



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ANÁLISIS DE LITOFACIES Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS IGNIMBRITAS SALAR GRANDE, REGIÓN DE ATACAMA, ANDES CENTRALES DE CHILE (25°45'S – 26°15'S)

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

CRISTIÁN ANDRÉS RAMÍREZ SALVO

PROFESOR GUÍA:
JOSÉ ANTONIO NARANJO SOZA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ÁNGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ
MANUEL SUÁREZ DITTUS

SANTIAGO DE CHILE
2014

Resumen

Los depósitos de las ignimbritas Salar Grande del Mioceno superior, se distribuyen en los alrededores del salar homónimo, ubicado a los 26°S en la alta cordillera de la III Región de Atacama. Dichos depósitos están asociados al colapso de la caldera Salar Grande. En este trabajo se estudia las distintas litofacies de esta unidad ignimbrítica, correspondientes principalmente al *in flow* de la caldera. Las características observadas permiten definir dos subunidades e interpretar los mecanismos de depositación de algunas litofacies. Además, se dató circones de un nivel mediante el método U-Pb, para comparar con edades K-Ar realizadas en trabajos anteriores e interpretar su significado geocronológico.

Se elabora siete columnas estratigráficas a partir de observaciones de terreno y de la observación de imágenes satelitales en Google Earth. En ellas se identifica tobas macizas que presentan variaciones laterales con estratificación planar y difusa, intercaladas con brechas líticas, macizas y estratificadas, además de niveles soldados, localmente reomórficos y vitrofíricos. Adicionalmente se identifica la repetición de una sucesión de litofacies y una superficie de erosión (*hiatus*) entre ellas. Estos antecedentes permiten definir dos subunidades compuestas por, al menos, una unidad de flujo y una de enfriamiento en cada una de ellas. Algunos de los niveles de brecha se interpretan como brechas de arrastre generadas por colapsos sucesivos de sectores de la caldera Salar Grande, que aumentaron el aporte de fragmentos líticos a la corriente de densidad piroclástica.

Se calcula una edad U-Pb de $12,29 \pm 0,19$ Ma en circones de uno de los niveles de la subunidad superior y se interpreta como la edad de cristalización de los circones en la cámara magmática, antes de la erupción de la ignimbrita. La poca precisión y error analítico de los datos geocronológicos previos (K-Ar) impide establecer el lapso entre las edades de cristalización de los circones y la edad de la erupción, determinada a partir de las edades K-Ar. Una estimación utilizando la edad K-Ar más joven de la columna principal entrega el rango 400 ka.- 1.78 Ma. Por otro lado, se identificó xenocristales heredados y circones detríticos. Uno de los cristales tiene 17 Ma y se interpreta como circón detrítico de la unidad Ignimbritas Río Frío o de alguno de los volcanes del Mioceno inferior ubicados en los alrededores del Salar Grande. Circones agrupados en edades entre 212 y 324 Ma y 488 – 600 Ma, son interpretados como xenocristales heredados y circones detríticos. Aquéllos con borde recrystalizado, cuyas edades son cercanas a las de la ignimbrita (*ca* 12 Ma) pudieron ser incorporados por asimilación de la roca caja en la cámara magmática. Estos últimos reflejarían las unidades que estructuran el basamento en la zona de la Caldera Salar Grande.

*A ustedes, a los siete, mi sustento y razón,
por este paso virtual, por todo el trayecto,
por mi vida y lo que queda por recorrer*

Agradecimientos

A don Manuel Suárez y Ángelo Castruccio, miembros de la comisión, por su paciencia en la espera y lectura de un borrador bastante críptico, y por sus valiosas sugerencias.

A Blanca, por tramitar esto que parecía interminable.

A José Antonio Naranjo, por darme la oportunidad de entrar al Servicio, por transmitirme la importancia de la geología y como enfrentarla.

Al profe Pancho Hervé, porque conocí la geología gracias a él, por su espíritu, por su motivación.

A Víctor Villa, el tata, por nuestra amistad, porque que dedico parte importante de su tiempo a escucharme, apoyarme y corregirme.

A Laura Varas, Mauro Espinoza, fofito, también conocido como Javier Álvarez, Rodrigo Jorquera, Bucchi, Manolo Schilling, Hernán Bobadilla y a todos los que se refugian en el laboratorio de petrografía del 7mo, buscando aire fresco y describir cortes, por las conversas “académicas”, y por sobre todo, las conversas políticas, esas que abre puertas y posibilidades, esas con las que uno crece.

Al equipo de terreno, a los conductores del Sernageomin, al Gonzalo, José Luis, Roberto y Hugo, por el apoyo y la tranquilidad que brindan al andar sobre ruedas. Al Pancho Hevia, por todo el entusiasmo y la ayuda brindada en las alturas.

A Marcos Lienlaf y al polaco Jan, ambos me demostraban insistentemente su preocupación y apoyo, preguntándome más que todos cuando iba a terminar.

Al chuncho, también conocido como J. P. Contreras y Andy Tomlinson; sus importantes sugerencias me ayudaron a reforzar el capítulo de geocronología.

A los funcionarios, compañeros del laboratorio, José, Daniel, Eugenio, Eduardo, don Sergio, Sra. Eugenia y a todos los que forman parte de esa cadena, porque el importante trabajo que realizan a diario está reflejado en estas páginas. Al grupo de Geocronología, por el trabajo extra, particularmente a Marco Suarez, con quien pasamos largas horas frente al SEM y el ICP, además de compartir ideas y pizzas.

A mis compañeros, funcionarios y académicos de la U y del servicio, que de una u otro forma, aportaron a mi formación, y como consecuencia, a este trabajo. Particularmente a Jorge Quinteros, por mostrarme el permanente camino a la montaña.

Le agradezco de manera especial a la gente anónima, a ellos que diariamente, con el pan y sus impuestos, financiaron este trabajo. Muy probablemente nunca lo verán materializado en su vida cotidiana. Hay una deuda pendiente.

