

## ASPECTOS TEFROLÓGICOS DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN QUIZAPÚ DE 1932 EN LA REGIÓN DE LA LAGUNA LLANCANELO, PAYENIA (MENDOZA, ARGENTINA)

*Elizabeth I. ROVERE*<sup>1,5</sup>, *Roberto A. VIOLANTE*<sup>2,5</sup>, *Elizabeth RODRIGUEZ*<sup>3,5</sup>, *Ana OSELLA*<sup>4</sup>  
y *Matías de la VEGA*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Servicio Geológico Minero Argentino – SEGEMAR, Dirección de Geología Regional. Av. Julio A. Roca 651, 10º Piso, Buenos Aires (C1067ABB), Argentina. draelizabethrovere@gmail.com

<sup>2</sup> Servicio de Hidrografía Naval, Departamento Oceanografía, Sección Geología Marina. Av. Montes de Oca 2124, Buenos Aires (C1270ABV), Argentina. violante@hidro.gov.ar

<sup>3</sup> Laboratorio Geológico LCV S.R.L. Av. Calchaquí km 23,5, Florencio Varela (1888), Buenos Aires, Argentina. rod\_eli@hotmail.com

<sup>4</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física, IFIBA/CONICET. Pabellón I, Ciudad Universitaria, Buenos Aires (1428), Argentina. osella@df.uba.ar, matias@df.uba.ar

<sup>5</sup> GEVAS RED Argentina - Grupo de Estudio de Volcanes, Ambiente y Salud. Asoc. Civil. gevasred@gmail.com

**Resumen:** El Volcán Quizapú es parte del Complejo Volcánico Cerro Azul-Descabezado Grande, ubicado en la Provincia de Talca, Chile (36,67°S - 70,77°O, altura máxima: 3788 m s.n.m.). La erupción del 10 de abril de 1932 fue uno de los mayores eventos volcánicos del siglo XX. Tuvo un carácter pliniano y arrojó un volumen de tefras entre 5 y 30 km<sup>3</sup> (según diferentes autores), que por efecto de los vientos dominantes del oeste cubrieron gran parte de la región central de Argentina, llegando a la costa atlántica y afectando a otros países del este de Sudamérica. Los efectos climáticos y el impacto en las regiones más proximales del sur de Mendoza, particularmente en el Departamento de Malargüe, fueron muy significativos. El estudio de los eyectos constituye un campo de exploración de gran valor no solamente para conocer las características, alcances y efectos de esa erupción sino también para evaluar aspectos relacionados con la tefrología. En esta contribución se analiza un depósito de tefras en los alrededores de la Laguna Llanquanelo, en las cercanías de Malargüe, una de las áreas más afectadas por la erupción. Las determinaciones sedimentológicas, mineralógicas y texturales (petrografía, microscopía electrónica y determinaciones químicas semicuantitativas con EDS) permitieron caracterizar la composición granulométrica, petrográfica y química semicuantitativa de las tefras. Estas características son afines a las de los materiales piroclásticos eyectados por la erupción del volcán Quizapú de 1932 estudiados por otros autores, por lo que se asignan a dicho evento volcánico. Las tefras depositadas en la zona de estudio son de tamaño arena muy fina a mediana con significativa cantidad de fracciones menores a 10 µm. Las trizas son pumíceas, fibrosas, con diferentes conformaciones morfológicas y abundante vesicularidad que favorece el entrapamiento de partículas menores en las vesículas de las mayores. La composición química revela un alto contenido de sílice que alcanza hasta cerca del 70% de los componentes, con alrededor de un 15% de Al y cantidades subordinadas de K, Na, Ca, Zn, Mg, Cu, Fe y Ti. Es notorio el alto contenido de K, asociado a un aumento relativo por desilicación de la tefra con el transcurso del tiempo. También son importantes los contenidos de Fe y Cu, en este último caso posiblemente asociado a transformaciones post-depositacionales por meteorización. La composición de las trizas señala una erupción de tipo pliniano magmática andesítico-

dacítica con contenido hidromagmático, intensa fragmentación y aglutinación durante el enfriamiento. Las evidencias de campo demostraron que la erupción afectó severamente la región sepultando y quemando suelos, carbonizando vegetación y cegando sectores marginales de la laguna. Estudios de esta naturaleza aportan a una clasificación sistemática y comparativa de la peligrosidad volcánica, considerando que las tefras resultantes de la erupción del Quizapú contienen hasta un 10% de partículas PM 10 (tamaño  $<10\ \mu\text{m}$ ) que corresponden a los tamaños “respirables” y en consecuencia altamente nocivos para la salud. Desde el enfoque socioeconómico, estos estudios sirven de base para su aplicación a otros eventos eruptivos muy recientes ocurridos en Argentina (volcanes Hudson, Copahue, Chaitén, Llaima, Peteroa y Puyehue-Cordón Caulle), y permiten elaborar metodologías específicas para analizar la peligrosidad de futuros eventos volcánicos.

**Palabras clave:** tefras, Volcán Quizapú, sedimentología, impacto volcánico, Laguna Llanquanelo.

### EXTENDED ABSTRACT

*Tephrology of the 1932 eruption of the Quizapú volcano in the region of Laguna Llanquanelo, Payenia (Mendoza, Argentina)*

Tephrology is a broad term that comprises all the aspects related to “tephra” studies (stratigraphy, chronology, petrology, sedimentology, chemistry, Froggat and Lowe, 1990; Lowe and Hunt, 2001) (Fig. 1). In Argentina, tephrological studies have significantly increased recently as a result of the increment in the Southern Andes volcanic activity affecting the country in the last two decades (E.g.: Corbella *et al.*, 1991a,b; Stern, 1991; Mazzoni and Destéfano, 1992; Nillni *et al.*, 1992; Gonzalez Ferrán, 1993; Naranjo *et al.*, 1993; Scasso *et al.*, 1994; Nillni and Bischene, 1995; Haberle and Lumley, 1998; Villarosa *et al.*, 2002; Kilian *et al.*, 2003; Naranjo and Stern, 2004; Orihashi *et al.*, 2004; Stern, 2004; Scasso and Carey, 2005; Daga *et al.*, 2008; Watt *et al.*, 2009; Martin *et al.*, 2009; Leonard *et al.*, 2009; Rovere *et al.*, 2009, 2011; Wilson *et al.*, 2009, 2012).

The eruption of Quizapú volcano (Volcanic Complex Azul-Descabezado Grande, Province of Talca, Chile,  $36,67^{\circ}\text{S}-70,77^{\circ}\text{W}$ , maximum height of 3788 m a.s.l.), that occurred on April 10, 1932, represented one of the largest eruptions worldwide in the 20<sup>th</sup> Century. It affected extensive regions of Argentina as well as many coastal areas of the Southwestern Atlantic Ocean as a result of the prevailing westerly winds, and specifically impacted dramatically in regions located nearby the source volcano (Department of Malargüe, Province of Mendoza, west-central Argentina, Fig.

2). The wide spreading of the resulting tephra and its easy reconnaissance in the field provides a great opportunity for detailed studies about the eruption and its products. Results on the eruptive aspects and tephra dispersion and deposition from this eruption were published by some authors (Lunkenheimer, 1932; Kittl, 1933; Walker, 1981, Hildreth and Drake, 1992, González Ferrán, 1993; Ruprecht and Bachmann, 2010; Ruprecht *et al.*, 2012). In this contribution the sedimentological, mineralogical and chemical characteristics of the tephra deposits occurring at the Llanquanelo Lake and surroundings, located 140 km east (downwind) of the Quizapú volcano, are studied based on grain-size, petrographic and electron microscope analysis (SEM) as well as semiquantitative chemical determinations by Energy Dispersive Spectrometer (EDS). The obtained results, when compared with the results of analyses performed by other authors in tephra from the 1932 eruption of the Quizapú volcano, allow attributing the studied tephra layer to this eruption. On these bases, diverse aspects related to the depositional and post-depositional aspects of the tephra are herein discussed, as well as some environmental changes produced by the eruption. On the other hand, this paper contributes to a systematic and comparative classification of volcanic hazard in health and society that serves as base-studies for better understanding other more recent Southern Andes eruptive events that affected Argentina (Hudson, Copahue, Chaitén, Llaima, Peteroa and Puyehue-Cordón Caulle volcanoes).

The eruption of Quizapú volcano in 1932 was one of the most important events among a long history of activity of this volcanic complex (Smithsonian

Institution, 2012). It had a plinian character and threw into the atmosphere enormous amounts of tephra varying between 5 and 30 km<sup>3</sup> according to different authors (Kittl, 1933; González Ferrán, 1993; Hildreth and Drake, 1992; Ruprecht and Bachmann, 2010), producing a dramatic impact in society, agriculture and local economies in the downwind neighboring affected regions (Abraham and Prieto, 1993; González Ferrán, 1993). The tephra deposits were very uniform in thickness with a notable decreasing grain-size tendency with distance from the source volcano, ranging from 6 cm in neighboring areas and reaching silt and clay sizes around 100 km east (Kittl, 1933; Hildreth and Drake, 1992).

The horizon of tephra was recognized as a regional level in a number of natural outcrops pits and excavations, as well as in sediment cores recovered from short drillings (Fig. 3). The tephra level was affected by compaction and post-depositional transformations after 80 years of burying and exposure to weathering and pedogenetic processes, although most of the original characteristics are very well preserved. The sedimentary sequence in which the tephra level is included was recognized regionally by surface and subsurface surveys based on geoelectrical methods and short drillings (Violante *et al.*, 2010; Osella *et al.*, 2010, 2011; de la Vega *et al.*, 2012). The sequence is composed of light brown sandy-silty sediments of lacustrine and eolian origin with high volcanoclastic content and interbedding of buried soils and evaporites (Rovere *et al.*, 2010a,b; D'Ambrosio *et al.*, 2011).

In some profiles (P19 and P42, Fig. 3) located in marginal areas east of the lake, the tephra layer overlies lacustrine deposits and is in turn covered by eolian deposits; this indicates that the lake borders were filled with tephra during the eruption and definitively desiccated, and were later covered by eolian deposits probably as a result of the aridity of the climate that followed the eruption. On the other hand, in the lacustrine plain west of the lake the tephra layer was not found; a possible explanation for this is either post-depositional erosive processes or not deposition, as some places could have been, at the moment of the eruption, part of the lacustrine body with higher water energy, and therefore the ash was dispersed without leaving any recognizable deposit. Northwest of the lake, the tephra deposit was found overlying a buried soil containing burned vegetation remains (profile P45, Fig. 3), suggesting

high temperatures of the ash fall with consequent burning of vegetation, as it was also documented in other regions of the world (Carson *et al.*, 1990; Seymour *et al.*, 1993). In the lacustrine coastal plain of the lake, tephra layers were found overlying eolian deposits (profiles P5, P21 and P26, Fig. 3).

Tephra's grain-size indicates varied sizes between very fine and medium sand. Sediments are poorly sorted and statistical grain-size distributions (Table 1, Fig. 4) are bimodal with two well-marked populations separated at the size-range of 3-3,5  $\phi$  (88-125  $\mu\text{m}$ ). Population 1 is coarser with mode between 1 and 2  $\phi$  (250 to 500  $\mu\text{m}$ ), whereas Population 2 is finer with mode between 4 and 7  $\phi$  (63 to 8  $\mu\text{m}$ ). This bimodal distribution is typical for distal tephra (Bonadonna and Houghton, 2005; Rose and Durant, 2009). The lower-sized population contains the "respirable particles" (PM10 <10  $\mu\text{m}$ , Horwell *et al.*, 2003, Horwell and Baxter, 2006).

Optical microscopy allowed obtaining the bulk mineralogical composition and details of the ash shards. Bulk composition is: 59% volcanic glass, 40% crystals (in decreasing order: plagioclases, magnetite, hornblende, pyroxenes, quartz, olivine and ilmenite) and 1% lithoclasts (possibly andesitic volcanic pastes). Glass is mainly composed of fibrous, pumiceous shards with vesicular microcavities, most of them tubular and elongated with minor amount of cusped, blocky and platy individuals (Figs. 5, 6 and 7). Besides, the minerals contain vesiculated glass adhered to the crystals.

SEM analyzes were aimed at observing details of the particle's shapes and surface characteristics. They are all of varied shapes ranging from equidimensional, elongated (prismatic) and irregular, from rounded to angular with sharp edges, with striations and different degrees of vesicularity (Figs. 6 and 7). Glass shards show a major composition of light brown glass (possibly sideromelano) although dark glass is also present, and they show some coating. Its vitreous textures were defined following the classification by Miwa *et al.* (2009), as massive with two types of surfaces, smooth-uniform (S-type) and not-smooth-irregular (NS-type) with alveoli and hollows (Fig. 7). The coating consists of highly cohesive small particles (<25  $\mu\text{m}$ , and hence they correspond to the "respirable" sizes) which can be partially adhered by some melting process to the larger particles.

EDS revealed predominance (in decreasing

order) of SiO<sub>2</sub> (up to ~70%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (up to ~15%), with lesser amounts of K, Na, Ca, Zn, Mg, Cu, Fe y Ti (Fig. 7, Table 2). The three last mentioned components are abundant as oxides included in the ash. K is an important component in accordance to the high K content of the Volcanic Complex Cerro Azul - Descabezado Grande - Quizapú (Backlund, 1923), which seems to have been proportionally increased in percentage by desilication of the tephra during transport (Aomine and Wada, 1962). On the other hand, high concentrations of Cu were found in some samples (Fig. 8, samples P5 III and P20 I in Table 2), what is preliminary associated to post-depositional alteration of tephtras by weathering and transformation in alofana and halloysite with incorporation of high Cu content.

The sedimentological and semi quantitative chemical characteristics of the studied tephtras from Quizapú eruption, together with the erupted volume of tephtras and the volcanic column height mentioned in the available bibliography, are compatible with an explosive plinian eruption (Walker, 1981; Newhall and Self, 1982; Simkin and Siebert, 1994; Bonadonna and Houghton, 2005; Rose and Durant, 2009; Carey *et al.*, 2009; Gislason *et al.*, 2011; Smithsonian Institution, 2012). This eruption seriously affected the southern Mendoza province where Llancañel lake is settled, producing a reduction of the lake size, the burying and burning of soils and the increasing in aridity of the region. These effects can be easily observed in the field according to the stratigraphic relations of the Quizapú Volcano tephtras level with the under- and overlying lacustrine, eolian and buried soils levels. The eruption caused the collapse of the local farming, agriculture and livestock economies as well as heavily impacted in society.

The obtained sedimentological, mineralogical, petrographical and chemical characteristics of the tephtras reveal fractioning processes during the eruptive and post-eruptive phases with deep post-eruptive changes in the particles concentrates, following the concepts by Rose and Durant (2009). Additional complications to the resulting tephtras deposits arise from aggregation processes, as it was documented in Chaitén Volcano tephtras erupted in 2008 (Watt *et al.*, 2009). Agglutination of particles also occurred, possibly as a result of primary salts formed by exsolution during the aerial transport and deposited as coatings on the particles surfaces, that later reacted in contact to atmospheric fluids

(Delmelle *et al.*, 1980, 2007, Gislason *et al.*, 2011); however, preservation of such coatings is unlikely due to post-depositional processes such as dissolution, weathering, alteration by phreatic activity, secondary recrystallization, etc. Particles surface features reveal two types of textures following the concepts by Miwa *et al.* (2009), which reveal eruptive characteristics, energy of the transport process, gases content and post-depositional processes.

SEM analysis show typical characteristics of an andesitic magmatic eruption or partially fluid with hydromagmatic components. Particles morphology and the thickness of vesicle's walls would preliminary indicate relative fluidity and medium viscosity, as well as the cooling velocity in the volcanic conduit. Smaller particles (finest fractions of Population 2) adhered and partially cemented to the larger particles would indicate pulverization during fragmentation (Wohletz and Krinsley, 1982). Particles containing high Cu proportions are thought to have been produced by transformation of volcanic glass in alofana and hydrated halloysite during weathering, what results in desilication and increasing Cu content (Fig. 8), although further studies are needed on this matter. On the other hand, the SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O relation (Fig. 9) arranges the samples in a graphic field close to that reported by other authors (Fierstein *et al.*, 1989; Hildreth and Drake, 1992; Ruprecht *et al.*, 2012), although with a slight decreasing in Si content that is associated to differential particles deposition according to the distance from the source volcano and desilication.

