante a 950 °C durante al menos dos horas. Hay que señalar que en estas condiciones en el caso de rocas básicas frescas que contienen valores elevados de Fe oxidable esta pérdida al fuego teórica puede ser en realidad una ganancia al fuego, por captura del O presente en el horno, lo que en términos prácticos tiene que considerarse como un control de calidad adicional de la muestra.

PRIMEROS RESULTADOS Y SU SIGNIFICADO PETROLÓGICO Y GEODINÁMICO

La primera revisión de datos químicos, y un reconocimiento somero del área en estudio permite reconocer el amplísimo predominio de las rocas de composición básica a intermedia, y un rango de composición que comprende desde basaltos subalcalinos a riolitas (Fig. 2), de carácter calcoalcalino y más minoritariamente calcoalcalino alto en potasio atendiendo al diagrama K₂O/SiO₂ (Peccerillo y Taylor 1974). Desde el punto de vista estructural, la ubicación de los edificios volcánicos ha sido puesta en relación con la existencia de una amplia banda de cizalla en dirección dextral (zona de falla de El Salvador) acompañado de cuencas de *pull-apart* (Corti et al., 2005). El principal rasgo definitorio del volcanismo de El Salvador es su carácter calcoalcalino, propio de un arco colisional poco afectado por interacción con la corteza y no influido por la superposición de otras señales geoquímicas o isotópicas que las propias de la transferencia de volátiles desde la placa en subducción a la cuña mantélica superpuesta. Desde el punto de vista volcanoestratigráfico, la parte más antigua del basamento volcánico de El Salvador ha sido analizada en diferentes unidades de la Cordillera de El Bálsamo, cuya edad podría llegar a ser en algunos sectores tan moderna como Pleistocena (Agostini et al., 2006). Desde el punto de vista composicional cabe destacar que esta unidad que es comúnmente referida como básica presenta términos desde andesita basáltica hasta dacitas, y que contrariamente a su apariencia (muchos de los cuerpos epiclásticos, por ejemplo, se muestran intensamente oxidados en campaña) el grado de alteración de las muestras escogidas es escaso y en absoluto comparable al de las procedentes de muestras de sondeos geotérmicos alterados hidrotermalmente (véase Agostini et al 2006). En resumen esta parte de substrato relativo del Frente Volcánico Costero en El Salvador presenta buenas condiciones de preservación y una mayor variabilidad composicional que la esperada, motivo que puede justificar un estudio más detallado en el futuro. Entre ese estudio futuro cabe resaltar como muy necesario el geocronológico; se estima que el magmatismo propio de arco generado por consunción de placa oceánica en zona de subducción se mantiene en todo este sector de Centroamérica desde inicios del Mioceno.

El resto del país está constituido esencialmente por volcanismo activo (actividad en los últimos 200.000

años, más de 15 volcanes activos en la actualidad) de afinidad calcoalcalina con un rango composicional amplio (desde basaltos a riolitas), y predominio de los términos básicos e intermedios, y las rocas epiclásticas asociadas. El principal foco de nuestra atención, el complejo volcánico de San Salvador muestra unas características químicas y un rango composicional semejantes a los detectados en la Cordillera del Bálsamo, si bien se destaca la presencia de términos basálticos y de andesita basáltica más frecuentes que los andesíticos. Hay que recordar al analizar estos datos que el rasgo volcánico distintivo del complejo de San Salvador es una prolongada historia eruptiva, aspecto que parece diferenciarlo de otros estratovolcanes del país. A este respecto es significativa la comparación con el volcán de San Miguel (aparentemente de historia mucho más corta), que habiendo sido muestreado con bastante detalle muestra composiciones concentradas principalmente en el campo de los basaltos subalcalinos y las andesitas basálticas más próximas a éstos (datos coherentes con los de Chesner et al 2004). La caldera de Ilopango, que es de manera muy evidente predominantemente diferenciada, muestra también una amplia variabilidad composicional que va de riolítica (los domos muestreados aquí) a los términos más básicos. A destacar que los productos piroclásticos se concentran composicionalmente en el campo dacítico (Kwasnitschka 2009), justamente el peor representado en nuestros datos de lavas, y que se incluyen en este grupo algunos cuerpos básicos correspondientes a diques y aparatos monogénicos basálticos aflorantes en el interior de la caldera pero manifiestamente posteriores a la actividad explosiva de ésta, y por tanto muy recientes (<1600 años). Otro aspecto resaltable, ya detectado a escala regional en los trabajos de Carr (2011 y referencias ahí) es que este conjunto de materiales (entre los que hay que incluir los del domo de San Jacinto, limítrofes a la caldera) presentan una línea de evolución diferente (menos alcalina) que el resto de los analizados.