Finalmente y por sobre todo, a mi familia, a mis padres, mis abuelos y mi tía Ory, a mi hermano Tito, a mi Bárbara, mi compañera, al grow y al benja. Gracias a todos por su paciencia, apoyo y amor irrestricto, lo que soy es gracias a todos ustedes.

Esta memoria la escribí yo pero no es mía, nadie puede adueñarse de las ideas porque tienen una impronta colectiva, son el resultado de una construcción social, histórica y cotidiana.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Fundamentación	3
1.2 Ubicación y accesos.....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.5 Metodología.....	5
1.5.1 Trabajo en terreno.....	5
1.5.2 Análisis de litofacies.....	5
1.5.3 Geocronología U-Pb	5
2. Marco Geográfico.....	8
2.1 Relieves principales	8
2.2 Drenajes, lagos, glaciares y salares	8
2.2.1 Drenajes	8
2.2.2 Lagos	9
2.2.3 Salares.....	9
2.2.4 Glaciares	10
2.3 Clima y paleoclima.....	10
3. Marco Geológico	11
4. Antecedentes: Ignimbritas Salar Grande	13
4.1 Definición.....	13
4.2 Fuente	13
4.3 Geocronología	13
5. Resultados del análisis de litofacies	14
5.1 Marco teórico.....	14
5.2 Análisis de litofacies.....	16
5.2.1 Localidad Integrada N°1: Llano de la Laguna Seca Sur	17
5.2.2 Localidad integrada N°2: Portezuelo León Muerto.....	25
5.2.3 Localidad integrada N°3: Llano de las Lagunas Bravas	35
5.2.4 Localidad integrada N°4: Llano de la Laguna Seca norte.....	41
5.2.5 Localidad integrada N°5: Salar Grande norte	45
6. Resultados del análisis de circones.....	50
6.1 Marco teórico.....	50
6.1.1 Edades radiométricas.....	50

6.1.2 Imágenes de cátodo-luminiscencia.....	50
6.2 Caracterización de circones	51
6.2.1 Grupos	51
6.2.2 Casos particulares	55
6.3 Geocronología U-Pb.....	56
6.3.1 Concordia	56
6.3.2 Corrección plomo común	56
6.3.3 Histograma de edades.....	57
6.3.4 Edad integrada	58
7. Discusión	60
7.1 Análisis de litofacies.....	60
7.1.1 Columna Principal (Llano de la Laguna Seca sur).....	60
7.1.2 Correlación de localidades.....	62
7.2 Análisis de circones	67
7.2.2 Grupos	67
7.2.3 Edad integrada	70
8. Conclusiones.....	72
Bibliografía.....	74
Anexos.....	78

1. Introducción

Esta memoria de título se realizó en el marco del Plan Nacional de Geología (PNG) desarrollado por el Departamento de Geología Regional del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), que tiene por objetivo realizar la cartografía geológica 1:100.000 principalmente del norte de Chile. Múltiples campañas de terreno realizadas entre los años 2012 y 2014, asociadas al mapeo regional de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo León Muerto (Naranjo *et al.*, 2013) y Panteón de Aliste y Cerro Colorado (Naranjo *et al.*, en prep.), permitieron hacer observaciones y obtención de muestras para este estudio. Además, Sernageomin dispone de un completo laboratorio de petrografía, un microscopio electrónico de barrido (SEM) y un LA-ICP-MS que fueron utilizados para la realización de este proyecto.