The reduction in the lake size evidenced by the regional geology and stratigraphic sequences (Violante *et al.*, 2010; de la Vega *et al.*, 2012) as well as the burning of vegetation underlying the Quizapú tephtras layer, agree with oral versions from aged inhabitants of the region, who mentioned the fallout of "hot" ash and the drying of large lacustrine areas during the months that followed the eruption (Ovando and Ramires, 2009). Both the reduction in the lake size as well as the capping of the tephtra layer by eolian deposits also demonstrate the aridity of the region that followed the eruption, as stated by Abraham and Prieto (1993).

The volumes of ejected fine tephtras of sizes smaller than 10 μm, and particularly those smaller than 4 μm, which are considered to affect human health as they can produce respiratory diseases -particularly if they have high silica content and

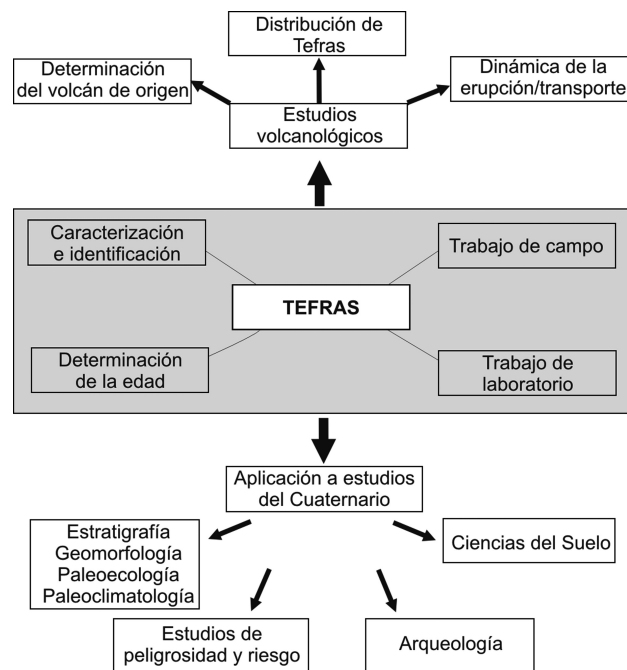
sharp-shaped (Horwell *et al.*, 2003)-, reveal the potential harmful of these materials. Grain-size distributions of Quizapú tephra show around 6% of particles  $<10 \mu\text{m}$ . If it is considered the  $150 \text{ ton km}^{-2}$  of tephra released by the eruption (according to the estimations by González Ferrán, 1993), hence about  $9 \text{ ton km}^{-2}$  of respirable particles could have been incorporated into the atmosphere, from which 35% ( $3.15 \text{ ton km}^{-2}$ ) is even lesser than  $4 \mu\text{m}$  in size. These numbers must be taken into account in order to evaluate health impact.

Studies of this kind contribute to develop methodologies in tephrological analysis to be applied to other recent eruptive events and for evaluating in a multidisciplinary way the volcanic hazard on environment and society.

**Keywords:** tephra, Quizapú volcano, sedimentology, volcanic impact, Llanquanelo Lake.

## INTRODUCCIÓN

La “tefrológica” (término incorporado al léxico geológico por Froggatt y Lowe, 1990) comprende todos los aspectos relacionados a los estudios de las tefras (estratigrafía, cronología, correlación, sedimentología, petrología y química, Fig. 1). Cuando se trata de un depósito de tefras de erupciones antiguas, cobra importancia su significado como marcador estratigráfico y horizonte de correlación geológica (Lowe y Hunt, 2001). Este concepto debe complementarse con el conocimiento de la historia geológica del volcán, el clima y los ecosistemas afectados por la erupción (paleoambientes en caso de erupciones antiguas). La investigación tefrológica debe encararse a través de estudios científicos multidisciplinarios que comprenden el análisis de diversos indicadores o *proxies*. En el caso de erupciones históricas y recientes cuyos productos pueden ser reconocidos a lo largo de grandes distancias (con escasa alteración post-depositacional), no sólo la interpretación de los procesos eruptivos y de dispersión es más completa en función de su preservación, sino que su estudio aporta al conocimiento de los impactos asociados que tuvieron lugar en el ecosistema. Este aspecto ha tomado relevancia en años recientes en respuesta a la sucesión de erupciones que afectaron diversas regiones del planeta, y cuyo impacto aportó a la problemática de la comprensión de los efectos



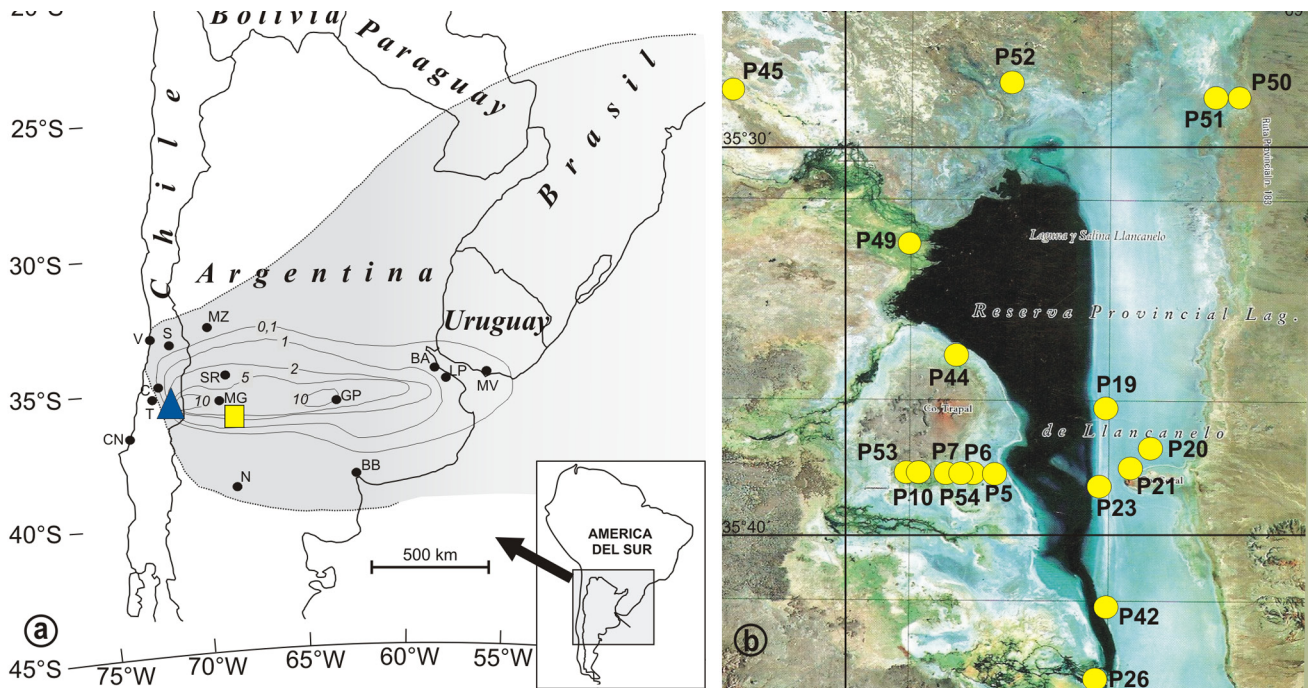
**Figura 1.** Aspectos significativos de los estudios tefrológicos (modificado de Lowe y Hunt, 2001).

**Figure 1.** Significant aspects of tephrological studies (modified after Lowe and Hunt, 2001).

nocivos en la fauna y flora, salud humana, impacto en la sociedad, aeronavegación y sistemas económicos.

Como resultado, se ha avanzado en los estudios de las cenizas volcánicas (término con el que se definen a las tefras de tamaño menor a  $2 \text{ mm}$ ) y particularmente en aquellas fracciones “respirables” ( $\text{PM}_{10}$ :  $<10 \mu\text{m}$ ). En Argentina, esta problemática fue percibida a partir de la erupción del volcán Hudson (1991); con la erupción del volcán Chaitén en 2008 se han incrementado los estudios relacionados a los impactos en la salud humana a través de los trabajos de Leonard *et al.* (2009), Martin *et al.* (2009), Watt *et al.* (2009), Wilson *et al.* (2009), entre otros, aplicando conceptos y metodologías elaboradas (entre otros) por Casadevall (1991), Horwell *et al.* (2003), Horwell y Baxter (2006), Bonadonna y Houghton (2005), Reich *et al.* (2009) y Rose y Durant (2009).

La reconstrucción histórica de la erupción del volcán Quizapú (Fig. 2) ocurrida entre el 10 de abril de 1932, ofrece un campo de estudio significativo en todos los aspectos que hacen a la tefrológica, desde las características eruptivas, la dispersión de las cenizas, el estudio de los aspectos sedimentológicos de los depósitos, hasta su impacto en el ambiente y la sociedad. Esta erupción fue una de las mayores registradas a nivel mundial en



**Figura 2.** Mapa regional y de ubicación del área de trabajo. a) Volcán Quizapú (triángulo oscuro) y área (sombreada en gris) cubierta por las tefras (modificado de Hildreth y Drake, 1992). El área de estudio está señalada por el rectángulo. Isopacas con espesores (en letra cursiva) están expresadas en cm. Nombres de localidades: BA: Buenos Aires; LP: La Plata; MV: Montevideo; BB: Bahía Blanca; GP: General Pico; N: Neuquén; MZ: Mendoza; SR: San Rafael; MG: Malargüe; S: Santiago de Chile; V: Valparaíso; C: Curicó; T: Talca; CN: Concepción. b) Detalle de la zona de trabajo (Laguna Llanquanelo) con indicación de los sitios (círculos) donde se han reconocido los perfiles conteniendo el nivel de tefras.

**Figure 2.** Regional map and location of the study area. a) Quizapú Volcano (dark triangle) and area (grey-shaded) covered by ashes (after Hildreth and Drake, 1992). Working area is indicated by a square. Isopachs with thickness (in italic) expressed in cm. Names of localities: BA: Buenos Aires; LP: La Plata; MV: Montevideo; BB: Bahía Blanca; GP: General Pico; N: Neuquén; MZ: Mendoza; SR: San Rafael; MG: Malargüe; S: Santiago de Chile; V: Valparaíso; C: Curicó; T: Talca; CN: Concepción. b) Detail of the working area (Llanquanelo Lake) indicating the sites (circles) where the profiles containing the Quizapú tefras were recognized and sampled.

el siglo XX (Smithsonian Institution, 2012), la cual afectó a gran parte del territorio argentino debido a su explosividad de tipo pliniano y el efecto de los vientos dominantes del oeste que incrementaron la dispersión de las tefras hacia el este, depositándose en las provincias de Río Negro, Neuquén, La Pampa y Buenos Aires y llegando aún al litoral del Atlántico, alcanzando las costas de Uruguay y Brasil (Kittl., 1933, Larsson, 1937; Imbellone y Camilión, 1988; Hildreth y Drake, 1992; Rovere *et al.*, 2006; entre otros). Según Kittl (1933) los procesos y efectos de la dispersión se reflejaron mucho tiempo después de finalizado el evento.

La presente contribución describe el nivel de tefras depositado en la región de la Laguna Llanquanelo (Departamento de Malargüe, Provincia de Mendoza) localizada unos 140 km al este del volcán, que resulta ser una de las áreas que sufrió los mayores impactos al encontrarse en la trayectoria que siguieron los

materiales piroclásticos impulsados por los vientos dominantes (Fig. 2). El nivel estudiado constituye un registro regional que en el área de la Laguna Llanquanelo se encuentra estratigráficamente intercalado en secuencias conformadas por sedimentos limo-arenosos castaños, de origen lacustre, palustre y eólico con alto contenido de volcanoclasticos e intercalaciones de suelos sepultados y evaporitas (Scarpa *et al.*, 2008; Rovere *et al.*, 2010a,b; Violante *et al.*, 2010; Osella *et al.*, 2010, 2011; D'Ambrosio *et al.*, 2011; de la Vega *et al.*, 2012). Se plantea como hipótesis de trabajo la asignación de ese nivel a la erupción del volcán Quizapú por diversos aspectos, los cuales serán comprobados particularmente por las características petrográficas, mineralógicas y granulométricas. Esos aspectos son los siguientes: a) posición estratigráfica: es un horizonte de tefras prácticamente puras situado a pocos centímetros de profundidad, por lo que al ser aquella erupción

la única paroxísmica del siglo XX en la región, los depósitos no podrían ser atribuidos a otro evento; b) amplia distribución regional y que se encuentra enterrado debajo de una cobertura sedimentaria de materiales eólicos y evaporíticos que corresponden a los ambientes de depositación reciente en la región; c) las características petrográficas, mineralógicas y granulométricas, las que tienen similitudes con las descritas por Kittl (1933), Walker (1981), Hildreth y Drake (1992) y Ruprecht y Bachmann (2010); d) los cambios ambientales y geomorfológicos evidenciados por las secuencias sedimentarias posteriores a la erupción del 1932, los cuales son muy marcados y comparables con los datos climáticos y ambientales registrados en los datos bibliográficos disponibles.

Por otra parte, el trabajo pretende aportar un nuevo enfoque al conocimiento de la dispersión de las partículas provenientes de volcanes andinos recientes y antiguos, para lo cual y a modo de introducción se presentan antecedentes de estudios realizados en otros ámbitos del país.

#### **ANTECEDENTES DE ESTUDIOS TEFROLÓGICOS EN ARGENTINA**

La presente contribución continúa con la línea de los estudios tefrológicos iniciados en la región andina argentino-chilena hace más de 50 años. Auer (1960) integró, a través de una interpretación paleoambiental, los procesos glaciales, climáticos y volcánicos en la Patagonia austral andina y extra-andina. La identificación de los centros volcánicos a través de análisis geoquímicos y geocronológicos de cenizas depositadas en lagunas, humedales y turberas de los Andes Australes ha sido llevada a cabo por numerosos autores, como Stern (1991, 2004), Haberle y Lumley (1998), Kilian *et al.* (2003), Naranjo y Stern (2004), Orihashi *et al.* (2004), entre otros, quienes realizaron reconstrucciones tectónicas, geológicas y tefro-cronológicas de los volcanes activos de la Zona Volcánica de los Andes del Sur. De los estudios en los lagos de la región del Nahuel Huapi, se destacan los trabajos de geocronología de Villarosa *et al.* (2002) en el lago Mascardi y Daga *et al.* (2008, 2010) en los lagos Moreno, Rincón e Ilón. González Ferrán (1993) analizó las fuentes potenciales de peligros naturales y ambientales en los volcanes de los Andes Meridionales. Estudios sedimentológicos, granulométricos y composicionales de piroclastos de volcanes recientes o históricos fueron destacados

en los trabajos de Nillni *et al.* (1992), Scasso *et al.* (1994) y Corbella *et al.* (1991a,b). Scasso y Carey (2005) realizaron un completo análisis morfológico de cenizas volcánicas del Hudson (erupción de 1991) y aplicaron técnicas de análisis cuantitativo y fractal (Maria y Carey, 2002) con microscopía electrónica de barrido. Corbella *et al.* (1991a,b) y Arias *et al.* (1992) efectuaron una evaluación analítica sobre los efectos de la erupción del volcán Hudson en la provincia de Santa Cruz y otros sectores de Patagonia. Numerosos estudios sobre la misma erupción (Mazzoni y Destéfano, 1992; Naranjo *et al.*, 1993; Nillni y Bischene, 1995; Naranjo y Stern, 1998; entre otros) indican los profundos impactos que las cenizas produjeron en la Patagonia Argentina. Bonadonna y Phillips (2003) realizaron modelos matemáticos de dispersión de cenizas de las plumas volcánicas más intensas del último siglo, incluyendo al volcán Quizapú, ensayos que fueron recientemente aplicados en riesgos para la aeronavegación.