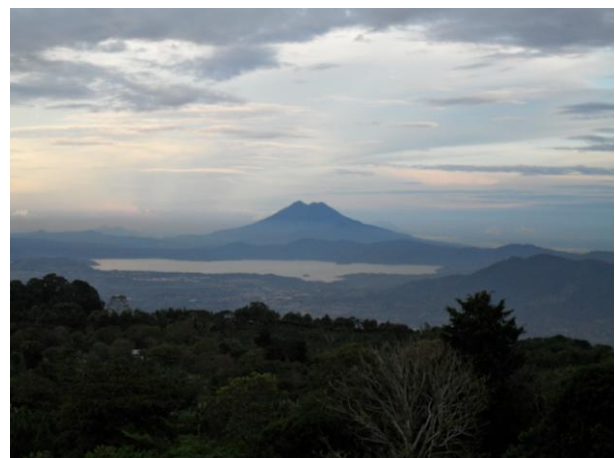


FIGURA 1. Caldera y lago de Ilopango y estratovolcán de San Vicente desde la cumbre del volcán de San Salvador.

Finalmente, los materiales diferenciados de la caldera de Coatepeque son de los más ricos en alcalinos presentes en la colección de análisis (calcoalcalinos altos en K), y sus composiciones abarcan desde las coladas lávicas básicas ampliamente representadas en el perfil interno de la caldera hasta los cuerpos dómicos riolíticos y en algún caso totalmente obsidiánicos intracaldéricos. Aunque los datos disponibles son representativos, esta zona merece mayor atención y un muestreo más detallado. Falta una representación de los productos dacíticos que probablemente hay que buscar en las ignimbritas asociadas a la caldera.

AGRADECIMIENTOS

Entes financiadores: 1) Universitat de Barcelona (Cooperació Internacional UB, convocatorias 2010 y 2011); 2) por la Universidad de El Salvador. A.H.D.C ha disfrutado de una beca predoctoral MAEC-AECID.

