



EL MACIZO TRES CRUCES: UN COMPLEJO VOLCANICO LONGEVO Y POTENCIALMENTE ACTIVO EN LA ALTA CORDILLERA DE COPIAPO, CHILE

Gardeweg, M.C.¹, Clavero, J.¹, Mpodozis, C.¹, Pérez de A., C.¹, Villeneuve, M.²

INTRODUCCION

El Complejo Volcánico Cuaternario Macizo Tres Cruces (27°02'-07'S/68°47'W; CTC) se ubica en la Alta Cordillera de Copiapó, en el extremo sur de la zona volcánica activa de los Andes Centrales (CVZ), sector que se caracteriza por la ocurrencia de un gran volumen de rocas volcánicas del Mioceno Inferior al Cuaternario. En esta zona, las rocas volcánicas cuaternarias (ca. <1,8 Ma) ocurren, principalmente, dentro de una zona de 80 km de ancho máximo ubicada al interior del arco propiamente tal, entre los 68°50' y 68°00'W, formando cadenas o cordones discretos, comúnmente oblicuas a la dirección general, N-S de la CVZ (1), con excepción de la más occidental de ellas, la cadena NS del Macizo Tres Cruces.

Aunque el CTC muestra, en parte, rasgos juveniles, actualmente no muestra actividad, ni existen registros de actividad eruptiva histórica. Por otra parte, además de breves menciones por (2, 3, 1), no existen descripciones ni estudios previos de este complejo.

En el presente trabajo, se presentan los resultados preliminares sobre las características, evolución, geocronología y estilos eruptivos del Macizo Tres Cruces. Este se basa en resultados parciales de un programa de cartografía regional (escala 1:100.000) llevado a cabo entre los 26° y 28°S por el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN) en el marco del Proyecto Multinacional Andino (MAP), apoyado por un extensivo programa de dataciones radiométricas K-Ar (SERNAGEOMIN) y ³⁹Ar/⁴⁰Ar (Servicio Geológico de Canadá).

EL COMPLEJO TRES CRUCES

El Complejo Tres Cruces es el resultado de erupciones sucesivas de productos de composición dacítica, a lo largo de un amplio rango de tiempo, donde alternaron facies efusivas y explosivas. La acumulación de estos productos formó los fuertes relieves que lo caracterizan, rasgo al que contribuye la escasa erosión que caracteriza este desértico sector de los Andes. El CTC está formado por tres conos alineados NS, que constituyen una cadena de aproximadamente 10 km de largo y 5 km de ancho correspondiente al Macizo Tres Cruces propiamente tal y cuyas cumbres, sobre los 6.200 m (Fig. 1), definen la línea del horizonte sobre la depresión del Salar de Maricunga (4.000 m s.n.m.) ubicada al oeste. También forman parte del complejo una extensa lava domo derramada hacia el oeste, depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez (ignimbritas de pequeño volumen), importantes depósitos de caída de pómez, además de domos de flanco donde destacan el domo-torta El Indio y el pequeño domo La Espinilla asociado un cráter de explosión. Los tres conos principales están construidos sobre un cordón volcánico previo, de edad pliocena, del cual se observan reducidos afloramientos en el flanco SE, y NW y que, además, incluye los volcanes Rodrigo, Lemp y Cristi por el norte y Puntagudo por el sur, todos parcialmente cubiertos por los productos del Tres Cruces (Fig. 1). Fallas normales N-NW y EW-NE truncan y desplazan los cráteres y coladas del Macizo Tres Cruces. Sobre los 5.500 (predominantemente sobre los 5750 m) se encuentran pequeños glaciares relictos de no más de 1 km² de superficie en zonas deprimidas en los márgenes de coladas y circos glaciales. Se reconocen también algunos depósitos morrénicos, especialmente sobre los 4.400 m (Fig. 1).

La colada basal occidental

Corresponde a una potente colada domo (~150-200 m de espesor), ancha y larga (3,5 x 5,5 km), de sección rectangular, que forma una torta inclinada 7,5° en dirección NW (13% de pendiente), parcialmente cubierta por depósitos piroclásticos. No puede ser trazada hasta su fuente la que se encuentra cubierta por depósitos de flujos de detritos del flanco oeste del Macizo Tres Cruces (Fig. 1). Está constituida por lavas

¹ Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile.