En los últimos años se han iniciado proyectos de investigación sobre impactos de cenizas, inherentes principalmente a las erupciones más recientes de los volcanes Chaitén en el 2008 (Watt *et al.*, 2009, Rovere *et al.*, 2009, 2011; Leonard *et al.*, 2009; Martin *et al.*, 2009; Wilson *et al.*, 2009) y Puyehue-Cordón Caulle en el 2011 (Wilson *et al.*, 2012). Estas investigaciones se desarrollaron en ambientes que varían desde las áreas primarias de aporte hasta los sitios de depositación definitiva, bajo una visión regional e interdisciplinaria de la problemática, que incluye estudios de detalle de las trizas como su morfología, composición, alteraciones post-depositacionales y geoquímica, a fines de evaluar factores de riesgo en la salud, en el ambiente y en la aeronavegación, aspectos que han sido considerados en otros trabajos tales como Horwell *et al.* (2003), Horwell y Baxter (2006) y Rovere y Flores (2008).

#### **LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN QUIZAPÚ DE 1932**

La erupción del Volcán Quizapú (o Quitzapu) de abril de 1932 es una de las mayores registradas en el siglo XX. Ese volcán forma parte del Complejo Volcánico Descabezado, constituido por el Descabezado Chico, Descabezado Grande, Cerro Azul y Quizapú, más el cráter del Respiradero, ubicados en la Provincia de Talca en Chile (Fig. 2). Se localiza a los 35°37'S - 70°47'O con una altura máxima de 3788 m s.n.m. (Smithsonian Institution, 2012).

Diversos autores han realizado investigaciones relativas a aquella erupción. Sin embargo, debe destacarse que algunos trabajos se refieren a efusiones a partir de centros que no han sido definidos con precisión, particularmente en los estudios más antiguos, debido a la inaccesibilidad del área y a la carencia de sistemas de monitoreo aéreo (satelital) en aquellos tiempos. En función de esas incertidumbres, la red mundial de registros volcánicos (Smithsonian Institution, 2012) compiló los registros de efusiones de varios de esos cráteres bajo una misma base de datos. En este trabajo nos referimos especialmente a las erupciones del Quizapú que se iniciaron en abril de 1932 (incorporando eventualmente tefras provenientes del cráter del Respiradero de junio de 1932 mencionada por González Ferrán, 1995).

Una de las primeras investigaciones realizadas sobre esta erupción es la Kittl (1933), con observaciones llevadas a cabo tanto en regiones proximales como distales al volcán. Según ese autor el Complejo Volcánico Descabezado se originó en el “Cuaternario preglacial”, en la fase de “abovedamiento” manifestado a través del Basalto III (Groeber, 1929). Durante el Cuaternario interglacial continuó el desarrollo extrusivo con los Basaltos IV o Basaltos de Terraza (andesitas y traquiandesitas), en el Cuaternario postglacial (Basaltos V-VII) predominio de traquitas y “liparitas” o dacitas con abundante potasio según Backlund (1923), continuando su actividad hasta la actualidad. El Quizapú y el Cerro Azul son los volcanes más jóvenes del Complejo Volcánico Descabezado.

Desde 1846 ese Complejo ha sufrido una sucesión de erupciones (Smithsonian Institution, 2012), las cuales se han caracterizado por una explosividad moderada (VEI 2) que comenzó a ascender ligeramente a partir de 1912 para culminar en el evento de 1932 que alcanzó el valor de explosividad VEI 5. La erupción del cráter del Quizapú del 10 de abril de 1932 fue de carácter pliniano (Kittl, 1933; Walker, 1981; Hildreth y Drake, 1992; González Ferrán, 1993; Ruprecht y Bachmann, 2010) iniciándose con lava andesítica y finalizando con escoria basáltica, con un amplio rango de contenido de sílice (50 a 72%) aunque más del 95% de los eyectos fueron pumicitas dacíticas (67-68% de SiO<sub>2</sub>) con escasos líticos.

La fecha del origen de la apertura del cráter del Quizapú es incierta. Según Kittl (1933) en abril de 1932 tuvo lugar la explosión que le dio origen. En cambio, Hildreth y Drake (1992) consideran que

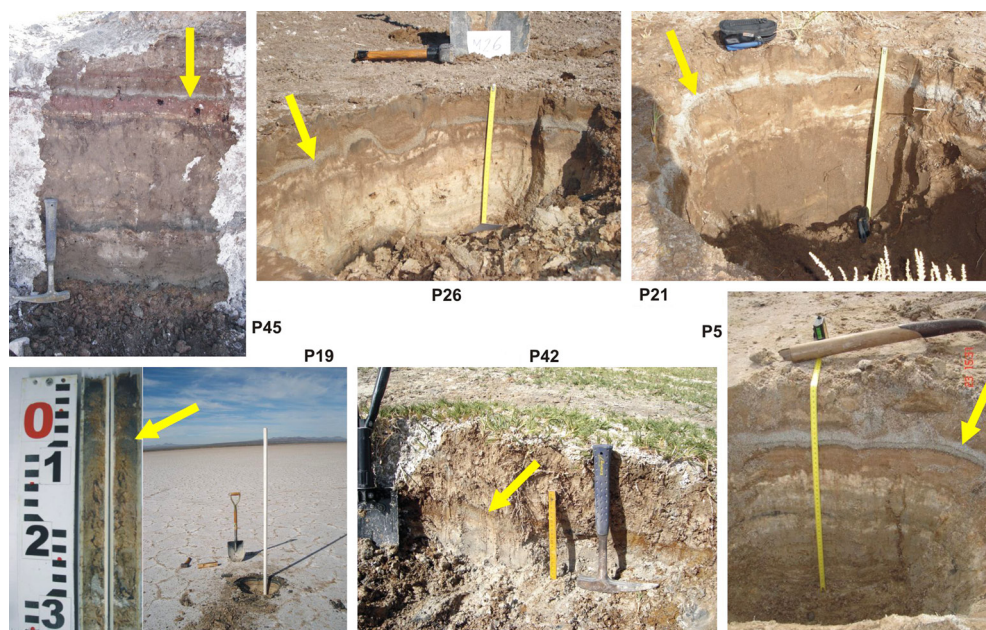
ese cráter se formó en 1846 a través de un conducto (*vent*) lateral en el flanco norte del estratocono basáltico-riodacítico del Cerro Azul, por la emisión de un flujo de lava de 5 km<sup>3</sup> de dacita hornblendífera con escasa tefra acompañante. Según estos últimos autores, entre 1907 y 1932 la actividad freática y estromboliana incrementó el diámetro y profundizó el cráter actual, a través de una erupción de 4 km<sup>3</sup> de magma dacítico “idéntico” al de 1846, que produjo el gran evento del 10 de abril de 1932. González Ferrán (1995) hace mención sobre el origen de un cráter de explosión del Descabezado Grande, ubicado en su flanco norte, denominado “Respiradero”, durante una erupción ocurrida en junio de 1932. Es probable que este evento haya pasado desapercibido o considerado como una leve reactivación del Quizapú, debido a su proximidad y a la gran magnitud de tefras caídas y removilizadas en los meses anteriores.

El volumen de tefra liberada durante la erupción de 1932 fue calculado por González Ferrán (1993) entre 25 y 30 km<sup>3</sup> estimando unas 150 ton km<sup>-2</sup>, aunque el Smithsonian Institution (2012) menciona 9,5 km<sup>3</sup>. Hildreth y Drake (1992) hacen referencia al total del volumen de lava eruptado entre las erupciones de 1846 y 1932 en 9 km<sup>3</sup> y el de tefras en 9,5 km<sup>3</sup>. Según Kilian *et al.* (2003) la erupción de 1932 fue una de las mayores ocurridas durante el Holoceno debido a la gran magnitud (18 km<sup>3</sup>) de tefras depositadas.

Wilcox (1959) consideró que la altura de la pluma del Quizapú alcanzó los 45.000 pies (aproximadamente 14 km) y fue arrastrada por fuertes vientos y depositada en una ancha franja a lo ancho de toda Sudamérica. Según Brüggén (1932) y Vogel (1932) (en Wilcox, 1959) las fuertes explosiones comenzaron al mediodía del 10 de abril alcanzando un climax hacia el final de la tarde. Larsson (1937) realizó un minucioso estudio de las partículas de cenizas y un mapeo de su distribución junto con cálculos de velocidades. En sus observaciones describe que “el frente de cenizas llegó a Buenos Aires a las 6:00 A.M. del 11 de abril, lo cual implica una velocidad del viento de alrededor de 40 millas por hora en dirección recta de oeste a este. Desde Buenos Aires el frente de cenizas giró y se desplazó lentamente hacia el noreste a lo largo de la costa Atlántica, alcanzando Rio de Janeiro (Brasil), ubicado a 1850 millas del volcán, poco antes del mediodía del 15 de abril”.

Por su parte, González-Ferrán (1993) consideró que la columna eruptiva alcanzó hasta 30 km de





**Figura 3.** Perfiles estudiados mediante calicatas (P5, P21, P26, P42 y P45) y muestreo con testigo (P19) que contienen el nivel de tefras de la erupción del Volcán Quizapú (indicado con una flecha). Para ubicación de los perfiles ver figura 1.  
**Figure 3.** Study sections in pits (P5, P21, P26, P42 and P45) and in a core obtained by sampling with a hand device (P19) which contain the level of tephra from the Quizapú Volcano (pointed with an arrow). For location see figure 1.

altura desarrollando un hongo de más de 50 km de diámetro, y se desplazó hacia el este-noreste a una velocidad entre 25 y 60 km h<sup>-1</sup>. El depósito de tefra formado en las primeras 18 hs posteriores al inicio de la erupción fue excepcionalmente uniforme (Hildreth y Drake, 1992), con una manifiesta dispersión en una secuencia granodecreciente con la distancia. Según Kittl (1933) cerca del volcán (hasta la altura del río Grande) cayeron piroclastos de hasta 6 cm de diámetro muy semejantes a la “piedra pómez”, conteniendo cristales; el espesor depositado alcanzó 45 cm. En regiones algo más alejadas (hasta la localidad de Malargüe) se acumularon 15 cm de tefras tamaño arena y gravilla de hasta 2 ó 3 mm de diámetro. Por su parte, al este de Malargüe cayeron tefras menores a 5 mm, alcanzando el tamaño limo y arcilla con espesores de algunos pocos centímetros; aproximadamente el 82% de los eyectos son de tamaño menor a 1 mm (Kittl, 1933). El mismo autor atribuye al fraccionamiento eólico la variación composicional y la pérdida de cristales, líticos y trizas máficas con la distancia. Kreutz y Jurek (1932) realizaron análisis composicionales de tefras a más de 800 km al este del Quizapú corroborando los hallazgos de Kittl. Según Hildreth y Drake (1992) el rango de composición magmática (extrusiva) es enormemente amplio (52-70% SiO<sub>2</sub>), y también señalan que la inflexión en la isopaca de 10 cm a 110 km al este del volcán (en las cercanías de Malargüe) indica que a partir de allí comienza una depositación lenta de ceniza pliniana.

Toda la región del sur de Mendoza fue severa-

mente afectada por la erupción. Abraham y Prieto (1993) efectuaron una recopilación de los efectos e impactos sociales, en la agricultura, la ganadería y las economías regionales, destacando la intensa desertificación en el sur de Mendoza como consecuencia de la erupción. González Ferrán (1993) menciona también el incremento de los aerosoles que indujeron a una disminución en la cantidad de energía solar irradiada a la tierra que duró unos dos años. Este fenómeno se manifestó en los registros climáticos de la Estación Meteorológica Malargüe a través de descensos en las temperaturas de la región en los años siguientes al evento (Abraham y Prieto, 1993).

## METODOLOGÍA

En el marco de las actividades de campo para el Proyecto MinCyT-ANPCyT-PICT 2006-1311, se realizaron relevamientos geológicos de superficie y subsuelo poco profundo mediante el reconocimiento de cortes del terreno en exposiciones naturales y artificiales de perfiles, en los bordes de la Laguna Llanccanelo así como en márgenes de arroyos y vertientes, y también a la vera de caminos. Donde no existían cortes que expusieran el perfil del subsuelo, se realizaron calicatas a pala de hasta 50/60 cm de profundidad y se recuperaron testigos verticales mediante el hincado manual de caños de PVC de 1 a 2 m de longitud y 5 cm de diámetro. En todos los casos se identificaron las sucesiones de unidades

estratigráficas que conformaban el perfil hasta la profundidad expuesta o que se evidenciaban en los testigos una vez abiertos longitudinalmente, y se muestrearon cada una de las unidades. Realizados los estudios preliminares se hizo evidente que a pocos centímetros por debajo de la superficie se extendía un horizonte muy continuo, de alcance regional, de color gris claro-blanquecino intercalado en secuencias sedimentarias de colores predominantemente castaños (Fig. 3). Los estudios iniciales (Rovere *et al.*, 2010a,b) demostraron que ese nivel correspondía a un depósito de tefras dentro de un paquete sedimentario de unidades lacustres-eólicas. Se decidió estudiar en detalle ese depósito para caracterizar e intentar identificar a la erupción que le dio origen, lo cual constituye el objetivo de la presente contribución. La figura 2b muestra los perfiles en los cuales se ha reconocido ese nivel, mientras que la figura 3 ilustra algunos de los cortes donde el nivel de tefras se aprecia con mayor detalle.

Las muestras del nivel de tefra recolectadas en cada perfil fueron analizadas granulométricamente (Tabla 1, Fig. 4) y observadas bajo microscopio petrográfico. Posteriormente, cada muestra fue subdividida en fracciones de las cuales se seleccionaron (mediante observaciones con microscopio petrográfico) diferentes clases de partículas para su análisis con microscopio electrónico y microsonda EDS (Tablas 2 y 3). Estas tablas están subdivididas en campos que corresponden a cada perfil (p.ej. P5) y en cada uno de ellos se ilustran los resultados obtenidos en partículas específicas las cuales están denominadas con números romanos (p.ej. P5 II).

Las determinaciones granulométricas se llevaron a cabo en el Instituto de Ciencias de la Tierra y Ambientales (INCITAP) de la Universidad Nacional de La Pampa, realizándose en muestra total con un analizador láser Malvern -modelo Mastersizer Hydro 2000-. Previo a estos análisis se efectuaron determinaciones de carbonatos con un calcímetro digital Netto y de materia orgánica mediante el método de Walkley y Black (Walkley y Black, 1934). Los bajos porcentajes obtenidos de carbonatos y materia orgánica (<1%) llevaron a desestimar su influencia en los valores granulométricos y descartar significativas alteraciones postdepositacionales, por lo que se decidió analizar granulométricamente muestras totales. La separación de las fracciones utilizadas para estudios composicionales -llevados a cabo con microscopio petrográfico, microscopio electrónico

de barrido (Scanning Electron Microscope, SEM) y espectrometría de energía dispersiva integrada (Energy Dispersive Spectrometer, EDS)- se realizó mediante lavado de la muestra total a través de tamiz de 64  $\mu\text{m}$  y posterior tamizado en seco de la fracción arena en vibradora sónica con tamices standard (Tyler) a intervalo de  $\frac{1}{2} \phi$ . De esta manera pudieron aislarse las fracciones granulométricas entre 80 y 230  $\mu\text{m}$ . Las determinaciones con microscopio petrográfico se hicieron en el Laboratorio Geológico LCV S.R.L. con microscopio Olympus de luz transmitida, con ocular de 10x y objetivos de 2x, 4x y 10x; las muestras de grano suelto preparadas fueron impregnadas bajo presión con resina Epoxy azul para mejor visualización de las formas y porosidad de los componentes. Las determinaciones con SEM fueron realizadas en el Laboratorio de Microscopía Electrónica del INTEMIN (SEGEMAR) con un microscopio electrónico marca Phillips modelo XL30 SEM con EDS integrada, para estudio de características texturales de partículas, obtención de microfotografías y determinaciones químicas semicuantitativas; esta metodología consistió en el montaje de las muestras en soportes de aluminio con cinta doble faz de grafito, trabajando con resolución de 3,5 nm@20 kV con detector BSE; después del pegado en grafito se sopleteó la muestra con spray de aire comprimido para eliminar partículas no adheridas.