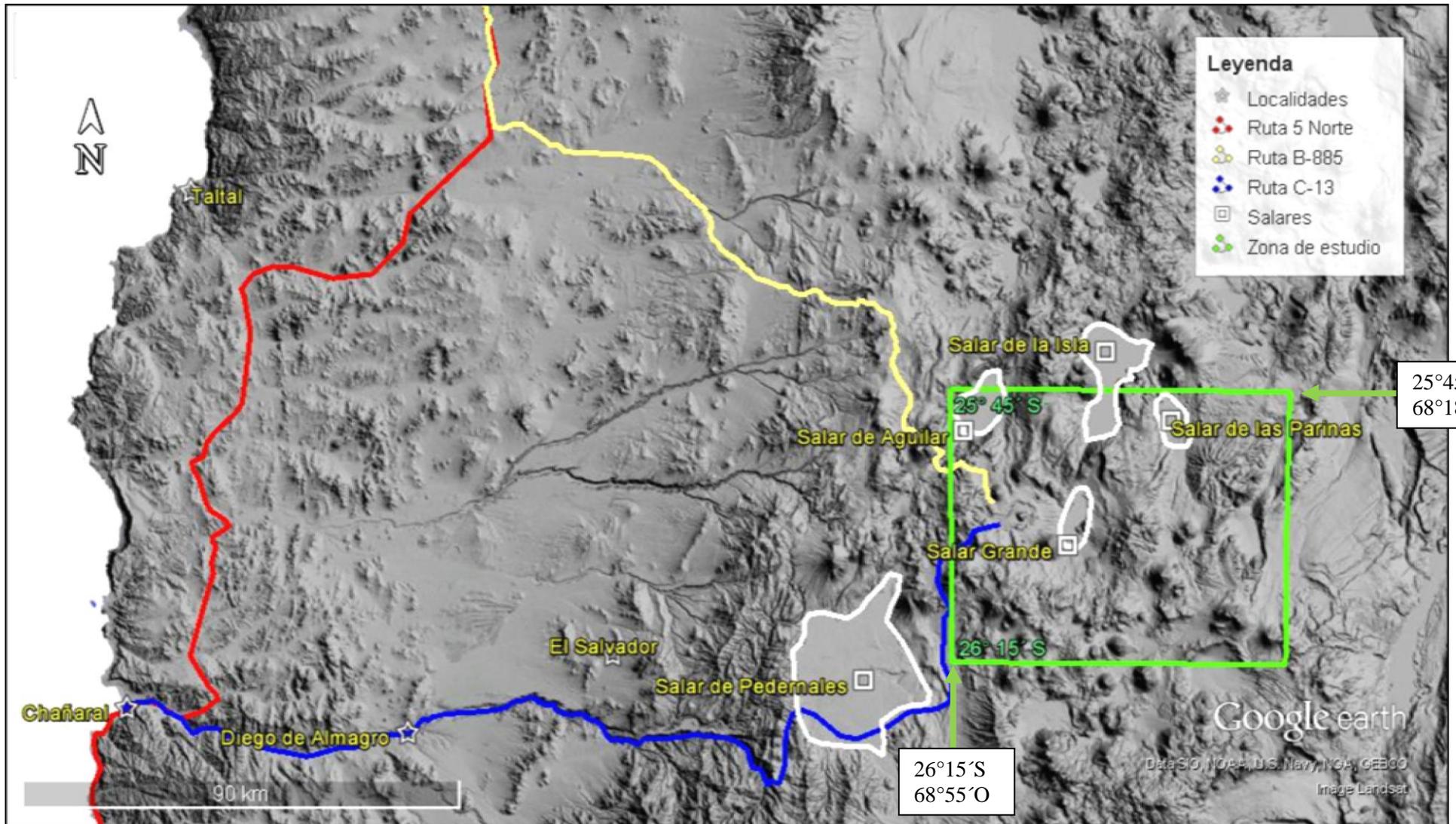


Figura 1.1 Rutas de acceso, principales localidades y salares como referencia geográfica. El recuadro verde señala la zona de estudio, entre los 25°45' S y 26°15' S.

1.1 Fundamentación

Catástrofes geológicas impactan de manera importante, local y globalmente la superficie de la tierra y su entorno (atmósfera). Esto ocurre particularmente en zonas de margen convergente activo como el borde occidental sudamericano, cuyo dinamismo somete ocasionalmente al continente a erupciones volcánicas, terremotos, tsunamis y distintos procesos de remociones en masa.

Uno de los fenómenos volcánicos más catastróficos está relacionado a colapso de caldera y generación de extensas ignimbritas, fenómeno no observado directamente, aunque ampliamente documentado en depósitos, para el Mioceno del norte de Chile, Argentina y Bolivia entre los 20° y 24° S, y en menor medida cartografiado y estudiado entre los 24° y los 28°S.

Dada la dificultad que existe para estudiar directamente una corriente de densidad piroclástica (comúnmente denominada “flujo piroclástico”) producida por una erupción explosiva de gran magnitud, es que el estudio de sus depósitos entregan antecedentes importantes de los mecanismos de emplazamiento y los regímenes del flujo que los formó (Sparks, *et al.*, 1976, Branney y Kokelaar, 2002).

El objetivo de este trabajo es estudiar las litofacies de las ignimbritas Salar Grande, relacionarlas a los mecanismos de depositación de las corrientes de densidad piroclásticas que las generaron. Además, comparar datos geocronológicos U-Pb en circones de este estudio con edades K-Ar realizadas en trabajos anteriores (Naranjo y Cornejo, 1992; Naranjo *et al.*, 2013, entre otros) e interpretar su significado geocronológico.

Se identificaron y caracterizaron las distintas litofacies utilizando la nomenclatura de Branney y Kokelaar (2002), y se realizó la datación puntual U-Pb en circones de uno de los niveles de esta unidad, utilizando un LA-ICP-MS. Para complementar el estudio, se caracterizaron los circones morfológica, texturalmente y geocronológicamente.

El estudio sistemático de la estratigrafía de las ignimbritas, sus relaciones de contacto, extensión y correlaciones regionales, es fundamental para cualquier investigación geológica. El estudio de las ignimbritas, es de particular importancia volcanológica, tectono-estratigráfica y cartográfica debido a que son excelentes marcadores cronoestratigráficos que permiten, entre otras cosas, estudiar la evolución volcánica y magmática del arco Andino (De Silva, 1988). Lo anterior debido a las características de su origen, breve tiempo de emplazamiento, gran extensión y distribución geográfica. En ese sentido la zona volcánica de los Andes centrales (ZVC, Stern, 2004), es una región idónea para este tipo de estudios, ya que contiene algunos de los depósitos ignimbríticos del Cenozoico superior más grandes del mundo, que llegan a cubrir extensiones de más de 20.000 km² con volúmenes que sobrepasan los 1000 km³ (de Silva, 1988; Naranjo *et al.*, 2014), con estados de preservación únicos.

1.2 Ubicación y accesos

La zona donde se distribuyen los depósitos de las ignimbritas Salar Grande y sus alrededores (en adelante “zona de estudio”, Fig. 1.1 y 1.2), corresponde a una franja definida entre los $25^{\circ}45'S$ - $26^{\circ}15'S$ y $68^{\circ}18'O$ - $68^{\circ}55'O$ aproximadamente. Las localidades más importantes son los pueblos de El Salvador y Diego de Almagro. El acceso al área se efectúa principalmente por dos sectores: por el Norte desde el km 1.165 de la Ruta 5 Norte, a través del desvío al sureste del km 34 del camino de tierra B-885. Por el Sur, desde la ruta C-13, que conecta Chañaral, Diego de Almagro y El Salvador con la ruta Internacional “Paso San Francisco”, hacia el Este. Con vehículo de doble tracción, es posible recorrer diversos sectores entre los caminos de tierra y huellas principales, aunque con dificultad, debido a las irregularidades del terreno volcánico y el peligro de entrapamiento en depósitos no consolidados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Estudiar las litofacies de las ignimbritas Salar Grande y relacionarlas a los mecanismos de depositación de las corrientes de densidad piroclásticas que las generaron. Además, comparar datos geocronológicos U-Pb en circones de este estudio con edades previas K-Ar e interpretar su significado geocronológico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar en detalle de las litofacies de los niveles de las ignimbritas Salar Grande utilizando la petrografía macro y microscópica.
- Datar puntualmente circones de uno de los niveles de las ignimbritas por el método U-Pb, utilizando un LA-ICP-MS y posteriormente comparar la edad con aquellas obtenidas previamente en K-Ar.
- Caracterizar las distintas poblaciones de circones textural y geocronológicamente, buscando rasgos que permitan definir la génesis de los cristales y su relación con la ignimbrita.