² Geological Survey of Canada, 601 Booth Street, Ottawa, Ontario K1Y 1X1, Canada.

macizas con diaclasamiento columnar incipiente, bandeadas, frecuentemente vesiculares que petrográficamente corresponde a dacitas (SiO_2 : 67,7-69,1%) vítreas, de hornblenda y subordinadamente biotita, en la que se ha obtenido una edad K-Ar en biotita de $1,4 \pm 0,4$ Ma (Tabla 1).

El Macizo Tres Cruces

Está formado por tres conos irregulares, medianamente a bien preservados, cuyas elevaciones aumentan hacia el sur (Norte: 6.206 m; Centro: 6.629 m y Sur: 6748 m), junto con disminuir su grado de erosión (Fig.1). Corresponden a edificios pequeños, de 4-5 km de diámetro basal, pero de fuerte pendiente, que se elevan 800 a 1.600 m sobre su base. El edificio más septentrional está constituido por lavas truncadas y presenta un gran cráter de 1 km de diámetro, abierto hacia el oeste, ensanchado por la erosión glacial. El edificio central aparece ligeramente inclinado hacia el oeste, exhibe la pendiente más fuerte y presenta rasgos de inestabilidad. Está formado por coladas cortas (<2,5 km) y potentes en cuya cima se observa un cráter bien preservado, de 500 m de diámetro, truncado por una falla normal. El edificio meridional está constituido por dos conos coalescentes. El menor y más antiguo de estos se ubica al oeste y está también formado por coladas cortas y potentes, con dos pequeños (<250 m de diámetro) cráteres en la cumbre y un amplio escarpe abierto hacia el oeste de probable origen glacial (Fig. 1). Sus lavas corresponden a dacitas bandeadas de hornblenda y biotita (SiO_2 : 68%) en las que se ha obtenido una edad K-Ar en biotita de $0,8 \pm 0,5$ Ma (Tabla 1). El edificio más joven, sobrepuesto al anterior, incluye coladas basales cortas y potentes coronadas por un domo de cumbre de, aproximadamente, 2 km de diámetro, cuyo flanco SE está truncado por un circo glacial donde se hospeda un pequeño glaciar (Fig. 1). Gran parte de este edificio, con excepción del domo de cumbre, se encuentra cubierto por depósitos de pómez de caída asociados a las erupciones explosivas del complejo. El domo de cumbre está formado por dacitas (SiO_2 : 64,6%) de hornblenda y biotita, con evidencias de mezcla de magma. En ellas se obtuvo una edad $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de 28 ± 11 ka (Pleistoceno superior; Tabla 2), la más joven del complejo y la más joven obtenida para lavas de este sector de los Andes. Este resultado sugiere que el complejo Tres Cruces habría tenido actividad eruptiva más reciente que el Nevado Ojos del Salado, el único de este sector de los Andes catalogado como volcán activo (4) debido a la presencia de actividad fumarólica y para una de cuyas coladas más recientes se obtuvo una edad Ar-Ar de 100 ± 17 ka (Pleistoceno medio-superior; (5, 6).

Tabla 1. EDADES K-Ar DEL COMPLEJO MACIZO TRES CRUCES Y CENTROS VOLCANICOS ASOCIADOS.

No. Terreno	Unidad Estratigráfica	UTM Norte	UTM Este	Litología	Material analizado	Edad (Ma)	Error (2 σ)	Referencias
1659	Domo de flanco	7002700	516100	Dacita	Biotita	0,35	$\pm 0,04$	González <i>et al.</i> , 1985
GCO-53	Tres Cruces Sur	7002150	518150	Dacita de hb. y biot. vítreas, bandeada	Biotita	0,8	$\pm 0,5$	Este trabajo
CC-345	Ignimbrita Tres Cruces E, Pampa Blanca	7010850	528650	Pómez dacítica, de hb. y biot.	Biotita	< 1		Este trabajo
GCO-190	Domo de flanco E, temprano	6999900	528700	Dacita de ohb. y biot.	Biotita	1,3	$\pm 0,5$	Este trabajo
GCO-130	Lava-domo temprana, W	7007400	511800	Dacita de hb. y biot. vítreas, bandeada	Biotita	1,4	$\pm 0,4$	Este trabajo
GCO-57	Lavas basales, W	7004600	514000	Dacita de hb. y biot. Bandeada	Biotita	1,8	$\pm 0,5$	Este trabajo
GCO-55	Domo de flanco, temprano	7003400	516650	Dacita de hb. y biot.	Roca Total	2,1	$\pm 0,3$	Este trabajo
GCO-218	Lavas basales, E	7002370	525400	Dacita de hb. afanítica	Roca total	2,1	$\pm 0,3$	Este trabajo
GCO-59	Edificios precursores, NW	7009600	514500	Dacita de hb. y biot.	Biotita	2,5	$\pm 1,3$	Este trabajo
GCO-134	Edificios precursores, N	7010100	523100	Dacita de hb. y biot.	Roca total	2,8	$\pm 0,3$	Este trabajo