## RESULTADOS

El nivel de tefras estudiado constituye un registro regional que durante los relevamientos de campo fue reconocido en numerosos ambientes. Se desarrolla entre 7 y 20 cm de profundidad con espesores de 2 a 10 cm (Fig. 3). Constituye una capa subhorizontal, que en sectores es sumamente plana mientras que en otras muestra irregularidades adecuadas al relieve de su sustrato. La capa es masiva y no se revelan vestigios de laminación a excepción de una diferenciación en color en algunos de los depósitos (ej. perfiles P5 y P21, Fig. 3) manifestada por una pequeña capa de partículas de color negro que sigue la distribución del nivel gris claro regionalmente, la cual se interpreta como el resultado de sedimentación diferencial por densidad al momento de la depositación.

El nivel de tefras muestra diferentes relaciones con las unidades infra y suprayacentes en función del ambiente en el cual se depositó. En zonas adyacentes a la laguna, el depósito de tefras suprayace a depó-

Número de muestra analizada y su ubicación →	P5 La Playa Oeste de la laguna	P19 Planicie lacustre Este (Testigo)	P21 Planicie lacustre Este	P26 Extremo sur de la laguna	P42 Bañado La Porteña Sureste de la laguna	P45 Arroyo Chacay Noroeste de la laguna
Mz ( $\phi$ )	1,42 am	2,23 af	1,52 am	1,64 am	2,81 af	3,11 amf
D50 ( $\phi$ )	1,35	1,94	1,47	1,52	1,85	2,56
Distribución de tamaños	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Bimodal
Moda principal (en $\phi$ )	1-1,5	1-1,5	1-1,5	1-1,5	1-1,5	1-1,5
Moda secundaria (en $\phi$ )	6-6,5	5,5-6	5-5,5	4,5-5	4,5-5	4-4,5
<b>Porcentajes de fracciones principales</b>						
% Arena	89,75	85,14	83,64	87,38	72,11	64,66
% Limo	9,09	12,39	14,81	11,14	24,13	31,81
% Arcilla	1,16	2,47	1,55	1,48	3,76	3,53
% Fango (limo+arcilla)	10,25	14,86	16,36	12,62	27,89	35,34
<b>% de arena por fracciones</b>						
Arena muy gruesa	1,03	0,17	0,99	0,15	--	--
Arena gruesa	30,42	26,34	28,83	24,50	16,27	10,37
Arena mediana	46,78	48,11	43,74	46,00	38,58	29,12
Arena fina	11,40	8,05	10,03	15,42	13,45	15,17
Arena muy fina	0,12	2,47	0,05	1,31	3,81	10,00
<b>% de limo por fracciones</b>						
Limo grueso	1,75	1,64	3,06	3,73	7,47	13,11
Limo fino	7,34	10,75	11,75	7,41	16,66	18,70
<b>Otros parámetros estadísticos</b>						
Selección ( $\phi$ )	1,30 ps	1,22 ps	1,51 ps	1,50 ps	2,20 mps	2,11 mps
Asimetría	-0,38 fag	-0,63 fag	-0,42 fag	-0,41 fag	-0,64 fag	-0,42 fag
Curtosis	2,39 ml	2,28 ml	1,93 ml	2,15 ml	0,89 pk	0,83 pk
<b>Poblaciones granulométricas</b>						
% Población 1, gruesa (> 3-3,5 $\phi$ )	89,64	80,39	82,84	86,24	69,01	56,89
% Población 2, fina (< 3-3,5 $\phi$ )	10,37	19,61	17,16	13,76	30,99	43,11
% Fracción <10 $\mu\text{m}$	4,36	6,05	5,39	4,51	9,89	9,05
% Fracción <4 $\mu\text{m}$	1,16	3,21	1,94	1,48	3,76	3,53

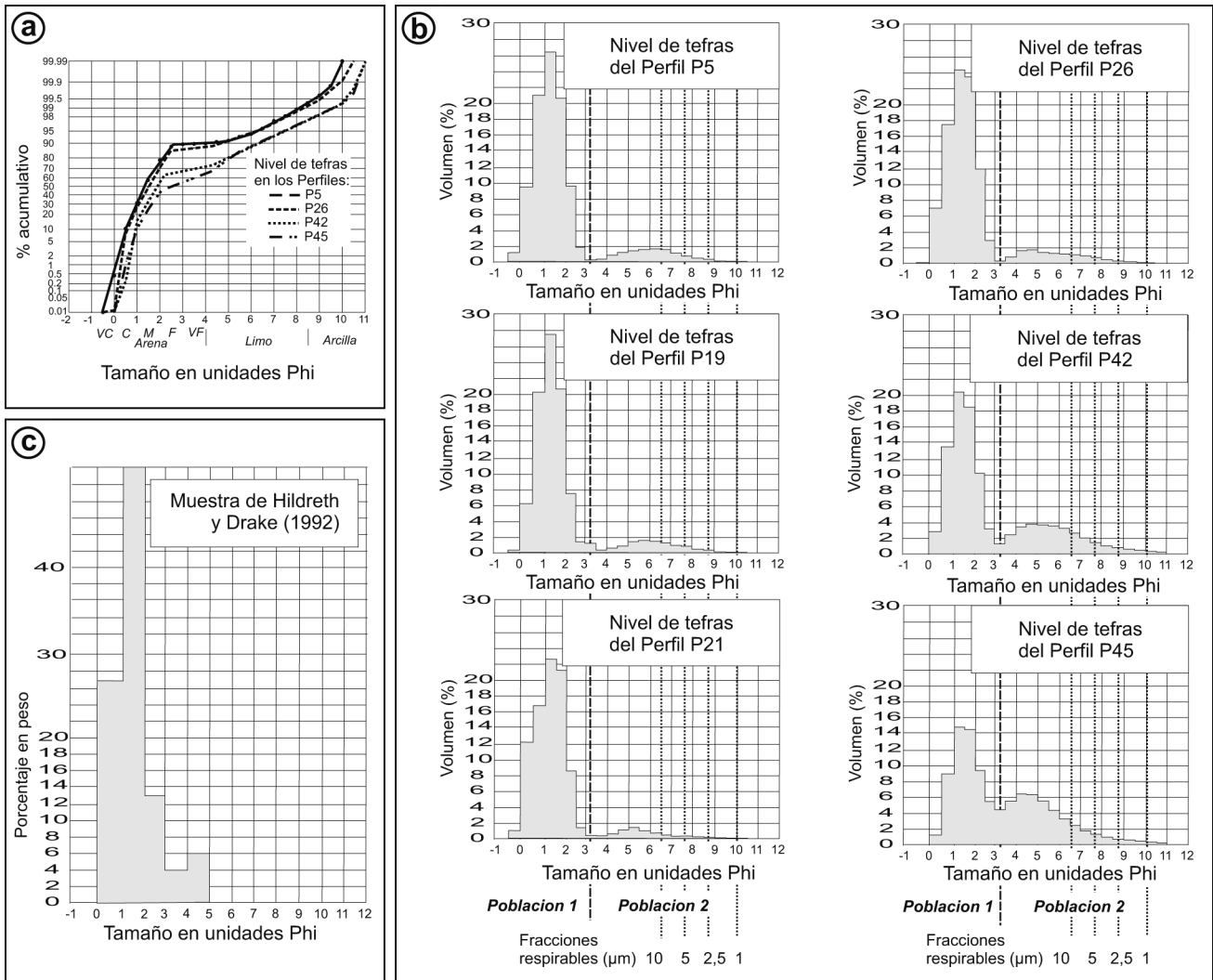
**Tabla 1.** Parámetros granulométricos de muestras de tefras de diferentes perfiles. Abreviaturas:  $\phi$ : phi. Referencias para Mz (media): am: arena media; af: arena fina; amf: arena muy fina. Grados de selección: ps: pobremente seleccionada; mps: muy pobremente seleccionada. Grados de asimetría: fag: fuerte asimetría gruesa. Grados de curtosis: ml: muy leptocúrtica; pk: platicúrtica.

**Table 1.** Grain-size parameters of tephra's samples from different profiles. Abbreviations:  $\phi$ : phi. References for Mz (media): am: medium sand; af: fine sand; amf: very fine sand. Degree of sorting: ps: poorly sorted; mps: very poorly sorted. Degree of asymmetry: fag: strong coarse asymmetry. Degree of curtosis: ml: very leptokurtic; pk: platicurtic.

sitos lagunares (perfiles P19 y P42, Fig. 3) y a su vez está sobrepuesto por depósitos eólicos (Violante *et al.*, 2010; D'Ambrosio *et al.*, 2011). Al noroeste de la laguna (perfil P45, Fig. 3) se encuentra sepultando un suelo enterrado que contiene restos de vegetación con rasgos de carbonización. Se han hallado también niveles de tefras cubriendo sedimentos eólicos (perfiles P5, P21 y P26, Fig. 3). Como contraparte, en diversos sitios ubicados en la planicie lacustre occidental no se han hallado vestigios de la capa de tefras.

## Granulometría

Las tefras depositadas en los alrededores de la Laguna Llanquanelo son de tamaño medio variable entre arena muy fina y mediana, en general pobremente seleccionadas, con rangos de tamaños que van de arcillas hasta arenas muy gruesas en algunos casos (Fig. 4, Tabla 1). La relación arena:fango (limo+arcilla) oscila entre 64:36 y 92:8. Los análisis granulométricos no señalan mayores



**Figura 4.** Curvas de probabilidad (a) e histogramas (b) de muestras de tefras del Volcán Quizapú. Se incluye para comparación el histograma (c) ilustrado por Hildreth y Drake (1992, fig. 11, pag. 112) correspondiente a una muestra recolectada por esos autores en un sitio cercano a la Laguna Llanccanelo (ver más detalles en el texto). Debe tenerse en cuenta que los porcentajes expresados por esos autores son en peso, mientras que los de la presente contribución son en volumen.

**Figure 4.** Probability curves (a) and histograms (b) from studied samples of Quizapú Volcano tephra. It is included for comparison a histogram (c) illustrated by Hildreth and Drake (1992, fig. 11, pag. 112) which corresponds to a sample collected by those authors in a site nearby Llanccanelo Lake (see text for more details). It must be considered that grain-size percentages from those authors are expressed in weight, whereas those corresponding to the present contribution are expressed in volume.

tendencias de variabilidad en el tamaño de las partículas con la distancia en la región estudiada. Las curvas granulométricas e histogramas muestran un patrón de distribución de tamaños bimodal, con una fracción más gruesa dominante en el rango arena fina y luego una escasez de materiales arenosos más finos hasta 3-3,5  $\phi$  (125-88  $\mu\text{m}$ ). En los rangos de tamaños

menores aparece una segunda moda en el tamaño limo. Esta bimodalidad permite diferenciar dos poblaciones: Población 1 de partículas más gruesas que 3-3,5  $\phi$  (125-88  $\mu\text{m}$ ) con moda entre 1 y 2  $\phi$  (250 a 500  $\mu\text{m}$ ), y Población 2 con partículas más finas, con moda variable entre 4 y 7  $\phi$  (62 a 8  $\mu\text{m}$ ). La Población 1 es dominante alcanzando proporciones entre

**Tabla 2.** Composición química semicuantitativa (EDS) total (óxidos mayoritarios + minoritarios) de trizas del nivel de la erupción del Quizapú en diferentes perfiles alrededor de la laguna Llanccanelo. Valores expresados en %.

**Table 2.** Total (major + minor oxides) semiquantitative chemical composition (EDS) of ash shards of the Quizapú volcano eruption in different profiles around Llanccanelo Lake. Values expressed in %.

Muestra de tefras del Perfil P5. Calicata en La Playa al O de la laguna. Profundidad de la muestra: 10-13 cm.

Perfil P5	P5 I	P5 II	P5 III	P5 IV	P5 V	P5 VI	P5 VII	P5 VIII	P5 IX	P5 X	P5 XI
Na <sub>2</sub> O	3,92	4,01	3,79	4,87	5,79	4,55	7,16	2,92	4,92	5,83	.....
ZnO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	5,30
MgO				3,65	1,67	1,11	1,72	1,87	1,35	1,35	2,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,28	35,11	31,93	25,64	26,60	16,61	17,68	9,10	17,23	17,47	14,04
SiO <sub>2</sub>	48,63	50,10	29,97	46,59	52,09	30,70	64,71	21,82	68,24	68,70	21,34
SO <sub>3</sub>	1,22	.....	1,79	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Cl <sub>2</sub> O	1,39	.....	.....	2,17	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
K <sub>2</sub> O	3,35	3,41	1,34	2,08	3,31	1,67	3,83	.....	3,89	3,83	0,69
CaO	1,98	2,02	2,08	1,92	4,06	2,52	2,23	.....	.....	.....	1,39
TiO <sub>2</sub>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	6,24	.....	.....	23,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,84	2,91	1,42	8,48	3,59	1,60	2,68	58,06	4,36	2,81	31,06
CuO	2,38	2,43	27,67	4,59	2,88	41,25	.....	.....	.....	.....	.....

Muestra de tefras del Perfil P28. Testigo en La Playa al O de la laguna. Profundidad de la muestra: 15 cm.

Perfil P28	P28 I	P28 II
Na <sub>2</sub> O	0,99	9,74
ZnO	.....	.....
MgO	.....	.....
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,61	17,84
SiO <sub>2</sub>	15,66	42,62
SO <sub>3</sub>	39,60	14,17
Cl <sub>2</sub> O	.....	.....
K <sub>2</sub> O	.....	.....
CaO	34,15	15,63
TiO <sub>2</sub>	.....	.....
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	.....	.....
CuO	.....	.....

Muestra de tefras del Perfil P20. Calicata al noreste del C° Coral, al E de la laguna. Profundidad de la muestra: 7 cm.

Perfil P20	P20 I	P20 II	P20 III	P20 IV	P20 V
Na <sub>2</sub> O	.....	5,17	5,25	4,64	5,17
ZnO	.....	.....	.....	.....	1,66
MgO	3,92	2,06	2,53	1,59	.....
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,74	18,64	16,22	21,93	22,35
SiO <sub>2</sub>	41,42	65,99	53,36	59,55	56,00
SO <sub>3</sub>	.....	.....	.....	.....	.....
Cl <sub>2</sub> O	.....	.....	.....	.....	.....
K <sub>2</sub> O	2,59	3,50	2,57	3,72	3,43
CaO	9,43	2,02	2,51	3,18	4,96
TiO <sub>2</sub>	.....	.....	2,81	0,45	1,53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,70	2,61	14,75	4,93	4,90
CuO	20,71	.....	.....	.....	.....

Muestra de tefras del Perfil P-45. Perfil expuesto en el Arroyo Chacay al NO de la laguna. Profundidad de la muestra: 18-20 cm.

Perfil P45	P45 I	P45 II	P45 III	P45 IV	P45 V	P45 VI	P45 VII
Na <sub>2</sub> O	13,26	14,47	12,80	10,54	6,18	6,82	6,92
ZnO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
MgO	7,29	8,09	5,94	5,24	4,79	10,59	10,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,82	15,40	19,87	13,17	7,32	9,68	9,85
SiO <sub>2</sub>	46,45	52,15	54,87	44,79	21,04	32,06	32,68
SO <sub>3</sub>	.....	.....	.....	.....	1,73	0,57	0,58
Cl <sub>2</sub> O	9,99	.....	.....	.....	.....	.....	.....
K <sub>2</sub> O	3,38	3,60	1,92	2,93	1,17	1,37	1,24
CaO	2,31	2,48	3,15	.....	1,43	2,21	1,98
TiO <sub>2</sub>	.....	.....	.....	3,23	.....	1,26	.....
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,49	3,81	1,45	17,85	49,60	35,43	35,99
CuO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Muestra de tefras del Perfil P42: Bañado La Porteña al SE de la laguna. Profundidad de la muestra: 20 cm.