REFERENCIAS

- Agostini, S., Corti, G., Doglioni, C., Carminati, E., Innocenti, F., Tonarini, S., Manetti, P., Di Vincenzo, G., y Montanari, D. (2006): Tectonic and magmatic evolution of the active volcanic front in El Salvador: insight into the Berlín and Ahuachapán geothermal areas. *Geothermics*, 35: 368-408.
- Carr, M.J. (Ed) (2011): *CAGeochem. A geochemical database of Central American Volcanoes*. <http://www.rci.rutgers.edu/~carr/>.
- Corti, G., Carminati, E., Mazzarini, F. y García, O.M. (2005): Active strike-slip faulting in El Salvador, Central America. *Geology*, 33, 12: 989-992.
- Chesner, C.A., Pullinger, C.R. y Escobar, C.D. (2004): Physical and chemical evolution of San Miguel volcano, El Salvador. En: *Natural hazards in El Salvador* (W.I. Rose, J.J. Bommer, D.L. López, M.J. Carr y J.J. Major eds.) Geological Society of America Special Paper 375, Boulder, Colorado, 213-223.
- Fairbrothers, G.E., Carr, M.J. y Mayfield, D.G. (1978): Temporal Magmatic Variation at Boqueron Volcano, El Salvador. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 67(1): 1-9.
- Gazel, E., Carr, M. J., Hoernle, K., Feigenson, M.D., Szymanski, D., Hauff, F. y van den Bogaard. P. (2009): Galapagos-OIB signature in southern Central America: Mantle refertilization by arc-hot spot interaction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10 (1): Q02S11, doi: 10.1029/2008GC002246.
- Kwasnitschka, T. (2009): *Volcanic and tectonic development of the Ilopango caldera, El Salvador: stratigraphic correlation and visualization of emplacement*. Diploma Thesis, Christian-Albrechts Univ. Kiel, 151 p.
- Peccerillo, A. y Taylor, S.R. (1976): Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area northern Turkey. *Contributions of Mineralogy and Petrology*, 58: 63-81.
- Rollinson, H., (1993): *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd. Singapore, 352 p.
- Williams, H. y Meyer-Abich, H. (1955): Volcanism in the Southern part of El Salvador. *University of California Publications in Geological Sciences*, 32 (1): 1-64, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California.

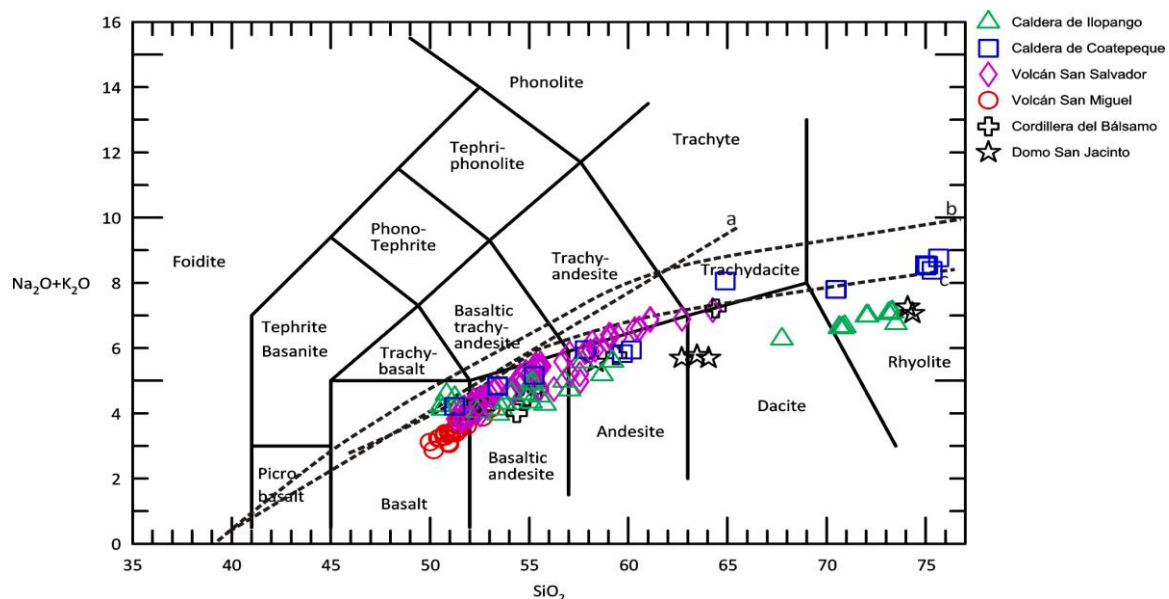


FIGURA 2. Diagrama de clasificación TAS de las rocas volcánicas estudiadas en este trabajo con líneas de separación entre series alcalinas y subalcalinas: a, MacDonal and Katsura (1964), b, Irvine and Baragar (1971) y c, Kumo (1966) (véase texto para explicación y Rollinson 1993 para referencias).