Tabla 2. EDADES $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ DEL COMPLEJO MACIZO TRES CRUCES Y CENTROS VOLCANICOS ASOCIADOS.

No. Terreno	Unidad Estratigráfica	UTM Norte	UTM Este	Litología	Material analizado	Edad (Ma)	Error (2 σ)	Referencias
GCO-217	Macizo Tres Cruces, lavas cono sur	7002800	523350	Dacita de hb. y biot.	Biotita	0,028	$\pm 0,011$	Este trabajo
GCO-135	Ignimbrita Tres Cruces E, Pampa Blanca	7009600	526800	Pómez dacítica, de hb. y biot.	Biotita	0,067	$\pm 0,009$	Este trabajo
GCO-52	Domo de flanco	7001750	518400	Dacita de hb. Y biot. Vitrea	Biotita	0,168	$\pm 0,006$	Este trabajo
GCO-141	Ignimbrita Tres Cruces W, Llano de Tres Cruces	7007800	509450	Pómez dacítica de hb. y biot.	Biotita	1,56	$\pm 0,15$	Este trabajo

Los Depósitos de Flujos Piroclásticos

En los flancos oeste y este del CTC se observan, al menos, dos depósitos de flujos piroclásticos discretos. Corresponden a depósitos de ceniza y pómez no soldados, de pequeño volumen, emitidos, probablemente, desde los aparatos centrales del Macizo Tres Cruces y cuya distribución está fuertemente controlada por la topografía pre-existente. Ambos se clasifican como ignimbritas de pequeño volumen (7). El depósito derramado hacia el oeste es de dimensión muy reducida y escaso espesor (<2 m). Sus afloramientos más proximales chocan y remontan unos pocos metros lavas del plioceno, ubicadas al oeste del complejo para luego ser encauzadas en dirección norte, hasta desembocar en el Llano Tres Cruces, donde el depósito piroclástico se expande en forma de abanico. La superficie de este depósito, tanto en afloramientos proximales como en el Llano Tres Cruces, muestra retrabajo glacial y aluvial, aunque en sus lóbulos frontales se preserva la concentración de grandes bloques pumíceos que caracteriza este tipo de depósitos. En él se obtuvo una edad $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ en biotita de $1,56 \pm 0,15$ Ma (Tabla 2), aproximadamente contemporánea con la colada basal occidental. Hacia el este, en Pampa Blanca, se encuentra un depósito de mayor volumen que rellena espectacularmente el paleovalle que separa los macizos Tres Cruces y Ojos del Salado. El depósito alcanza una potencia de 100 m con un depósito de oleada basal de aproximadamente 15 m de espesor; es macizo, no soldado y muestra compactación incipiente. No presenta estructuras internas pero sí concentración de grandes pómez en el techo. Está formado esencialmente por ceniza con proporciones variables de pómez blanca medianamente vesiculares, escasas pómez bandeadas y grises más densas y proporciones variables de líticos, comúnmente más frecuentes en los márgenes del depósito. En sus afloramientos septentrionales se obtuvo una edad radiométrica K-Ar de <1 Ma y una edad $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de 67 ± 9 ka. Las pómez blancas de ambos depósitos son petrográfica y químicamente similares y corresponden a dacitas de hornblenda y biotita con escaso ortopiroxeno (SiO_2 : 67,8-69%). En la falda este del CTC se observan, además, brechas de arrastre proximales, polimícticas, con abundantes fragmentos de lavas alteradas y algunos bloques con diaclasamiento prismático, inmersos en una matriz tobácea con pómez redondeadas.