Perfil P42	P42 I	P42 II	P42 III	P42 IV	P42 V	P42 VI	P42 VII
Na <sub>2</sub> O	7,89	6,08	12,90	5,68	13,52	7,03	6,88
ZnO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
MgO	3,47	2,79	3,55	0,87	4,32	3,00	2,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,71	16,42	15,76	14,27	15,89	15,26	15,06
SiO <sub>2</sub>	60,66	61,68	58,33	70,06	59,04	65,61	69,21
SO <sub>3</sub>	1,64	2,35	2,60	.....	.....	.....	.....
Cl <sub>2</sub> O	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
K <sub>2</sub> O	4,10	6,06	3,79	4,70	4,13	4,62	4,46
CaO	2,04	.....	.....	.....	.....	.....	.....
TiO <sub>2</sub>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,49	4,62	3,07	4,42	3,10	4,48	1,85
CuO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Perfil P5	P5 I	P5 II	P5 IV	P5 V	P5 VII	P5 IX	P5 X
Na <sub>2</sub> O	4.13	4.11	5.22	5.96	7.16	4.92	5.83
MgO	.....	.....	3.92	1.72	1.72	1.35	1.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.08	35.99	27.51	27.39	17.68	17.23	17.47
SiO <sub>2</sub>	51.19	51.35	49.97	53.64	64.71	68.24	68.7
K <sub>2</sub> O	3.52	3.49	2.23	3.4	3.83	3.89	3.83
CaO	2.08	2.07	2.06	4.18	2.23	.....	.....
TiO <sub>2</sub>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.99	2.98	9.1	3.7	2.68	4.36	2.81

Perfil P20	P20 II	P20 III	P20 IV	P20 V	Perfil P45	P45 I	P45 II	P45 III
Na <sub>2</sub> O	5.17	5.25	4.64	5.26	Na <sub>2</sub> O	14.73	14.47	12.8
MgO	2.06	2.53	1.59	.....	MgO	8.1	8.09	5.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.64	16.22	21.93	22.73	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.36	15.4	19.87
SiO <sub>2</sub>	65.99	53.36	59.55	56.95	SiO <sub>2</sub>	51.61	52.15	54.87
K <sub>2</sub> O	3.5	2.57	3.72	3.49	K <sub>2</sub> O	3.76	3.6	1.92
CaO	2.02	2.51	3.18	5.04	CaO	2.57	2.48	3.15
TiO <sub>2</sub>	.....	2.81	0.45	1.56	TiO <sub>2</sub>	.....	.....	.....
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.61	14.75	4.93	4.98	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.88	3.81	1.45

Perfil P42	P42 I	P42 II	P42 III	P42 IV	P42 V	P42 VI	P42 VII
Na <sub>2</sub> O	8.02	6.23	13.24	5.68	13.52	7.03	6.88
MgO	3.53	2.86	3.64	0.87	4.32	3.0	2.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.99	16.82	16.18	14.27	15.89	15.26	15.06
SiO <sub>2</sub>	61.67	63.14	59.89	70.06	59.04	65.61	69.21
K <sub>2</sub> O	4.17	6.21	3.89	4.7	4.13	4.62	4.46
CaO	2.07	.....	.....	.....	.....	.....	.....
TiO <sub>2</sub>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.55	4.73	3.15	4.42	3.1	4.48	1.85

**Tabla 3.** Óxidos mayoritarios recalculados al 100% de muestras de trizas de las tefras estudiadas (cuyas composiciones totales se muestran en la Tabla 2). Valores expresados en %.

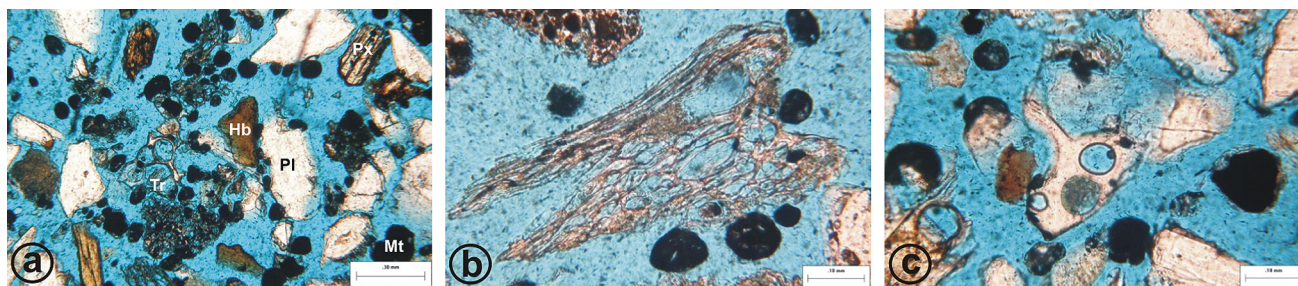
**Table 3.** Major oxides recalculated to 100% of studied tephra's samples (Total composition is shown in Table 2). Values expressed in %.

56,89 y 89,64%, mientras que las proporciones de la Población 2 oscilan entre 10,37 y 43,11%. Dentro de los intervalos correspondientes a la Población 2 se encuentran las partículas “respirables” (PM10, <10 μm, Horwell *et al.*, 2003, Horwell y Baxter, 2006), que varían entre 4,36 y 9,89%.

### Microscopía Óptica

El estudio de las muestras bajo microscopio petrográfico reveló características semejantes para todos los piroclastos analizados. Ellos están compuestos en promedio por 59% de material vítreo, 40% de

cristales y 1% de litoclastos. Estos valores son coherentes con los hallados por Fierstein *et al.* (1989) en 29 muestras de la erupción del Quizapú, las que aportaron entre 2,2 y 59,2% de cristales y entre <0,1 y 4,0% de litoclastos. Según Hildreth y Drake (1992) a partir del análisis regional de depósitos del volcán Quizapú, las trizas de composición dacítica superan el 95%, del cual solo el 5% no están contaminadas. El análisis porcentual y composicional de los líticos es fundamental en la interpretación de los modelos de dispersión y mapas isopáquicos. Hildreth y Drake (1992) consideran los depósitos plinianos de la erupción de 1932 del Quizapú como uno



**Figura 5.** Aspecto de tefras observadas con microscopio petrográfico. a) Trizas vítreas fibrosas y cuspidas (Tr), cristaloclastos de plagioclasa (Pl), hornblenda (Hb), piroxeno (Px) y magnetita (Mt). b) Triza pumícea fibrosa con microcavidades vesiculares y paredes de vesículas muy finas. c) Trizas planas (*platy*) con vesículas redondeadas, cristales de plagioclasa, hornblenda y magnetita.

**Figure 5.** Aspect of tephras observed under petrographic microscope. a) Fibrous and cusped glass shards (Tr), crystaloclasts of plagioclase (Pl), hornblende (Hb), pyroxene (Px) and magnetite (Mt). b) Fibrous pumiceous shard with vesicular microcavities and very fine vesicle walls. c) Platy shards with rounded vesicles, crystals of plagioclase, hornblende and magnetite.

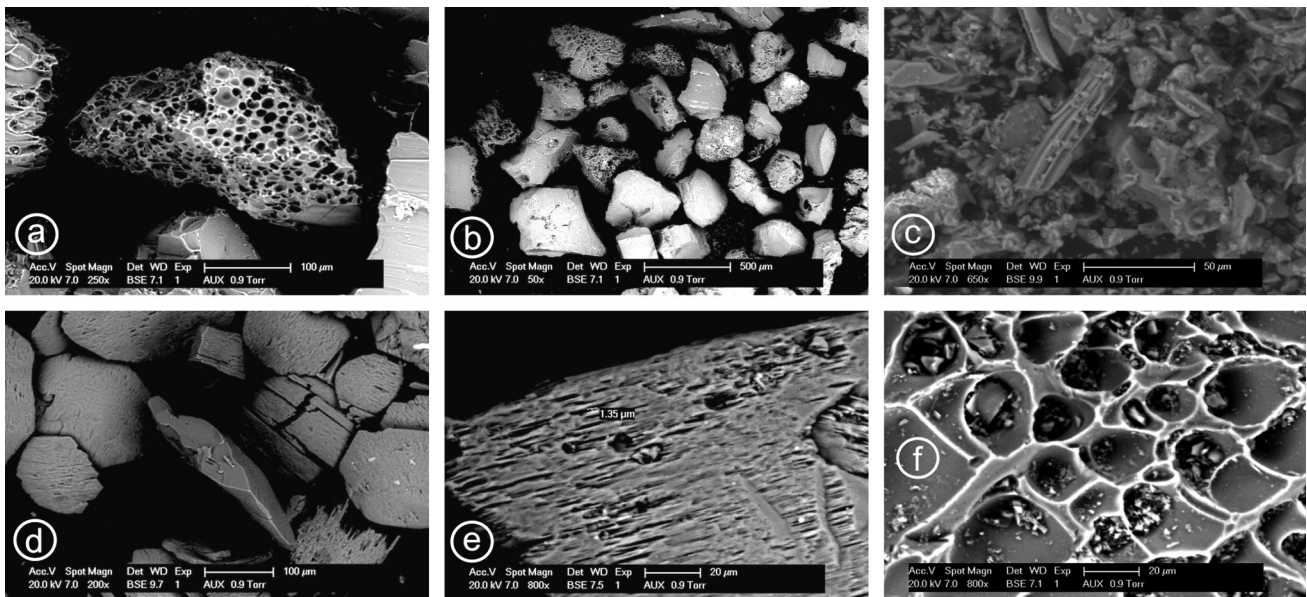
de los registros mundiales más pobres en líticos. Como ejemplo comparativo, el nivel A del volcán Novarupta (Alaska) contiene una fracción de líticos 20 veces superior (Fierstein y Hildreth, 1992).

El material vítreo está conformado predominantemente por trizas fibrosas con microcavidades vesiculares; en muchas de las trizas las microcavidades son tubulares y elongadas, y en forma subordinada aparecen trizas cuspidas y planas (*platy*) con vesículas redondeadas (Fig. 5). Dentro de la fracción correspondiente a cristales, numerosos individuos presentan restos de vidrio vesiculado adherido a sus bordes. Esta fracción se divide en: 20% de plagioclasas subhedrales a anhedrales con individuos zonados, maclados (con maclas de albita) con inclusiones y engolfamientos, cuya composición según el ángulo de la macla de albita (2V: 10° a 23°) es de oligoclasa a andesina media; 1% de cuarzo anhedral con extinción relámpago; 6% de hornblenda castaña, euhedral, en secciones basales y elongadas; 3% de piroxeno incoloro a castaño verdoso muy claro, que correspondería a clinopiroxenos; y 10% de minerales opacos entre los cuales es predominante la magnetita. Los litoclastos son subredondeados y corresponden a fragmentos de rocas volcánicas; por su aspecto al microscopio podrían corresponder a pastas de composición andesítica. Kittl (1933) muestra resultados semejantes al mencionar una composición traquiandesítica con presencia de plagioclasas, hornblenda y piroxenos. Por su parte, la presencia de vidrio volcánico vesiculado adherido a los cristales indicaría un origen primario (juvenil) de los mismos acorde con las conclusiones de Hildreth y Drake (1992) quienes consideran una composición

dacítica de la ceniza.

### Microscopía Electrónica

Las observaciones con SEM fueron realizadas sobre trizas de diámetros entre 5 y 400  $\mu\text{m}$ . Las características morfológicas de los fragmentos muestran en todos los casos formas variadas, tanto equidimensionales como alargadas (prismáticas) e irregulares, con estrías y distintos grados de vesicularidad (Fig. 6), variando de redondeadas a angulosas. Las trizas consisten principalmente de fragmentos en forma de gotas y partículas blocosas (*blocky*) (Fig. 6b) formadas por granos equidimensionales con superficies planas bien desarrolladas. Las superficies vesiculares son suaves (lisa o tipo S -*smooth*- siguiendo la clasificación de Miwa *et al.*, 2009, Fig. 6a, b) y en menores proporciones se hallaron granos elongados con convolutas a lo largo del eje mayor. Generalmente poseen textura vesicular fluidal (o muy vesicular) con vesículas redondeadas (escasamente alargadas) de diámetros homogéneos (Fig. 6a). Las trizas con dos o más poblaciones (generaciones) de vesículas son poco comunes, sin embargo (Fig. 7a) se observaron hasta tres generaciones de vesículas con contactos agudos y superficies rotas (planas) o concoidales, las paredes intervesiculares varían en su espesor de 1 a 20  $\mu\text{m}$ . Otro rasgo textural inusual en las vesículas con fondo plano es que contienen un pequeño y único hueco en el centro, lo cual está asociado a rasgos de solución y precipitación. También se asocian a estos rasgos las paredes de vesículas fracturadas, generalmente rellenas con productos de alteración



**Figura 6.** Aspecto de tefras observadas con microscopio electrónico. a) Detalle de partícula altamente vesiculada, vesículas pequeñas de tamaño homogéneo. b) Partículas blocosas, en forma de gota, masivas y con vesículas fluidales. c) Partículas elongadas, fluidales y masivas. d) Detalle de partícula masiva (centro). e) Partícula con oquedades y alteración secundaria. f) Textura altamente vesiculada, contactos intervesiculares agudos con superficies de ruptura. Alto contenido de partículas menores de  $5\ \mu\text{m}$  intravesiculares.

**Figure 6.** Aspect of tephra observed under electron microscope. a) Detail of highly vesicular ash, homogeneous small vesicle size. b) Blocky, droplet-shaped, massive and fluidal vesicular ash. c) Elongated, fluidal and massive particles. d) Detail of massive particle (center). e) Particle with cavities and secondary alteration. f) Detail of highly vesiculated particle, sharp intervesicular walls with breaking surfaces. High content of intravesicular particles finer than  $5\ \mu\text{m}$ .

(Fig. 7b) o palagonita (Wohletz y Krinsley, 1982).

Por la morfología de las partículas se reconocieron dos tipos principales de trizas, unas vesiculosas dominantes en la Población 1 definida granulométricamente (tamaños mayores a  $88\text{-}125\ \mu\text{m}$ , Fig. 6a, b) y otras masivas (planas *-platy-* o blocosas *-blocky-*) que corresponden a las más gruesas de la Población 2 (tamaños menores a  $62\ \mu\text{m}$ , Figs. 6c, d y 7). En cualquiera de estos tipos se hallan a su vez texturas vítreas masivas con superficies de relieve suave y uniforme así como otras no suaves muy irregulares, alveolares y con oquedades (Fig. 6e). La observación detallada de las vesículas (Fig. 6f) permite distinguir bordes filosos manifestados por líneas contorneadas de color blanco, por posible efecto óptico.

No se apreciaron diferencias composicionales significativas entre ambos tipos de partículas. Las partículas mayores muestran frecuentemente una cobertura de micropartículas menores ( $< 5\ \mu\text{m}$ ) adheridas (Fig. 6f) que pueden estar ligeramente unidas o parcialmente soldadas a la superficie de granos mayores. La presencia de estas partículas finas es significativa por cuanto corresponden a materiales de tamaños “respirables”.

La composición química semicuantitativa total muestra elementos mayoritarios y minoritarios, estos últimos en significativas proporciones en algunas de las muestras analizadas (Tabla 2). Los primeros están representados por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$ . Los minoritarios están representados por  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{ZnO}$  y  $\text{CuO}$ , también hallados por otros autores (Kittl, 1933; Fierstein *et al.*, 1989; Hildreth y Drake, 1992; Ruprecht y Bachmann, 2010) y en proporciones variables según las muestras estudiadas. El Fe y Cu se presentan en proporciones muy significativas en algunas muestras (Fig. 8, Tabla 2).