1.5 Metodología

1.5.1 Trabajo en terreno

Los datos y muestras utilizados en este estudio fueron recolectados en campañas de terreno realizadas principalmente entre el 2012 y 2014. No obstante, se utilizaron datos de terreno, fotografías y algunos cortes transparentes previos.

El autor participó en las 3 campañas de terreno que se realizaron en abril y mayo, 2013 (20 días de terreno efectivo) y en febrero-marzo 2014 (14 días de terreno efectivo). En dichos terrenos se revisaron más de 80 localidades en las cuales se obtuvo descripciones generales de los afloramientos, de la petrografía macroscópica, medición de espesores, fotografías, confección de perfiles y columnas estratigráficas. Se recolectaron cerca de 72 muestras, de las cuales se confeccionaron 25 cortes transparentes y se obtuvo 1 datación U-Pb en circones.

1.5.2 Análisis de litofacies

La descripción y el posterior análisis de las litofacies fueron realizados sobre la base de las anotaciones en libretas de terreno y la revisión de más de 1900 fotografías tomadas en las mismas campañas. Se utilizó Google Earth 7.0 para la fotogeología y para ordenar los datos de las localidades y fotografías georeferenciadas. Además, dada la alta resolución y calidad de las imágenes SPOT de Google Earth, sumado a las herramientas proyección en 3D fue posible realizar perfiles que permitieron correlacionar distintos niveles, además de los revisados en terreno. Los conceptos usados para la descripción y la nomenclatura de las litofacies se realizó utilizando los criterios definidos por Branney y Kokelaar (2002).

Se realizó la descripción de los cortes transparentes en el laboratorio de petrografía del Sernageomin.

1.5.3 Geocronología U-Pb

Se enviaron a molienda aproximadamente 2 kilos de roca, los cuales fueron chancados y posteriormente tamizados. Luego el concentrado fue inmerso en líquidos densos para posteriormente separar los circones con lupa binocular.

Se seleccionaron cerca de 200 circones con lupa binocular para la confección de una briqueta redonda de resina (*epoxy*) translúcida de aprox. 2.5 cm de diámetro. Los circones son dejados en la resina y se orientan aproximadamente en su largo mayor. Al secarse la resina, esta es pulida junto con parte de los circones. Con este procedimiento de pulido se tiene acceso a la parte interna de los circones y por lo tanto, la posibilidad de datar varios eventos asociados al crecimiento del circón.

Posteriormente fueron realizadas fotografías de cátodo-luminiscencia (CL) y BSE en el SEM (scanning electron microscopy) del laboratorio de Sernageomin. Estas fotografías fueron utilizadas para describir las zonaciones de los circones y elegir los puntos para las dataciones (Anexo 2 al 4). Del total, se seleccionaron 121 circones. En cada grano se seleccionó uno o más puntos para datación, completando un total de 147 puntos a datar. Los criterios de selección de puntos fueron los siguientes:

- Zonas externas (bordes) para aproximar al último evento de cristalización de cada circón.
- Zona central para detectar potenciales núcleos heredados o eventos de cristalización distintos. (Notar que datando en la parte central no necesariamente se está datando el núcleo del circón ya que según la preparación, forma y distribución de peso del cristal, el pulido podrá ser en la parte central u oblicua a alguno de los bordes).
- Zonas con contrastes evidentes en textura y zonación

Tanto la briqueta con los circones como las imágenes CL con los puntos seleccionados son sincronizadas en el LA-ICP-MS para la datación puntual. Además, se hace pasar luz transmitida por los cristales para detectar inclusiones que podrían alterar los resultados.

Los análisis se realizaron con un tamaño del spot de laser aprox. 30 μm . y se iteraron de la siguiente forma: se analizaron 3 estándares GJ1 (primario, *ca.* 609 Ma, Jackson *et al.*, 2004), 2 estándares MudTank (secundario, *ca.* 732 Ma, Black y Guldson, 1978), 6 circones de la muestra y posteriormente 2 estándares PlesoVice (secundario, *ca.* 337 Ma, Slama *et al.*, 2008) repitiendo la secuencia hasta completar los 147 puntos.

Con los resultados (Tabla del Anexo 2) se realizaron histogramas, gráficos de concordia y edades integradas utilizando ISOplot 3.75 en Microsoft Office Excel 2003. Se aplicaron los criterios de correcciones para el plomo común según el modelo de evolución descrito por Stacey y Kramers, 1975, automatizados en la función [SingleStagePbR(Age, WhichRatio)], de ISOplot.

Para calcular la edad integrada (considerando un conjunto de circones que se relacione al evento volcánico), se seleccionó el rango de edades más joven (de 10 a 15 Ma aprox.) y se calculó una edad “Tuffzirc” que genera un gráfico donde es posible visualizar las “colas” o edades que se salen del rango general. Con el rango de edades seleccionadas, se calculó la edad promedio ponderada (Weighted average age).

Para caracterizar los circones se describieron las zonaciones, hábitos y formas. Además, se midió el largo (L) y ancho (A) en el software Adobe Illustrator CS5 (Fig. 1.2) para obtención de razones de tamaño. Con las proporciones A:L se realizaron histogramas en Excel eligiendo como intervalos de clases las fracciones exactas 1:6, 1:5, 1:4, 1:3, 1:2 y 1:1 como puntos medios del intervalo.