Los depósitos piroclásticos de caída

Cubriendo gran parte del Macizo, en particular sus flancos sur y este y subyaciendo el depósito de flujo piroclástico en Pampa Blanca, se encuentra un potente depósito de caída piroclástico (Fig. 1) formado por fragmentos de pómez angulosos bien seleccionados cuyo tamaño disminuye hacia el E-SE. Este muestra una estratificación débil y alcanza un espesor superior a los 40 m e incluye bloques sobre 30 cm de diámetro y bombas densas, de eyección balística de hasta 25 cm. El depósito se extiende hacia el E y SE del CTC y cubre el cordón volcánico mioceno El Plateado (Fig. 1) y el flanco occidental del Nevado Ojos de Salado, incluyendo su complejo de cumbre. Aparece mejor preservado en las zonas deprimidas y/u horizontales a subhorizontales, mientras que en las zonas de ladera ha sido redistribuido mediante procesos de deslizamiento gravitacional. La composición de sus pómez es similar a las de los depósitos de flujos piroclásticos a los cuales subyace y de las cuales representa el depósito de una fase inicial pliniana asociada a una gran columna de erupción.

Los domos de flanco

Al igual que los productos del CTC, los domos ubicados en los flancos y base del CTC son de composición dacítica y sus correspondientes erupciones ocurrieron a lo largo de un amplio rango de tiempo. Tres de ellos se

encuentran en el flanco occidental del complejo, donde el más antiguo, notoriamente más erodado que el resto del CTC, ha sido datado en $2,1 \pm 0,3$ Ma (K-Ar en biotita, Tabla 1). Al sur de éste se encuentra el domo torta El Indio, caracterizado por su baja tasa de aspecto³ y abruptas paredes parcialmente cubiertas por depósitos de talud. Este domo es de sección alargada en dirección NW ($3,2 \times 1,8$ km), 235 m de espesor promedio, superficie rugosa, bien preservada y parcialmente cubierta por depósitos de pómez de caída. En él se ha reportado una edad K-Ar en biotita de 350 ± 40 ka (González *et al.*, 1985; Tabla 1). Entre el pie de domo El Indio y el Macizo Tres Cruces se encuentra el pequeño domo La Espinilla, generado en la fase terminal de un evento explosivo que dio origen a un pequeño cráter de explosión en cuya base está emplazado el domo. Este, de forma cóncava, sección basal subcircular de 200-250 m de diámetro y aproximadamente 45 m de altura, presenta rasgos superficiales muy bien conservados. En sus dacitas se ha obtenido una edad $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de 168 ± 6 ka. El cráter donde se encuentra emplazado es de aproximadamente 150 m de profundidad y $1,5 \times 2$ km de diámetro, alargado en dirección NE. En su pared se observan niveles de brechas, monomícticas y polimícticas, depósitos de pómez de caída y, en el borde, un depósito vulcaniano de bloques gruesos con diaclasamiento prismático. En el flanco oriental, al pie del cono meridional del Macizo, se encuentra el domo C^o Solo, un gran domo discreto de 4,5 km de diámetro y 1000 m de altura, cubierto tanto por depósitos de caída del Tres Cruces como por el depósito de flujo piroclástico de Pampa Blanca. En él se ha obtenido una datación radiométrica K-Ar en biotita de $1,3 \pm 0,5$ Ma (Tabla 1).

CONCLUSIONES

La construcción del Complejo Volcánico Macizo Tres Cruces se inició, al menos, hace 1,5 Ma, fecha a partir de la cual ocurrió actividad tanto efusiva como explosiva, la que habría continuado hasta hace aproximadamente 30 ka (Pleistoceno superior). El relativamente moderado volumen de este complejo (~ 200 km³) indica una tasa de emisión de ca. $0,13$ km³/ka, muy por debajo de los $0,7$ a 1 km³/ka estimados para otros volcanes de márgenes convergentes (Merapi, Indonesia (9); Taylor Creek Rhyolite, Nuevo México (10), Skaros y Kameni en Santorini (11)). Lo anterior sugiere que la historia del Complejo Tres Cruces estaría marcada por períodos eruptivos discretos separado por largos períodos de reposo.