Para la representación gráfica de los elementos mayoritarios se ha recalculado su abundancia al 100 % (Tabla 3). La figura 9a muestra la variabilidad de algunos de ellos ordenados regionalmente, indicando las áreas norte, oeste, sur y este respecto de la laguna. Se observan variaciones importantes en el contenido de  $\text{SiO}_2$  y su relación inversa con la proporción de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y en menor medida  $\text{TiO}_2$ . El  $\text{K}_2\text{O}$  se mantiene de manera relativamente constante. La figura 9b representa la relación  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ , la cual es considerada por diversos autores como indicadora

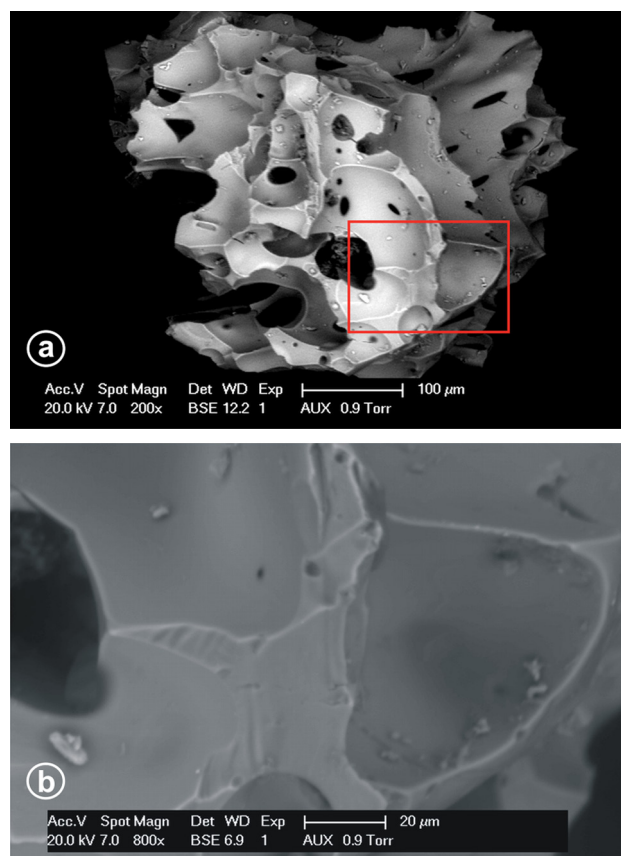


de aspectos composicionales y variabilidad de la erupción. En este diagrama binario se han volcado, a los fines comparativos, los resultados mencionados en la bibliografía consultada. Al realizar este análisis, surge que el área de concentración de las muestras analizadas se ubica en un sector del gráfico vecino al que muestran otros autores (Kittl, 1933; Fierstein *et al.*, 1989; Hildreth y Drake, 1992; Ruprecht *et al.*, 2012) para la misma erupción. La diferencia radica fundamentalmente en el contenido de  $K_2O$ , que en el caso de las muestras analizadas en el presente trabajo es algo mayor que el hallado por los autores mencionados.

## DISCUSIÓN

Las características sedimentológicas (granulométricas y mineralógicas) y químicas (semicuantitativas) de las muestras de tefras estudiadas en inmediaciones de la laguna Llanccanelo (sur de Mendoza), permiten asignar a ese nivel volcanoclástico a la erupción del Volcán Quizapú de 1932, al ser compatibles con aquellas características aportadas por diversos autores quienes estudiaron depósitos similares en regiones aledañas y en las inmediaciones del volcán (Kittl, 1933; Wilcox, 1959; Walker, 1981; Fierstein *et al.*, 1989; Hildreth y Drake, 1992; González Ferrán, 1993; Ruprecht y Bachmann, 2010). Los tamaños de las partículas son consistentes con las descripciones de Kittl (1933), quien incluyó a la laguna en la región que definiera como caracterizada por “tefras finas y cenizas de tamaños menores a 5 mm que llegaron aún a materiales finísimos tamaño limo y arcilla con espesores de algunos pocos cm”. Sumado a las características arriba descritas, el estado de preservación, la profundidad, el espesor y la gran distribución areal le confieren a esta unidad el carácter de “nivel guía” para la erupción del volcán Quizapú de 1932.

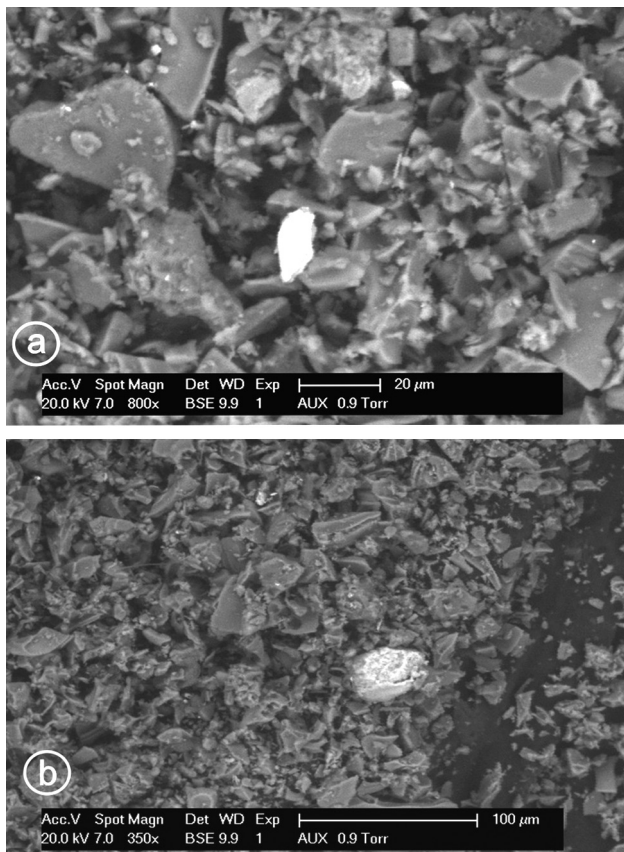
La erupción, explosiva con características plinianas, produjo un profundo efecto en el ambiente del área estudiada, como queda demostrado por las evidencias de campo recogidas durante el desarrollo de este trabajo, que señalan el cegamiento de bordes someros de la laguna Llanccanelo y el sepultamiento de suelos (Fig. 3). El hallazgo del nivel de tefras sobre depósitos lagunares indica que algunas zonas marginales de la laguna, particularmente en su borde oriental, fueron cegadas por los productos de la erupción y quedaron a partir de entonces com-



**Figura 7.** Fragmento vítreo observado con microscopio electrónico. a) Fragmento equidimensional con vesículas esféricas, ovales y escasas alargadas, superficies lisas, ranuras, superficies contorsionadas. b) Detalle del recuadro de a): Vesículas con fondo plano, paredes intervesiculares con esquinas angulares y bordes agudos, partículas adheridas, superficies lisas y planos de ruptura.

**Figure 7.** Vitreous fragment observed under scanning electron microscope. a) Equidimensional fragment with spherical oval and scarce elongated vesicles, smooth surfaces, grooves, contorted surfaces. b) Detail of the rectangle of a): Smooth and flat-bottom vesicles, intervesicular walls with angular corners and acute edges, adhered particles, smooth surfaces and breaking planes.

pletamente secas sin volver a ser cubiertas por el agua, siendo posteriormente afectadas por depositación eólica. Otros sitios muestran al nivel de tefras sobre un suelo enterrado con restos de vegetación carbonizada, lo cual indicaría que las cenizas pudieron caer a temperaturas lo suficientemente altas como para producir ese efecto en el sustrato vegetal, tal como fuera documentado en otras partes del mundo (Seymour *et al.*, 1983; Carson *et al.*, 1990). Cabe destacar que en los testimonios orales de pobladores que habitaban la región durante la erupción de 1932, se menciona la caída de “cenizas



**Figure 8.** Aspecto de triza con alto contenido de cobre (fragmentos blancos brillantes), indicando posibles alteraciones del material vítreo en halloysita y alofana.  
**Figure 8.** Aspect of ash shard with high copper content (white brilliant fragments), indicating possible alteration of the vitreous material in halloysite and alofana.

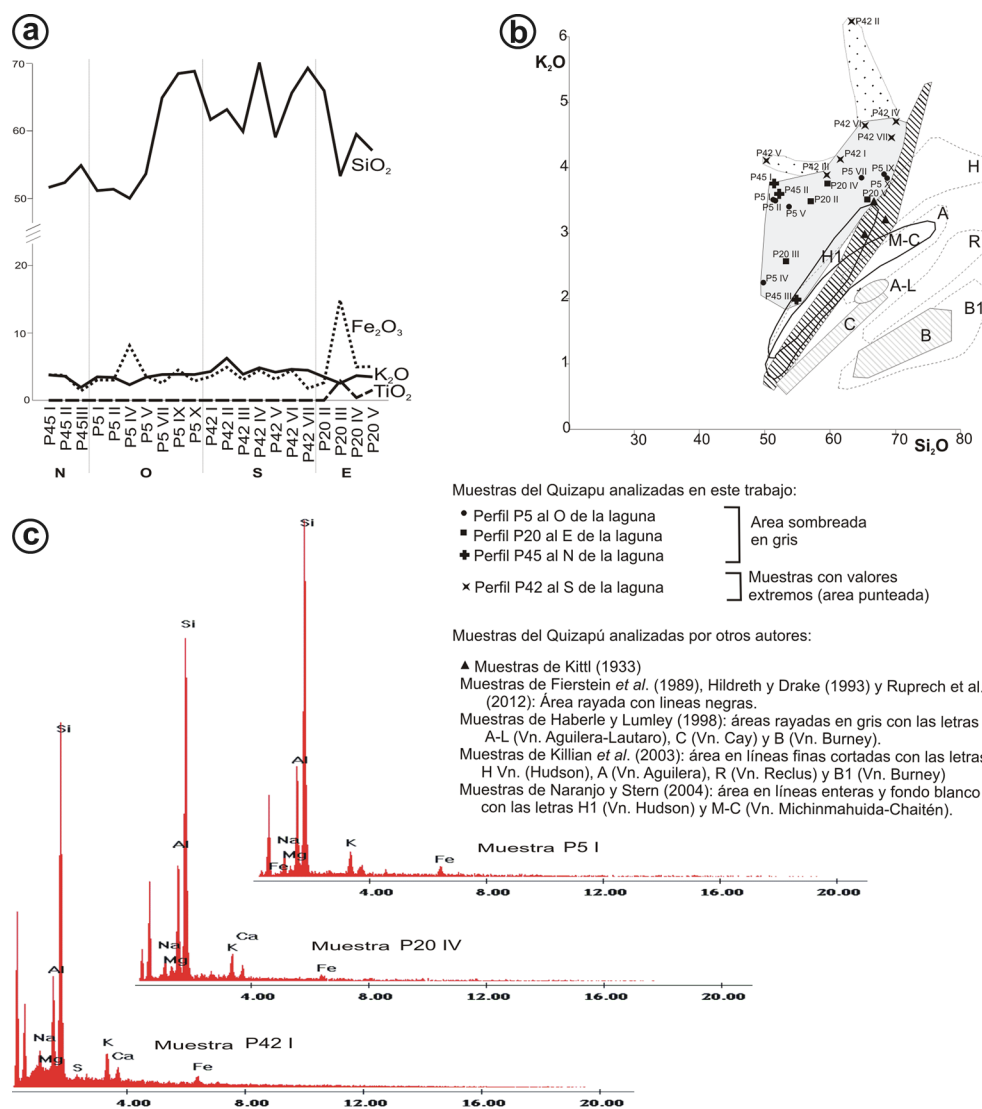
calientes” (Ovando y Ramires, 2009). La ausencia de este nivel de tefras en algunos sitios se puede interpretar tanto por la acción de procesos erosivos post-depositacionales, por la caída de la ceniza en áreas del ambiente lagunar (posteriormente secado) de relativa mayor energía que habría impedido su depositación en el fondo al ser transportada en suspensión hacia otros sectores, o bien en áreas topográficamente expuestas a intensa erosión eólica.

Si bien no se descartan procesos post-depositacionales vinculados a retransporte de partículas por acción eólica, las características de los substratos en los cuales están depositadas las tefras (bordes de laguna, ambientes húmedos marginales, suelos con vegetación) permiten inferir con cierto grado de certeza una yacencia primaria sin mayor removilización, aunque con evidencias de enterramiento, compactación y alteraciones post-depositacionales menores. Aspectos sedimentológi-

cos como la abundante proporción de partículas de tamaño menor a arena fina o mediana (ceniza y polvo volcánico), la manifiesta bimodalidad de las distribuciones granulométricas y su pobre selección, las características superficiales de las partículas con gran cantidad de vesículas, las proporciones altas de partículas pequeñas adheridas a otras mayores y los altos contenidos de sílice (sumados al volumen de tefra erupcionado y la altura de la columna documentados por otros autores, como Kittl, 1933, Hildreth y Drake, 1992 y González Ferrán, 1993) son propios de eventos plinianos (Walker, 1981; Newhall y Self, 1982; Simkin y Siebert, 1994; Bonadonna y Houghton, 2005; Rose y Durant, 2009; Carey *et al.*, 2009; Gislason *et al.*, 2011; Smithsonian Institution, 2012).

Las características granulométricas descritas en este trabajo son propias de depósitos distales de tefras (Bonadonna y Houghton, 2005; Rose y Durant, 2009), caracterizados por dos poblaciones (distribuciones multimodales, no gaussianas, y pobre selección). Una muestra analizada por Hildreth y Drake (1992) localizada 106 km al este del volcán en las inmediaciones de la Laguna Llanquanelo (ver Fig. 11, pág. 112 de esos autores), muestra bimodalidad con modas principal y secundaria en las mismas fracciones que las manifestadas en los resultados de la presente contribución (Fig. 4).

La variabilidad regional en algunas de las características sedimentológicas observadas, como la media y selección de las muestras, las características superficiales de los granos, el agregado de partículas de tamaños menores sobre la superficie y en las vesículas de las mayores, y la mezcla de partículas de colores claros y oscuros, a veces diferenciadas en pequeñas laminaciones dentro de los depósitos, señalan procesos de fraccionamiento en las sucesivas etapas de una erupción pliniana así como durante las etapas post-eruptivas. Esta conclusión se basa en los conceptos de Rose y Durant (2009), quienes señalan que esos procesos de fraccionamiento son responsables de las propiedades que adquieren los concentrados de partículas; cambios adicionales se producen durante la dispersión de los materiales, de manera que las relaciones entre fracciones gruesas/finas así como las características superficiales de los granos cambian permanentemente; esto redundaría en que ninguna muestra recolectada representaría fielmente a las características de la erupción, las cuales deberán buscarse en el análisis conjunto de



**Figura 9.** a) Variación regional de los elementos mayoritarios. N, O, S y E se refieren a las áreas norte, oeste, sur y centro respectivamente respecto a la Laguna Llanccanelo. b) Diagrama Si<sub>2</sub>O-KO<sub>2</sub>. c) Ejemplo de gráficos de composiciones químicas semicuantitativas con microsonda EDS de trizas seleccionadas.

**Figure 9.** a) Regional variation of major elements. N, O, S and E refer to the north, west, south and east areas respectively respect to Llanccanelo Lake. b) Si<sub>2</sub>O-KO<sub>2</sub> diagram. c) Example of graphs of semiquantitative chemical composition with EDS of selected ash shards.

materiales de diferentes áreas. Witham *et al.* (2005) recomiendan realizar promedios estadísticos de observaciones para acercarse a las características reales del material eruptado, ya que consideran que cada muestra tomada en un sitio determinado tiene sus propios errores y no representa por sí sola al conjunto. Por otra parte, dificultades adicionales a las distribuciones de tamaños pueden resultar de procesos de agregación de partículas y aún a la sumatoria de materiales provenientes de distintos pulsos eruptivos que pueden ocurrir en lapsos de pocos días, como fue el caso del Volcán Chaitén (Watt *et al.*, 2009). Los depósitos de tefras del

Volcán Quizapú difícilmente hayan conservado las sales primarias originadas por exsolución durante el transporte aéreo, debido al tiempo transcurrido desde la erupción, los procesos de disolución, meteorización y alteraciones por efecto de los niveles freáticos. En cambio, se observaron partículas adheridas o minerales de alteración o cristalización secundaria (Witham *et al.*, 2005). Si bien no hay precisión sobre cuántos pulsos eruptivos caracterizaron a esta erupción, y considerando que Kittl (1933) y Hildreth y Drake (1992) mencionan varias explosiones y nubes de cenizas “blancas y negras”, no se descarta que las dos poblaciones

reconocidas en las tefras analizadas (con modas en 1 a 2  $\phi$  -250 a 500  $\mu\text{m}$ - y 4 a 7  $\phi$  -62 a 8  $\mu\text{m}$ -) puedan ser posiblemente resultantes de procesos originados en distintos pulsos eruptivos con intensa fragmentación o bien a la agregación de partículas finas dentro de la nube eruptiva, tal como fuera mencionado por Brazier *et al.* (1983) para el Volcán Santa Elena y Scasso *et al.* (1994) para el Volcán Hudson.