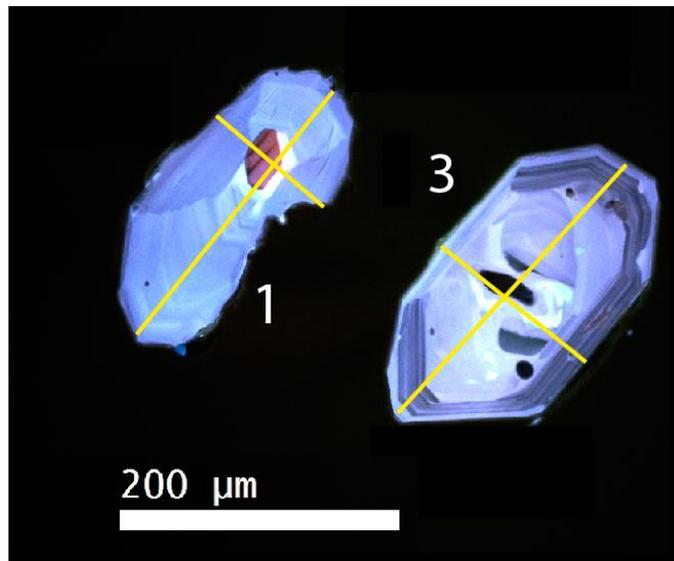


Figura 1.2- Ejemplo de medición de largo (L) y ancho (A) de circones para el cálculo de razones. El número blanco fuera del círculo tiene correspondencia con cada cristal en la tabla del Anexo 2. Tamaño del laser (circunferencia roja) de 30 μm .

2. Marco Geográfico

2.1 Relieves principales

Los principales relieves a nivel regional son la cordillera de la costa, la cordillera de Domeyko, y la cordillera de Claudio Gay y la cordillera de los Andes.

La cordillera de la costa representa un cordón montañoso paralelo al margen continental a lo largo de la costa pacífica, de orientación preferentemente N-S, con un ancho de aprox. 48 km y alturas máximas cercanas a las 1.400 msnm.

La cordillera de Domeyko, generalmente se presente como un cordón montañoso de orientación preferente N-S. A las latitudes de la zona de estudio, al oeste del salar de Pedernales, tiene un ancho aproximado de 50 km y una altura máxima de 4.147 msnm.

Entre la cordillera de a costa y Domeyko se encuentra la depresión central, representada por una superficie suavemente inclinada hacia el oeste, con una extensión local de 40 km aprox.

La cordillera de Claudio Gay es un relieve de menor envergadura, pero fácilmente identificable, como un cordón montañoso N-S que cruza de norte a sur las cuencas de los salares Pedernales y Maricunga, donde tiene una extensión aproximada de 95 km, un ancho máximo aprox. de 14 km y altura máxima de 5.295 msnm.

La cordillera de los Andes está caracterizada por cuerpos volcánicos (conos compuestos, domos y cráteres) así como también cordones volcánicos dentro de los cuales destaca la Sierra Nevada - Cordón de los Cuyanós, de orientación NW-SE, que conforma las mayores alturas de la zona (hasta los 6.127 msnm.). Entre la cordillera de domeyko y los Andes se encuentran, en estas latitudes, las cuencas de los salares de Pedernales y Maricunga.

2.2 Drenajes, lagos, glaciares y salares

2.2.1 Drenajes

La parte norte de la alta cordillera se caracteriza por la ausencia de ríos y cursos de agua importantes, salvo esteros estacionales como los observados en la Qda. Panteón de Aliste, que cruza de este a oeste la parte norte de la cordillera de Claudio Gay, entre otros. En la parte sur, descendiendo de cordillera (Sierra Nevada y cordones volcánicos más al sur), el único afluente importante en el área, el río Juncalito que desemboca en la cuenca del salar de Pedernales, en el sector conocido como La Ola (Tranque perteneciente a la Mina El Salvador, de Codelco). Este río tiene como único tributario importante al río Negro.

2.2.2 Lagos

Los lagos de la zona, nombrados generalmente como “lagunas”, de norte a sur, son:

- **Laguna de las Parinas**, con un área y altura aproximada de 0,18 km² y 4.317 msnm. respectivamente.
- **Laguna del Bayo**, que tiene un área y altura aproximada de 1,12 km² y 4.235 msnm. respectivamente.
- **Lagunas del Jilguero**, que consta de dos cuerpos de agua conectados entre sí, que coexisten con finos niveles salinos. Cada uno tiene un área y una altura aproximada de 2,42 km² y 1,12 km² a 4.185 msnm.
- **Lagunas Bravas**, que consta de dos cuerpos de agua principales unidos entre sí por una franja de depósitos salinos. Tienen un área y altura aproximada, 7,9 km² y 1,1 km² a 4.230 y 4.235 msnm respectivamente.

2.2.3 Salares

Los principales salares del lado chileno, de norte a sur son:

- **Salar de la Isla** con un área y altura aproximada de 160 km² y 3965 msnm. respectivamente.
- **Salar de Aguilar** con un área y altura aproximada de 82 km² y 3325 msnm. respectivamente.
- **Salar de las Parinas** con un área y altura aproximada de 43 km² y 2969 msnm. respectivamente.
- **Salar de Infieles** con un área y altura aproximada de 15 km² y 3545 msnm. respectivamente.
- **Salar Grande** con un área y altura aproximada de 31 km² y 3980 msnm. respectivamente.
- **Salar de Pedernales** con un área y altura aproximada de 318 km² y 3360 msnm. respectivamente.
- **Salar de Piedra Parada** con un área y altura aproximada de 30 km² y 4132 msnm. respectivamente.

2.2.4 Glaciares

Tres glaciares se ubican sobre los 5.800 msnm en la Sierra Nevada y constituyen los primeros glaciares de norte a sur, después de aquel ubicado en el Vn. Sillajhuay, en la I Región de Tarapacá, en la frontera con Bolivia, a 750 km de distancia. Los glaciares de ese volcán se ubican sobre los 5.600 m.s.n.m. (Inventario Glaciar Randolph, RGI, 2013).