La existencia de actividad hasta ca. 30 Ka y el período de reposo de aproximadamente 40 Ka que la separa del evento eruptivo previo (Ignimbrita de Pampa Blanca) permite postular que el Complejo Tres Cruces es un centro potencialmente activo, de alta peligrosidad, pero bajo riesgo. De alto peligro, porque, en caso de una erupción explosiva es alta la probabilidad de que un área extensa sea afectada por los productos explosivos; de bajo riesgo, porque la posibilidad de pérdida de vidas humanas es prácticamente nula, y muy baja la posibilidad de pérdidas en infraestructura, propiedades, capacidad productiva, etc. al estar ubicado en una zona remota y despoblada.

Los productos del CTC corresponden exclusivamente a dacitas (SiO_2 : 64,6-69%) calcoalcalinas de alto K (K_2O : 3-4,9%), con tendencia shoshonítica ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$) en la colada inicial y los domos de flanco El Indio y La Espinilla. Los contenidos de SiO_2 más bajos, asociados a una brusca caída del contenido de K_2O (3-3,8%), se observan en las rocas del domo más reciente y en pómez de la Ignimbrita Pampa Blanca, las que presentan evidencias de mezcla de magma.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó como parte de los programas de cartografía e investigación del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), en el marco del Proyecto Multinacional Andino (MAP). Publicación auspiciada y patrocinada por la Subdirección Nacional de Geología, SERNAGEOMIN.

REFERENCIAS

1. Gardeweg, M.; Clavero, J.; Mpodozis, C.; Villeneuve, M.; Pérez de Arce, C. 1999. Volcanismo Cuaternario en la Región Sur de los Andes Centrales (26° - 28° Lat. S): Geocronología K-Ar, $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ e implicancias regionales. In XV Congreso Geológico Argentino, Salta, Actas I, p. 96
2. González-Ferrán, O.; Baker, P.E.; Rex, D.C. 1985. Tectonic-volcanic discontinuity at latitude 27° south, Andean Range, associated with Nazca plate subduction. *Tectonophysics*, Vol. 112, p.423-441.

³ Tasa de aspecto: razón entre el espesor promedio y la extensión horizontal de un cuerpo de lava (V/H), donde H equivale al diámetro de un círculo de área equivalente a la superficie de la lava (in 7)

3. Mpodozis, C.; Kay, S.M.; Gardeweg, M.; Coira, B. 1996. Geología de la Región del Ojos del Salado (Andes Centrales, 27°S): Implicancias de la Migración hacia el Este del Frente Volcánico Cenozoico Superior. In Actas XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, V.III, p.539-548.
4. Casertano, L. 1963. Catalogue of the Active Volcanoes of the World, including Solfatara Fields. Part XV, Chilean Continent. International Association of Volcanology, 55 p.
5. Gardeweg, M.C.; Mpodozis, C.; Clavero, J. 1998. The Ojos del Salado Complex: the highest active volcano of the world. I.A.V.C.E.I., Cape Town, 1998. In Abstracts on Magmatic Diversity: Volcanoes and their roots, p. 21.
6. Gardeweg, M.C.; Mpodozis, C.; Clavero, J.; Cuitiño, L. 1997. Mapa Geológico de la Hoja Nevado Ojos del Salado, Región de Atacama. Escala 1:1.00.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. Versión Preliminar.
7. Wright, J.V.; Smth, A.L.; Self, S. 1980. A working terminology of pyroclastic deposits. J. Volcanol. Geother. Res., Vol. 8, p.315-336.
8. Cas, R.A.F.; Wright, J.V. 1987. Volcanic Successions. Modern and Ancient. Eds. Unwin Hyman Inc. 528 p.
9. Siswovidjoyo, S.; Suvo, I.; Yokohama, I. 1995. Magma eruption rates of Merapi volcano, Central Java, Indonesia, during one century (1890-1992). Bulletin of Volcanology V.57, p.111-116
10. Duffield, D.; Dalrymple, B. 1990. The Taylor Creek Rhyolite of New Mexico: a rapidly emplaced field of lava domes and flows. Bulletin of Volcanology V.52, p.475-487.
11. Druitt, T.; Edwards, L.; Mellors, R.; Pyle, D.; Sparks, S.; lanphere, M.; Davies, M.; Barreiro, B. 1999. Santorini Volcano. Geological Society, London, Memoirs 19, 165 p.