Las características superficiales de las partículas también son indicativas de procesos eruptivos plinianos. Las diferencias que permiten la presencia tanto de texturas vidriosas macizas con superficies de relieve suave y uniforme como otras no suaves muy irregulares, alveolares y con oquedades (Miwa *et al.*, 2009), responden a aspectos relacionados con las características explosivas de la erupción, energía del transporte de cenizas, contenido de gases y procesos post-depositacionales.

Según Wohletz y Krinsley (1982), las mediciones a través de SEM de la morfología de las partículas, las texturas superficiales, el espesor de las paredes intervesiculares (entre otros parámetros) revelan indicadores físico-químicos del magma y la fase gaseosa durante su ascenso a través del conducto volcánico, desde el nivel de fragmentación hasta su enfriamiento. En el caso de las tefras analizadas estos se corresponderían con rasgos típicos de erupciones magmáticas andesíticas o medianamente fluidas, con componentes hidromagmáticos (Heiken, 1971, 1972; Wohletz, 1979). Las partículas de menor tamaño (fracciones más finas de la Población 2) que se encuentran adheridas y cementadas en las superficies de las trizas mayores podrían indicar el alto grado de pulverización que habría tenido lugar durante la erupción; también, las diferentes generaciones de vesículas y sus bordes filosos (Fig. 6f) pueden ser atribuidos a superficies de ruptura indicando procesos de enfriamiento durante la fragmentación y vesiculación pre-fragmentación (Wohletz y Krinsley, 1982). Según esos mismos autores, en estudios basados en cenizas basálticas se demostró que las trizas equidimensionales en forma de gotas y blocosas (*blocky*) con superficies planas resultan de la ruptura de lava en estado frágil. La presencia de vidrio vesiculado adherido a cristales indicaría un origen primario (juvenil) de los mismos. Vesículas con fondo plano con hueco interior y paredes de vesículas fracturadas con relleno de alteración (posible palagonita, Wohletz y Krinsley, 1982) están asociados a rasgos de solución y precipitación. Por

su parte, las texturas relícticas están relacionadas con alteración secundaria post-depositacional, posiblemente vinculada a fluctuaciones freáticas.

La composición de elementos mayoritarios y minoritarios hallada a través de los análisis realizados es semejante a la documentada por Kittl (1933), Fierstein *et al.* (1989), Hildreth y Drake (1992) y Ruprecht *et al.* (2012). Algunos autores han encontrado variabilidad regional en la composición, ya que tefras próximas al volcán presentan valores menores de sílice total que los contenidos en el material de la erupción inicial. Según Wilcox (1959) el material eruptado fue andesítico o dacítico con aproximadamente 64% de sílice, 16% de alúmina y 4% total de óxidos de hierro. Larsson (1937) estudió las variaciones en la composición total de las cenizas en relación a las grandes distancias respecto del volcán. Mientras la ceniza a 100 millas (161 Km) de distancia contenía 67,5% de sílice, a 500 millas (805 Km) tenía 70,25% y a 700 millas (1.126,5 km) 69,75%, incrementando un 6% de sílice con los cambios concomitantes en otros óxidos, comparado con el material eruptado cerca del conducto. Este cambio es considerado por aquel autor como el resultado del asentamiento de los constituyentes pesados de bajo sílice, tales como los piroxenos y la plagioclasa cálcica, dejando la ceniza remanente enriquecida en sílice.

Los análisis efectuados señalan concentraciones de  $\text{K}_2\text{O}$  mayores que las mencionadas por otros autores (Kittl, 1933; Fierstein *et al.*, 1989; Hildreth y Drake, 1992; Ruprecht *et al.*, 2012). El Volcán Quizapú tiene de por sí un alto contenido en ese óxido, como está documentado por la composición de las rocas del Complejo Volcánico Descabezado (Kittl, 1933; Hildreth y Drake, 1992). Kittl (1933) menciona la presencia de liparitas como producto de la erupción de 1932. Backlund (1923) considera a las liparitas como dacitas con alto K, lo que se manifiesta por la cristalización de sanidina. Por otra parte se puede también tener en cuenta la ocurrencia de procesos de pérdida parcial de sílice, lo que en la relación  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  puede manifestarse como un aumento relativo de este último. La pérdida parcial de sílice puede ocurrir por variabilidad diferencial en la estabilidad relativa de los minerales primarios a la meteorización (Aomine y Wada, 1962), la cual según estos autores se incrementa en el siguiente orden: vidrio volcánico < feldespato (andesina – labradorita)  $\leq$  hipersteno-augita < magnetita, mientras que la secuencia de

meteorización dominante es: vidrio volcánico – feldespato → alofana → halloysita. Estos cambios llevan al proceso de *desilicación* (Landaeta *et al.*, 1978) junto a una marcada pérdida de bases. El Al y el Fe se mantienen relativamente estables en el sistema. Si bien estos datos deberían ser confirmados a través de análisis más específicos, de acuerdo a los resultados obtenidos las relativamente altas concentraciones de K (Fig. 9) podrían expresarse en parte en términos de aquel proceso. Considerando la composición andesítica-dacítica de las tefras, las muestras representadas en ese diagrama con porcentajes de Si menores al 54 % podrían estar indicando las fracciones que han sufrido *desilicación*. La presencia de elementos minoritarios como  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  y  $Cu^{2+}$  puede ser considerada como productos propios de alteraciones de las trizas y de cambios post-depositacionales. El alto contenido de CuO en las muestras P5 V y P20 I (Fig. 8, Tabla 2) se asocia a la transformación por alteración química de las trizas en minerales de los Grupos de la halloysita y la alofana (Betejtin, 1977).

En cuanto a los efectos de la caída de cenizas en las inmediaciones de la Laguna Llanquanelo, las evidencias de campo indican que hubo cegamiento en los bordes más someros. Versiones orales de pobladores recolectadas por Ovando y Ramires (2009) indican que grandes áreas de la laguna se secaron durante los meses siguientes a la erupción. Ambas evidencias indican un nivel de la laguna más alto que el actual antes de la erupción, y de acuerdo a los registros de campo no volvió a aumentar el nivel en tiempos posteriores habida cuenta que no se ha hallado el nivel de tefras del Quizapú por debajo de depósitos lacustres. Adicionalmente, se puede determinar que la temperatura de las cenizas al momento de su caída ha sido elevada, a juzgar por el hallazgo de suelos con vegetación quemada (sitio P45, Fig. 3), hecho coincidente con los relatos de pobladores recopilados por Ovando y Ramires (2009) referidos a la caída de “cenizas calientes”.

Los volúmenes de tefras eyectadas (según los datos bibliográficos recogidos y mencionados oportunamente), particularmente aquellos relacionados a las partículas de tamaños respirables, además de su forma y composición química, señalan los potenciales efectos en la salud humana que habría producido la erupción. Partículas de diámetros menores a  $10 \mu m$  son capaces de introducirse en el sistema respiratorio humano, aunque las menores a  $4 \mu m$  son

consideradas potencialmente peligrosas para causar enfermedades respiratorias y eventualmente silicosis si contienen una alta proporción de sílice (Horwell *et al.*, 2003). Las distribuciones granulométricas (Fig. 4, Tabla 1) señalan un promedio de alrededor del 6% de partículas menores a  $10 \mu m$ . Considerando el volumen total de tefras liberadas por la erupción estimado por González Ferrán (1993), de  $150 \text{ ton km}^{-2}$ , aquella proporción equivale a  $\sim 9 \text{ ton km}^{-2}$  de partículas respirables ( $< 10 \mu m$ ), de las cuales un 35% es aún menor a  $4 \mu m$  ( $3,15 \text{ ton km}^{-2}$ ). Estos números deben ser tenidos en cuenta a los fines de evaluar el impacto social que este evento habría tenido en las poblaciones cercanas. Adicionalmente, la forma y fracturación de las partículas, en alta proporción con formas aguzadas y bordes angulosos, se suma al efecto nocivo que habrían sido capaces de producir en la salud, por su tamaño (fracción respirable) y permanencia en la atmósfera.

## CONCLUSIONES

Se han reconocido en los alrededores de la Laguna Llanquanelo, en el sur de la Provincia de Mendoza, los depósitos producidos por la erupción del Volcán Quizapú en 1932, los que constituyen un manto de tefras de pocos centímetros de espesor de extensión prácticamente continua a nivel regional. Las cenizas se encuentran sepultando tanto a sedimentos lagunares como a niveles de suelos y depósitos eólicos, demostrando el impacto ambiental producido.

Las características sedimentológicas y químicas de las tefras analizadas son compatibles con una erupción de tipo pliniano, de composición andesítica-dacítica, con producción de diferentes poblaciones granulométricas generadas durante los procesos de dispersión y depositación. Las fracciones modales de las dos poblaciones reconocidas se ubican en tamaños de 3-3,5  $\phi$  ( $125-88 \mu m$ ) y entre 4 y 7  $\phi$  ( $62 \text{ a } 8 \mu m$ ). La composición de las trizas señalaría una erupción magmática con componentes hidromagmáticos, determinados por su carácter textural. Se evidencian procesos de fragmentación durante la erupción. Los rasgos superficiales de las partículas responden a las características eruptivas, energía del transporte aéreo, contenido de gases y procesos post-depositacionales. Entre estos últimos se han determinado posibles transformaciones de las cenizas dando origen a incrementos relativos de

contenidos de K, Fe y Ti por procesos de desilicación resultantes de la dinámica de transporte y posible formación de halloysita y alofana por meteorización incipiente, con incremento en el contenido de Cu.

El tamaño de las partículas depositadas por la erupción comprende en gran parte fracciones “respirables” y nocivas para el sistema respiratorio (<10  $\mu\text{m}$ ) en una cantidad de unas 9 ton/km<sup>2</sup>, lo que debe ser tenido en cuenta para evaluar los potenciales efectos en la población que no eran conocidos al momento de la erupción y no fueron considerados por las poblaciones locales.

Estudios de esta naturaleza aportan a una clasificación sistemática y comparativa de la peligrosidad volcánica en la salud y la sociedad (en erupciones históricas y recientes), que están siendo aplicados a otros eventos eruptivos muy recientes ocurridos en el país como los de los volcanes Chaitén, Hudson, Copahue, Llaima, Peteroa y Puyehue-Cordón Caulle, y permitirán elaborar metodologías específicas para analizar la peligrosidad de actuales y futuros eventos volcánicos.

### Agradecimientos

Los resultados obtenidos forman parte de los Proyectos MINCyT-ANPCyT PICT 2006-1311 y PICT 2011-1268: “Geología y Geofísica de la Laguna Llanquanelo, región de Payenia, Mendoza” I y II respectivamente, orientados a reconstruir las características paleoambientales, paleoclimáticas y paleovolcánicas de esa región de la Zona Volcánica Sur de la cordillera andina. Se agradece la inestimable colaboración de la Lic. Andrea Romano (INTEMIN, SEGEMAR) por la operación técnica del SEM y EDS. La Lic. Débora Sabina D´Ambrosio (becaria doctoral del primer Proyecto arriba mencionado) efectuó el análisis granulométrico de parte de las muestras mediante tamizado en seco. Se agradece a dos revisores anónimos así como a la Editora de LAJSBA, Dra. Alfonsina Tripaldi, por los comentarios, críticas constructivas y sugerencias que permitieron mejorar substancialmente el contenido del trabajo.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, E.M. y M.R. Prieto, 1993. Vulcanismo y procesos de desertificación en el sur de Mendoza. La erupción del Quizapú de 1932 y sus efectos ambientales. *Primeras Jornadas Nacionales de Vulcanología, Medio Ambiente y Defensa Civil*. Asociación Geológica de Mendoza-Ministerio del Interior-Ministerio de Medio Ambiente de Mendoza-Subsecretaría de Ciencia y Técnica: 45-53.
- Aomine S. y K. Wada, 1962. Differential weathering of volcanic ash and pumice, resulting in formation of hydrated halloysite. *The American Mineralogist* 47:1024-1048.
- Arias, N., A. Arizmendi, P. Bitschene, M. Fernández, M. Giacosa, M. Griznik, M. Márquez y A. Nillni, 1992. La erupción del volcán Hudson y sus efectos inmediatos en la Patagonia argentina (Provincia de Santa Cruz). *Primera Reunión Argentina de Mineralogía y Metalogenia* Actas: 9-18.
- Auer, V., 1960. *The Quaternary history of Fuego-Patagonia*. Proceedings of the Royal Society of London 949, 152 pp.
- Backlund, H., 1923. *Der magmatische Anteil del Cordillere von Sued Mendoza*. Acta de la Academia Aboensis, Mathematica et Physica 2:1-298.
- Betejtin, A., 1977. *Curso de Mineralogía*. Editorial MIR, Moscú, 747 pp.
- Bonadonna, C. y B.F. Houghton, 2005. Total grain-size distribution and volumen of tephra-fall deposits. *Bulletin of Volcanology* 67:441-456.
- Bonadonna, C. y J. Phillips, 2003. Sedimentation from strong Volcanic Plumes. *Journal of Geophysical Research* 108 (B7) 2340.
- Brazier, S., R.S.J. Sparks, S.N. Carey, H. Sigurdsson y J.A. Westgate, 1983. Bimodal grain size distribution and secondary thickening in air-fall ash layers. *Nature* 301 (5896):115-119.
- Carey, R.J., B.F. Houghton y T. Thordarson, 2009. Tephra dispersal and eruption dynamics of wet and dry phases of the 1875 eruption of Askja Volcano, Iceland. *Bulletin of Volcanology* 72 (3):259-278.
- Carson, H.L., J.P. Lockwood y E.M. Craddock, 1990. Extinction and recolonization of local populations on a growing shield volcano. *Population Biology* 87:7055-7057.
- Casadevall, T.J. (Ed.), 1991. *First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*. Seattle, Washington, July 8-12, 1991. U.S. Geological Survey, Circular 1065.
- Corbella, H., R.A. Scasso, M. Lucero, M.E. Palacios, P.E. Tiberi, P. Rial y D. Pérez, 1991a. Erupción del Volcán Hudson - Agosto de 1991. Efectos sobre el territorio de la Provincia de Santa Cruz. *Publicación Científica de la Universidad Federal de la Patagonia Austral* 4:1-15.
- Corbella, H., R.A. Scasso, P. Rial, M.E. Palacios, M. Lucero, P.E. Tiberi y D. Pérez, 1991b. Hudson. *Bulletin of the Global Volcanism Network* 16:2-3.
- Daga, R., S. Ribeiro Guevara, M.L. Sánchez y M. Arribere, 2008. Source identification of volcanic ashes by geochemical analysis of well-preserved lacustrine tephros in Nahuel Huapi National Park. *Applied Radiation and Isotopes* 66:1325-1336.
- Daga, R., S. Ribeiro Guevara, M. Sánchez, y M. Arribere, 2010. Tephrochronology of recent events in the Andean Range (Northern Patagonia): spatial distribution and provenance of lacustrine ash layers in the Nahuel Huapi National Park. *Journal of Quaternary Science* 25:1113-1123.
- D´Ambrosio, D.S., R.A. Violante, A. García y E.I. Rovere, 2011. Análisis de testigos de la planicie lacustre occidental de la laguna Llanquanelo, Mendoza. *XVIII Congreso Geológico Argentino*, Neuquén (H. Leanza, M. Franchini, A. Impiccini, G. Pettinari, M. Sigismondi, J. Pons y M. Tunik, Eds.), Actas CD ISBN 978-987-22403-4-9.
- De la Vega, M., E. Lopez, A. Osella, E.I. Rovere y R.A. Violante, 2012. Quaternary volcanic-sedimentary sequences and evolution of the Llanquanelo lake region (Southern Mendoza,