2.3 Clima y paleoclima

El área presenta un clima desértico marginal de altura con escasas precipitaciones, de nieve en invierno y pluvial en la temporada estival. Las temperaturas, generalmente bajas, se caracterizan por su fuerte oscilación diaria. Habitualmente, el viento incrementa su intensidad a partir del mediodía y tiene una dirección NW predominante. Durante grandes tormentas eólicas, da origen a una cubierta salina comúnmente depositada sobre las laderas de volcanes ubicados al sur-sureste de los salares, las cuales adquieren una coloración grisácea distintiva.

La condición hiperárida actual del desierto de Atacama y los contrafuertes occidentales de los Andes, generalmente se atribuye a la acción combinada de la corriente fría de Humboldt y del anticiclón subtropical del Océano Pacífico suroriental (Lettau, 1978) en una zona subtropical de altura. La presencia de la Cordillera de los Andes refuerza la hiperaridez pues actúa como una barrera eficaz para detener las masas de aire húmedo provenientes de la cuenca amazónica y Argentina central (Alpers y Brimhall, 1988). Según estos autores, las condiciones climáticas actuales de la región son consecuencia de un proceso paulatino de desecación climática, desde el Mioceno medio, probablemente relacionado a un notable decrecimiento de la temperatura de las aguas marinas costeras, aportadas por la corriente de Humboldt ancestral. Lo anterior ha permitido que en la zona de estudio, una preservación de los depósitos y estructuras volcánicas originales observada en pocas partes del mundo.

3. Marco Geológico

El área de estudio comprende la parte sur de la Zona Volcánica Central (ZVC o Central Volcanic Zone (CVZ, Stern, 2004) ubicada en la Cordillera Occidental y parte de la Puna Occidental. Allí el volcanismo Cenozoico superior está representado por depósitos generados en el lapso Oligoceno superior - Holoceno (reciente) e incluyen principalmente estratovolcanes predominantemente andesíticos e ignimbritas riódacíticas generadoras de caldera (de Silva, 1987; Naranjo *et al.*, 2014).

Según varios autores, el ZVC coincide espacial y temporalmente con la formación del *plateau* Altiplano-Puna (Isacks, 1988; Allmendinger *et al.*, 1997). El alzamiento de este “bloque”, cuyas alturas superan los 3.000 msnm, se habría producido debido un importante acortamiento cortical, que habría generado espesores en la corteza de hasta 70 km, y además, aportes del magmatismo de subducción y procesos de delaminación cortical (Allmendinger *et al.*, 1997; Jordan *et al.*, 2010).

A continuación se describen en orden estratigráfico las principales unidades que afloran en la zona de estudio, principalmente en Chile y en menor medida en Argentina.

Las rocas más antiguas afloran en Argentina, al NE de la Laguna Colorada y corresponden a esquistos cuarzo-micáceos, ortogneises micáceos y anfibolitas cuyo protolito fue asignado al Proterozoico superior - Cámbrico, y la edad de metamorfismo calculada en 509 Ma (Seggiaro *et al.*, 2007). En la misma zona aflora el Granito Cerro Plegado, que intruye las rocas metamórficas anteriores. Edades de 464 a 467 Ma, U/Pb en titanita permiten asignarlo al Ordovícico (Seggiaro *et al.*, 2007).

Al este del Salar de las Parinas afloran rocas volcánicas compuestas por tobas soldadas y pórfidos riolíticos, además de lavas macizas de la Fm. La Table y, unidades subvolcánicas y plutónicas contemporáneas. Edades U-Pb en circones de pórfidos riolíticos arrojan $265,1 \pm 2,6$ y $270,7 \pm 4$ Ma (Naranjo *et al.*, 2013). En contacto gradual con las anteriores, el Granito Parinas, que corresponde a un Monzogranito de biotita, cuya edad U-Pb en circones tiene un valor de $266,8 \pm 4$ Ma (Naranjo *et al.*, 2013). Intruye las unidades anteriores la Granodiorita León Muerto, plutón leucocrático equigranular de grano grueso, de biotita y anfíbola. Naranjo y Cornejo (1992) obtuvieron una edad en K-Ar en biotita de 246 ± 6 Ma y Naranjo *et al.*, (2013) presentan una edad U-Pb en circones de $253,7 \pm 1,9$ Ma para esta unidad intrusiva.

Al este del Salar de Pedernales, en la Sierra de Aliste, parte norte de la Cordillera de Claudio Gay, afloran lavas porfíricas, tobas y pórfidos riódacíticos de la Fm. La Tabla (Pérmico-Triásico), relacionados espacio-temporalmente con granitoides del mismo lapso (Clavero *et al.*, 1998). Una de las unidades intrusivas posee una edad U-Pb en circón de $263,8 \pm 3,4$ Ma (Naranjo *et al.*, en prep.).

Las unidades de volcanes del Cenozoico han sido divididas en seis conjuntos del Mioceno al Pleistoceno superior (Naranjo y Cornejo, 1992; Clavero *et al.*, 1998; Naranjo *et al.*, 2013). Los volcánes de los seis conjuntos presentan similitudes en la forma que los componen. Posiblemente la única diferencia a esta escala es el predominio de volcanes compuestos de mayor tamaño en el Conjunto Volcánico del Mioceno inferior a medio y, localmente, de edificios pequeños en el Conjunto Volcánico Mioceno superior – Plioceno inferior (Villa, 2013). Los depósitos asociados a estos conjuntos incluyen lavas, domos, flujos piroclásticos y distintos tipos de depósitos clásticos (avalanchas, block and ash, etc.) asociados a estratovolcanes, conos piroclásticos y calderas de explosión (Naranjo y Cornejo, 1992; Naranjo *et al.*, 2014). Por otro lado, los depósitos más abundantes, tanto en volumen como en extensión corresponden a ignimbritas, intercaladas en los conjuntos volcánicos, asociadas al colapso de calderas (De Silva, 1988; Naranjo y Cornejo, 1992; Naranjo *et al.*, 2013; Naranjo *et al.*, 2014). Las principales del área son las siguientes:

Ignimbritas de los grupos Río Frío-Pajonales (24-15 Ma) y Vega Helada-Río Juncalito (22-16 Ma). Estas se habrían originado en múltiples colapsos del sistema de calderas Aguilar-Infieles (~42 km y 38 x 23 km) y habrían alcanzado entre 2.000 y 3.000 km³. Las ignimbritas del Grupo Salar Grande-San Andrés (12-9 Ma, ~550 km³), formadas en la caldera Salar Grande (50 x 25 km). Contemporáneamente, se formó la caldera Los Colorados (33 km) ubicada 20 km al NE del Salar de las Parinas, que dio origen a la ignimbrita del mismo nombre (~500 km³). A los 5 Ma la erupción de la ignimbrita Parinas (85 km³) provocó el colapso de la caldera Pampa de Los Bayos (14 km). Más al sur, las ignimbritas Laguna Verde 1 y 2 (~1.000 km³) fueron originadas entre los 4-3 Ma por los colapsos del sistema de calderas Laguna Amarga-Laguna Escondida (~33 km y 40 x 16 km).

4. Antecedentes: Ignimbritas Salar Grande

4.1 Definición

La ignimbrita Salar Grande es identificada por primera vez por Naranjo y Cornejo (1992), y fue descrita como “tobas de cenizas, pómez (lapilli grueso) y cristales (plagioclasa y biotita) rosáceas y blancas, intensamente soldadas a no-soldadas, niveles ricos en líticos”. Posteriormente fue enmendada por Naranjo *et al.*, (2013) como “sucesión de unidades de flujo ignimbríticos, rosáceas, blancas y amarillas, con grados variables de soldamiento, que afloran en los alrededores del salar Grande, principalmente al este”. Clavero *et al.*, (1998), describen esta unidad como una sucesión de tobas dacíticas a riódacíticas con un espesor máximo expuesto de 150m. Se disponen sobre lavas andesíticas a dacíticas del Mioceno medio y están parcialmente cubiertas por lavas andesítico-basálticas del Mioceno Superior y depósitos de gravas del Mioceno Superior-Plioceno.

4.2 Fuente

Naranjo y Cornejo (1992), asignan tentativamente la caldera Aguilar ubicada en el área del Salar de Aguilar como posible fuente de la ignimbrita Salar Grande. Posteriormente, Naranjo *et al.*, (2013), identifican en el área del Salar Grande una estructura de caldera (Fig. 5.2) de 50x25 km (Naranjo, *et al.*, 2014) y la asigna como fuente más probable.

4.3 Geocronología

Los datos geocronológicos realizados a distintos niveles de la ignimbrita Salar Grande, que están disponibles en la literatura, se encuentra resumidos en la tabla del Anexo 1. Las edades, principalmente realizadas en el método K-Ar en biotita o roca total, varían entre 12.7 ± 0.6 Ma y 8.5 ± 1.7 Ma (Naranjo y Cornejo, 1992; Clavero *et al.*, 1998; Naranjo *et al.*, 2013).

5. Resultados del análisis de litofacies

5.1 Marco teórico

El término “ignimbrita” posee distintas definiciones en la literatura. Podemos considerarlo en general como depósito generado por una corriente piroclástica de densidad (CPD o PDC por sus siglas en inglés) independiente de su composición y volumen, generalmente rico en pómez, cenizas y distintas proporciones de fragmentos líticos. Las características del flujo que las genera las ignimbritas y el mecanismo de depositación ha sido materia de controversia durante años (Branney y Kokelaar, 2002).

Los modelos más aceptados se relacionan con dos “paradigmas”. Los flujos depositan sus productos principales de manera agradacional, capa por capa (Fischer *et al*, 1966, Branney y Kokelaar, 2002) o *en masse* (Sparks, 1976, Wilson *et al*, 1986, Walker *et al*, 1982). Este último mecanismo reflejaría las características del flujo al momento de la depositación, mientras que el primero refleja las condiciones de depositación y características del flujo en la interfaz entre el depósito agradacional y el flujo (“flow boundary zone” de Branney y Kokelaar, 2002).

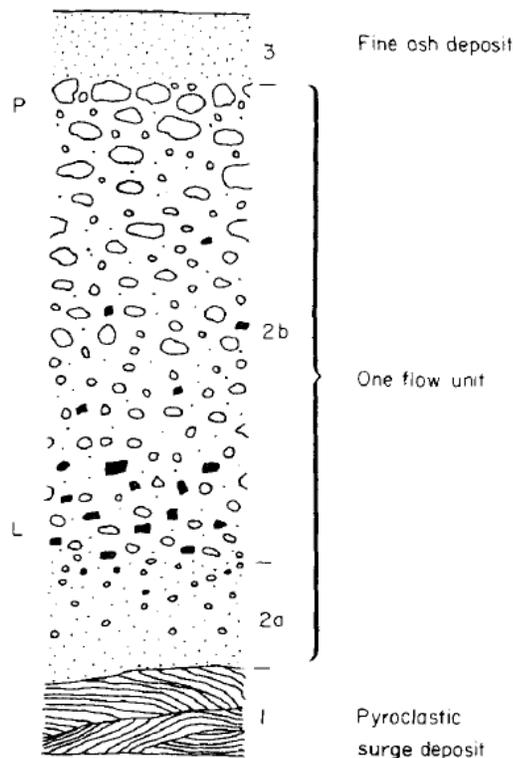


Figura 5.1- Columna esquemática de una unidad de flujo ignimbritico estandar (*Standard flow unit*) definida en Sparks *et al.*, (1973).