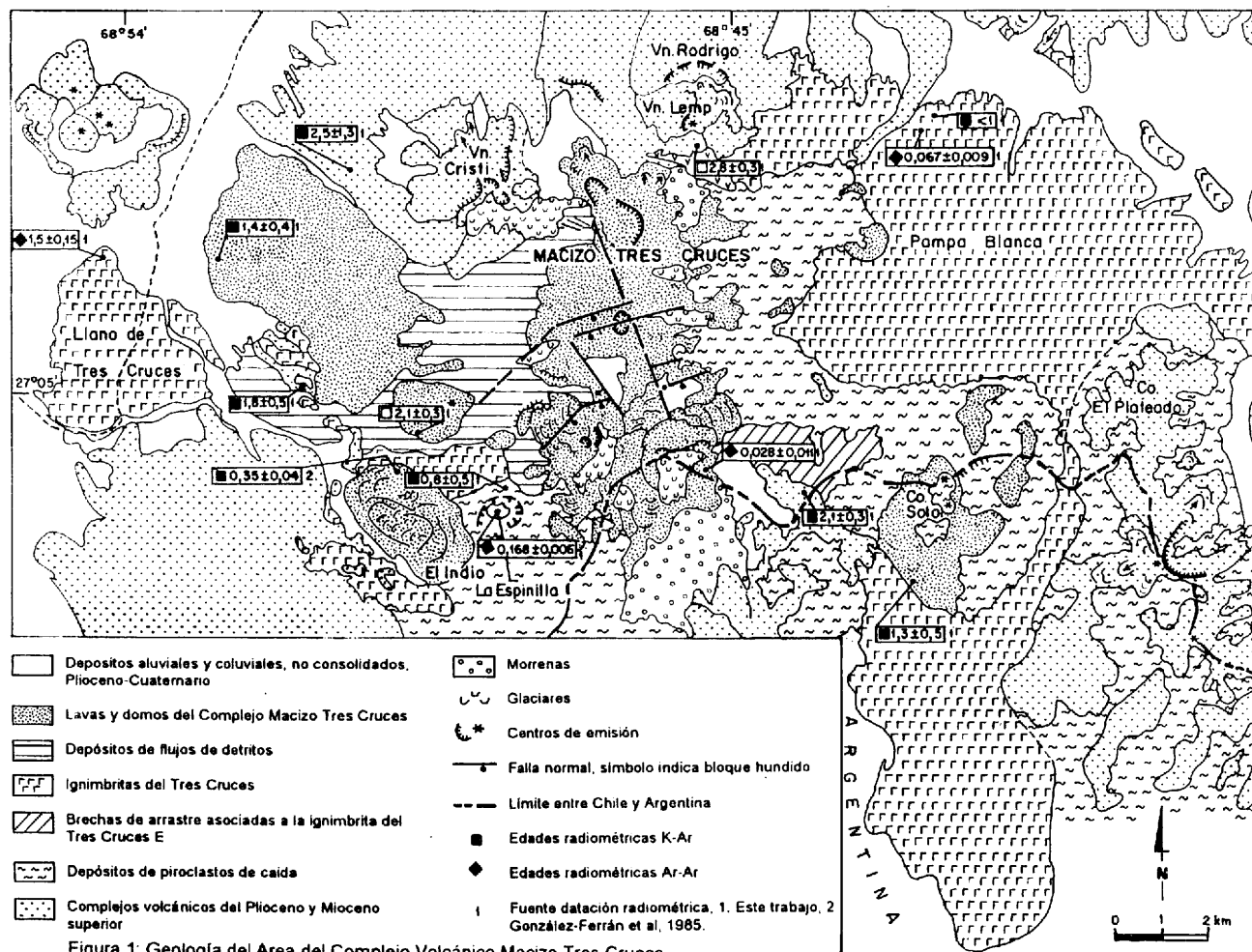


Figura 1: Geología del Área del Complejo Volcánico Macizo Tres Cruces