- Argentina) evidenced from geoelectric methods. *Journal of South American Earth Sciences* 40:116-128.
- Delmelle, P., P. Gerin y N. Oskarsson**, 1980. Surface and bulk studies of leached and unleached volcanic ashes. *EOS Transaction, American Geophysical Union* 81 –F1311.
- Delmelle, P., M. Lambert, Y. Dufresne, P. Gerin y N. Oskarsson**, 2007. Gas aerosol- ash interaction in volcanic plumes: new insights from surface analysis of fine ash particles. *Earth and Planetary Science Letters* 259:159-170.
- Fierstein, J. y W. Hildreth**, 1992. The plinian eruptions of 1912 at Novarupta, Katmai National Park, Alaska. *Bulletin of Volcanology* 54 (8):646-684.
- Fierstein, J., P.E. Bruggman, A.J. Bartel, K.C. Stewart, J.E. Taggart Jr., R.E. Drake y W. Hildreth**, 1989. *Chemical analyses of rocks and sediments from central Chile*. U.S. Geological Survey, Open file Report 89-78, 13 p. <http://pubs.usgs.gov/of/1989/0078/report.pdf>.
- Froggatt, P.C. y D.J. Lowe**, 1990. A review of late Quaternary silicic and some other tephra formations from New Zealand: their stratigraphy, nomenclature, distribution, volume, and age. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 33:89-109.
- Gislason, S.R., T. Hassenkamb, S., Nedelb, N. Bovetb, E.S. Eiriksdottira, H.A. Alfredsona, C.P. Hemb y Z.I. Balogh**, 2011. Characterization of Eyjafjallajökull volcanic ash particles and a protocol for rapid risk assessment. *PNAS* 108 (18), 7311, [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1015053108](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1015053108).
- González Ferrán, O.**, 1993. Principales erupciones volcánicas en los Andes meridionales. Fuentes potenciales de peligros naturales y su impacto en el medio ambiente. *Primeras Jornadas nacionales de Vulcanología, Medio Ambiente y Defensa Civil*. Asociación Geológica de Mendoza-Ministerio del Interior-Ministerio de Medio Ambiente de Mendoza-Subsecretaría de Ciencia y Técnica:11-19.
- González-Ferrán, O.**, 1995. *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, 640 pp.
- Groeber, P.**, 1929. *Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes*. Dir. Gral. de Minas, Geología e Hidrología, Buenos Aires, Pub. N° 58 109 pp.
- Haberle, S. y S. Lumley**, 1998. Age and origin of tephra recorded in postglacial lake sediments to the west of the southern Andes, 44°S to 47°S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 84:239-256.
- Heiken, G.**, 1971. Tuff rings: examples from the Fort Rock – Christmas Lake Valley basin, south central Oregon. *Journal of Geophysical Research* 76:5615-5626.
- Heiken, G.**, 1972. Morphology and Petrography of volcanic ashes. *Geological Society of America Bulletin* 83:1961-1988.
- Hildreth, W. y R.E. Drake**, 1992. Volcán Quizapu, Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology* 54 (2):93-125.
- Horwell, C.J. y P.J. Baxter**, 2006. The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology* 69:1-24.
- Horwell, C.J., R.S.J. Sparks, T.S. Brewer, E.W. Llewellyn y B.J. Williamson**, 2003. Characterization of respirable volcanic ash from the Soufrière Hills volcano, Montserrat, with implications for human health hazards. *Bulletin of Volcanology* 65:346-362.
- Imbellone, P.A. y M.A. Camilion**, 1988. Characterization of the buried tephra layer in soils in Argentina. *Pédologie* 28:155-171.
- Kilian, R., M. Hohner, H., Biester y H.J. Wallrabe-Adams**, 2003. Holocene peat and lake sediment tephra record from the southernmost Chilean Andes (53-55°S). *Revista Geológica de Chile* 30 (1):23-37.
- Kittl, E.**, 1933. *Estudio sobre los fenómenos volcánicos y material caído durante la erupción del Grupo del “Descabezado”, en el mes de abril de 1932*. Anales del Museo Nacional de Historia Natural “Bernardino Rivadavia”, Buenos Aires, tomo XXXVII, Mineralogía y Geología, Publ. N° 13:321-364.
- Kreutz S. y M. Jurek**, 1932. Cendres volcaniques tombées en Avril 1932 á Buenos Aires. *Polskiego Towarzystwo Geologiczna Rocznik* (Krakow) 8:316-330.
- Landaeta, A., C.A. López y A. Alvarado**, 1978. Caracterización de la fracción mineral de suelos derivados de cenizas volcánicas de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 2 (2):117-129.
- Larsson, W.**, 1937. Vulkanische Asche vom Ausbruch des Chilenischen Vulkans Quizapú (1932) in Argentina gesammelt. *Bulletin Geological Institution of Uppsala* 26:27-52.
- Leonard, G.S., T.M. Wilson, C. Stewart, D. Johnston, P.J. Baxter, E.I. Rovere y G. Villarosa**, 2009. Lessons learned from the May 2008 to present eruption of volcán Chaitén, Chile. Emergency Management, evacuation, welfare and recovery. En: *Geological Society of America, Annual Meeting 2009, Portland (Oregon, USA). Session on Risks and Realities: Current Advances in Understanding Societal Risk and Resilience to Natural Hazards II*. Abstracts, Paper N° 164-12.
- Lowe, D.J. y J.B. Hunt**, 2001. A summary of terminology used in tephra-related studies. En: Juwigne, E.T. y Raynal, J-P. (Eds), *Tephra: Chronology, Archaeology*, CDERAD editeur, Gaudet. Les Dossiers de l’Archeo-Logis 1:17-22.
- Lunkenheimer, F.**, 1932. La erupción del Quizapu en abril de 1932. *Revista Astronómica Buenos Aires* 4:173-182
- Maria, A. y S. Carey**, 2002. Using fractal analysis to quantitatively characterize the shapes of volcanic particles. *Journal of Geophysical Research* 107 (B11), 2283, doi 10.1029.2001jg000822.
- Martin, R.S., S.E.L. Watt, D.M. Pyle, T.A. Mather, N.E. Matthews, R.B. Georg, J.A. Day, T. Fairhead, M.L.I. Witt y B.M. Quayle**, 2009. Environmental effects of ashfall in Argentina from the 2008 Chaitén volcanic eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 184:462-472.
- Mazzoni, M.M. y M.C. Destéfano**, 1992. Depositación sineruptiva y reelaboración temprana. Depósitos de caída de ceniza de la erupción 1991 del volcán Hudson. *Cuarta Reunión Argentina de Sedimentología*, Actas 1:203-210. La Plata.
- Miwa, T., A. Toramaru y M. Iguchi**, 2009. Correlations of volcanic ash texture with explosion earthquakes from vulcanian eruptions at Sakurajima volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 184 (3-4):473-486.
- Naranjo, J.A. y C.R. Stern**, 1998. Holocene explosive activity of Hudson Volcano, southern Andes. *Bulletin of Volcanology* 59: 291-306.
- Naranjo, J.A. y C.R. Stern**, 2004. Holocene tephrochronology of southernmost part (42°30’-45°S) of the Andean Southern Volcanic Zone. *Revista Geológica de Chile* 31 (2):225-240.
- Naranjo, J.A., H. Moreno y N.G. Banks**, 1993. *La erupción del volcán Hudson en 1991 (46°S), Región XI, Aisén, Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, Boletín 44:1-50.
- Newhall, C.G. y S. Self**, 1982. The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research (Oceans and Atmospheres)* 87:1231-1238.
- Nillni, A. y P. Bitschene**, 1995. Sedimentología y procesos de depositación de la tefra de caída de la erupción del volcán Hudson

- en agosto 1991. En J. Mendía y P. Bitschene (Eds), *The August 1991 eruption of the Hudson volcano (Patagonian Andes): a thousand days after*. Publicación Especial, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco y Servicio Nacional de Geología 116-134, Comodoro Rivadavia, Argentina.
- Nillni, A., M. Fernández, A. Arizmendi, N. Arias, M. Rodríguez y P. Bitschene**, 1992. Volcán Hudson: estudio granulométrico y composicional del material piroclástico eyectado. *Cuarta Reunión Argentina de Sedimentología*, Actas 3:73-80. La Plata.
- Orihashi, Y., J.A. Naranjo, A. Motoki, H. Sumino, D. Hirat, R. Anma y K. Nagao**, 2004. Quaternary volcanic activity of Hudson and Lautaro volcanoes, Chilean Patagonia: New constraints from K-Ar ages. *Revista Geológica de Chile* 31: 207-224.
- Osella, A., M. de la Vega, E. Lopez, E.I. Rovere y R.A. Violante**, 2010. Characterizing volcanic features using a frequency-domain Electromagnetic Induction System. *The Meeting of the Americas*, American Geophysical Union, Foz de Iguazu, Brasil, *Eos Transactions AGU* 91 (26), Abstract NS11B.
- Osella, A., M. de la Vega, E. López, E.I. Rovere y R.A. Violante**, 2011. Caracterización de secuencias sedimentarias lacustres y estructuras volcánicas en base a métodos geofísicos, laguna Llanquanelo, Mendoza. *XVIII Congreso Geológico Argentino*, Actas CD, Neuquén.
- Ovando, E. y A. Ramirez**, 2009. Recuerdos de Ceniza "El impacto de la Erupción del Quizapu (1932) en Malargüe a través de testimonios orales". *IX Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de Historia Oral de la República Argentina*. "Los usos de la Memoria y la Historia Oral". Buenos Aires: 29 pp.
- Reich, M., A. Zúñiga, A. Arrigo, G. Vargas, D. Morata, C. Palacios, M.A. Parada y R.D. Garreaud**, 2009. Formation of cristobalite nanofibers during explosive volcanic eruptions. *Geology* 37: 435-438.
- Rose, W.I. y A.J. Durant**, 2009. Fine ash content of explosive eruptions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 186 (1-2):32-39.
- Rovere, E.I. y G. Flores**, 2008. Volcanic Ash Advisory systems (VAAC), Llama volcano eruption (2/1/08). *IAVCEI General Assembly*. Abstracts: 2-D PO2. Reykjavic, Islandia.
- Rovere, E.I., R.A. Violante y J. Mendía**, 2006. The Argentine volcanoclastic stratigraphy: regional framework and multidisciplinary approach for its study and mapping. *E-ICES* 2, Malargüe, Mendoza, Volumen final: 47-56.
- Rovere, E.I., R.A. Violante, M.R. Rovere, R. Benedetti, P.E. Nuñez, T. Wilson y C. Stewart**, 2009. Volcanismo activo, tefrología, interacción con los ecosistemas y su impacto en la salud pública. Incidencia del Volcán Chaitén en territorio argentino. *E-ICES* 5, Acta de Resúmenes: 111-112. Malargüe.
- Rovere, E.I., R.A. Violante, A. Osella, M. de la Vega y A. Romano**, 2010a. Sedimentological characteristics of the Quizapú Volcano ashes erupted in 1932, Llanquanelo lake region, Mendoza (Argentina). *18th International Sedimentological Congress*, CD ISBN 978-987-96296-4-2, Abstract ID N° 405. Mendoza.
- Rovere, E.I., R.A. Violante, A. Osella, M. de la Vega y E. López**, 2010b. Reconstruction of the evolutive stages of Llanquanelo Lake and surroundings (southern Mendoza province, western Argentina). *GeoSur 2010, International Geological Congress on the Southern Hemisphere*, Mar del Plata. Bollettino di Geofisica 51:196-198.
- Rovere, E.I., C. Stewart, P.J. Baxter, T. Wilson, G. Leonard, D. Johnston, P.E. Nuñez, R.A. Violante, M.R. Rovere y A. Romano**, 2011. Evaluación de los impactos producidos por las cenizas del volcán Chaitén. *XVIII Congreso Geológico Argentino*, Neuquén, Actas CD ISBN 978-987-22403-4-9.
- Ruprecht, P. y O. Bachman**, 2010. Pre-eruptive reheating during magma mixing at Quizapu volcano and the implications for the explosiveness of silicic arc volcanoes. *Geology Geological Society of America*, 38 (10):919-922.
- Ruprecht, P., G.W. Bergantz, K.M. Cooper y W. Hildreth**, 2012. The crustal magma storage system of Volcán Quizapu, Chile, and the effects of magma mixing on magma diversity. *Journal of Petrology* 53 (4):801-840.
- Scarpa, R., M.G. Buceta y A. Romano**, 2008. Inferencias paleoclimáticas utilizando gasterópodos, ostrácodos y diatomeas del Cuaternario de la laguna de Llanquanelo, Mendoza. *XVII Congreso Geológico Argentino*, Actas II: 1047-1048. S.S. de Jujuy.
- Scasso, R. A. y S. Carey**, 2005. Morphology and formation of glassy volcanic ash from the August 12-15, 1991 eruption of Hudson Volcano, Chile. *LAJSBA, Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 12 (1):3-21.
- Scasso, R.A., H. Corbella y P. Tiberti**, 1994. Sedimentological analysis of the tephra from the 12–15 August 1991 eruption of Hudson volcano. *Bulletin of Volcanology* 56:121–132.
- Seymour, V.A., T.M. Hinckley, Y. Morikaua y J.F. Franklin**, 1993. Foliage damage in coniferous trees following volcanic ashfall from Mt. St. Helens. *Oecologia* 59 (2-3):339-343.
- Simkin, T. y L. Siebert**, 1994. *Volcanoes of the world*, 2nd. Edition. Geoscience Press in association with the Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, Tucson, Arizona, 368 pp.
- Smithsonian Institution**, 2012. *Global Volcanism Program*, <http://www.volcano.si.edu/world/list.cfm>.
- Stern, C.R.**, 1991. Mid-Holocene tephra on Tierra del Fuego (54°S) derived from the Hudson volcano (46°S): evidence for a large explosive eruption. *Revista Geológica de Chile* 18:139-146.
- Stern, C.R.**, 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* 31 (2):161-206.
- Villarosa G., V. Outes, H.A. Ostera y D. Ariztegui**, 2002. Tefrocronología de la Transición Tardío Glacial-Holoceno en el Lago Mascaradi, Parque Nacional Nahuel Huapi, Argentina. *XV Congreso Geológico Argentino*, El Calafate, Santa Cruz, Tomo II:699-704.
- Violante, R.A., A. Osella, M. de la Vega, E.I. Rovere y M.L. Osterrieth**, 2010. Paleoenvironmental reconstruction in the western lacustrine plain of Llanquanelo Lake, Mendoza. *Journal of South America Earth Sciences* 29:650-664.
- Walker, G.P.L.**, 1981. Plinian eruptions and their products. *Bulletin of Volcanology* 44 (3):223-240.
- Walkley, A. e I.A. Black**, 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.
- Watt, S.F.L., D.M. Pyle, T.A. Mather, R.S. Martin y N.E. Matthews**, 2009. Fallout and distribution of volcanic ash over Argentina following the May 2008 explosive eruption of Chaitén, Chile. *Journal of Geophysical Research* 114: B04207, doi 10.1029/2008JB006219.
- Wilcox, R.**, 1959. *Some effects of Recent Volcanic Ash falls with special reference to Alaska*. Geological Survey, Bulletin 1028-N. Washington D.C.
- Wilson, T.M., G.S. Leonard, C. Stewart, G. Villarosa, E.I. Rovere, P.J. Baxter, D. Johnston y S.J. Cronin**, 2009. Impacts on Critical Infrastructure following the May 2008 Chaitén Eruption in



- Patagonia, En: *Geological Society of America, Annual Meeting 2009*, Portland (Oregon, USA). Session on Risks and Realities: Current Advances in Understanding Societal Risk and Resilience to Natural Hazards II. Abstracts, Paper N° 164-10.
- Wilson, T., C. Stewart, H. Bickerton, P.J. Baxter, V. Outes, G. Villarosa y E.I. Rovere**, 2012. *The health and environmental impacts of the June 2011 Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex eruption: a preliminary report*. GNS Science Report 2012/20.
- Witham, C.S., C. Oppenheimer y C.J. Horwell**, 2005. Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 141:299-326.
- Wohletz, K.H.**, 1979. Evolution of tuff cones and tuff rings. *Geological Society of America*. Abstracts 11:543.
- Wohletz, K.H. y D. Kinsley**, 1982. Scanning electron microscopy of basaltic hydromagmatic ash. En: B. Whaley y D. Kinsley (Eds.), *Scanning Electron Microscopy in Geology*. Geo. Abstracts, Inc., Norwich, England. Also in: Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR 82-1433 (1978), 26 pp.