Sparks *et al.*, (1973), definen el concepto de “unidad de flujo ignimbrítico estándar” (Standard ignimbrite flow unit) como un flujo granular, parcialmente fluidizado, de alta concentración y poca expansión. En este flujo piroclástico, los fragmentos líticos y pómez son segregados generando las capas definidas como Layer 2a y 2b (Fig. 5.1). Definen además, la capas Layer 1 y 3 como procesos relacionados a la erupción, pero independientes del flujo (Layer 1: Oleada piroclástica o “surge” y Layer 3 como depósito de caída). Por otro lado Branney y Kokelaar (2002) definen como corriente de densidad piroclástica una mezcla inhógena de partículas volcánicas (piroclastos) y gas que fluye debido a su densidad, relativa al fluido que la envuelve (aire o agua) y a la gravedad. Además, consideran los flujos piroclásticos y las oleadas piroclásticas como dos escenarios distintos, pudiendo ser generados por una misma corriente, en cuyo caso su carácter queda determinado por las características de los regímenes de flujo y las condiciones de depositación en la “Zona límite de flujo” (*Flow boundary zone*). Cabe destacar que la definición de unidad de flujo para estos autores se refiere al “depósito de una corriente discreta”, por lo que su reconocimiento exige tener evidencias del cese de esta corriente, porque de otra forma, los quiebres en la estratificación podrían explicarse también por agradación de una corriente que cambia sus parámetros (velocidad, capacidad de carga, fluidez, entre otros) en tiempo y espacio.

5.2 Análisis de litofacies

A continuación se describen y clasifican las principales litofacies de las ignimbritas Salar Grande. Las distintas secciones fueron agrupadas en 5 localidades que integran varios puntos individuales revisados en terreno (Fig. 5.2). La clasificación de las litofacies se realizó utilizando la nomenclatura de Branney y Kokelaar, (2002).

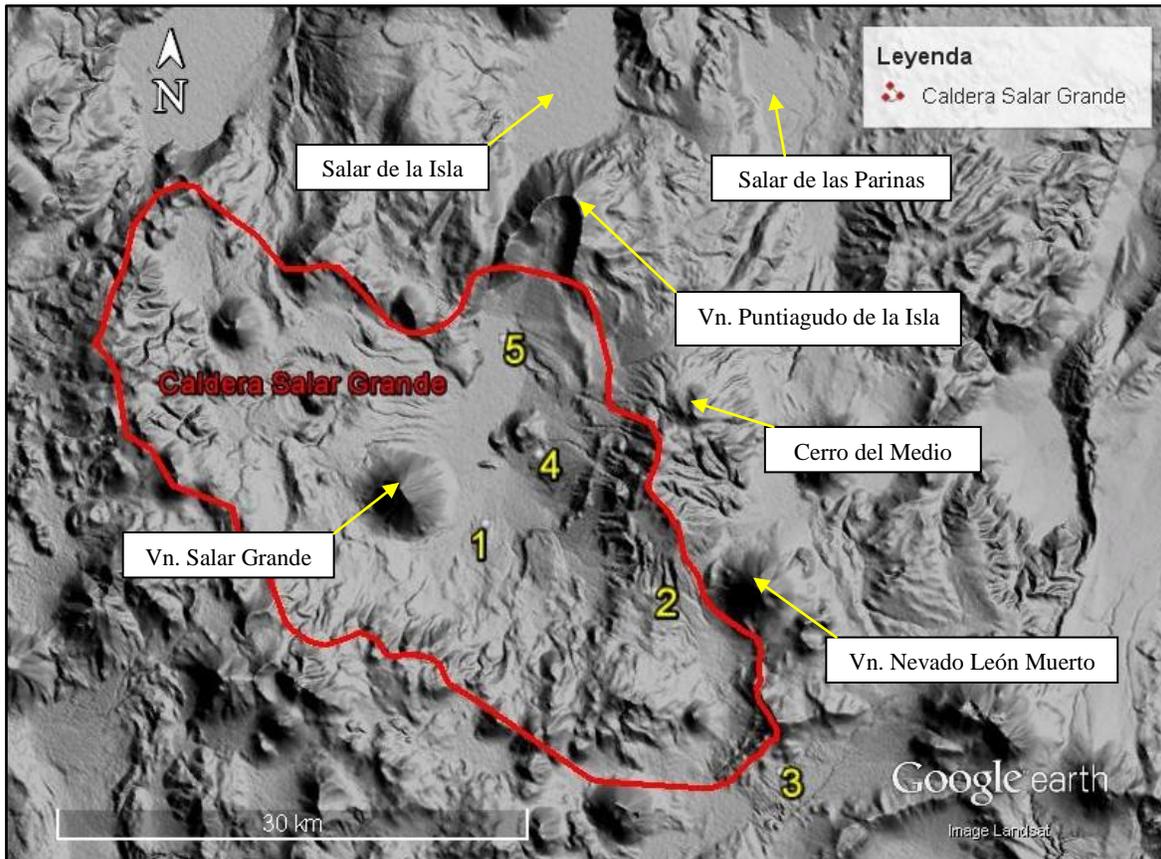


Figura 5.2- Zona de estudio ($25^{\circ}45'S$ - $26^{\circ}15'S$), localidades integradas, traza de la caldera Salar Grande (Naranjo *et al.*, 2013), volcanes y salares como referencia geográfica. 1: Llano de la Laguna Seca sur. 2: Portezuelo León Muerto. 3: Llano de las Lagunas Bravas. 4: Llano de la Laguna Seca norte. 5: Salar Grande norte.

5.2.1 Localidad Integrada N°1: Llano de la Laguna Seca Sur

Descripción general:

Los principales, mejor expuestos y más completos afloramientos de las ignimbritas Salar Grande, se ubican en el sector suroriental del Salar Grande y el Llano de la Laguna Seca (Fig. 5.2). Se revisaron 21 localidades de terreno y se confeccionó un perfil integrado representado por una columna estratigráfica compuesta de 120 m (Fig. 5.3) sobre la base de las características litológicas y la continuidad lateral observada tanto en terreno como en imágenes aéreas (Google Earth).

Estratigrafía local:

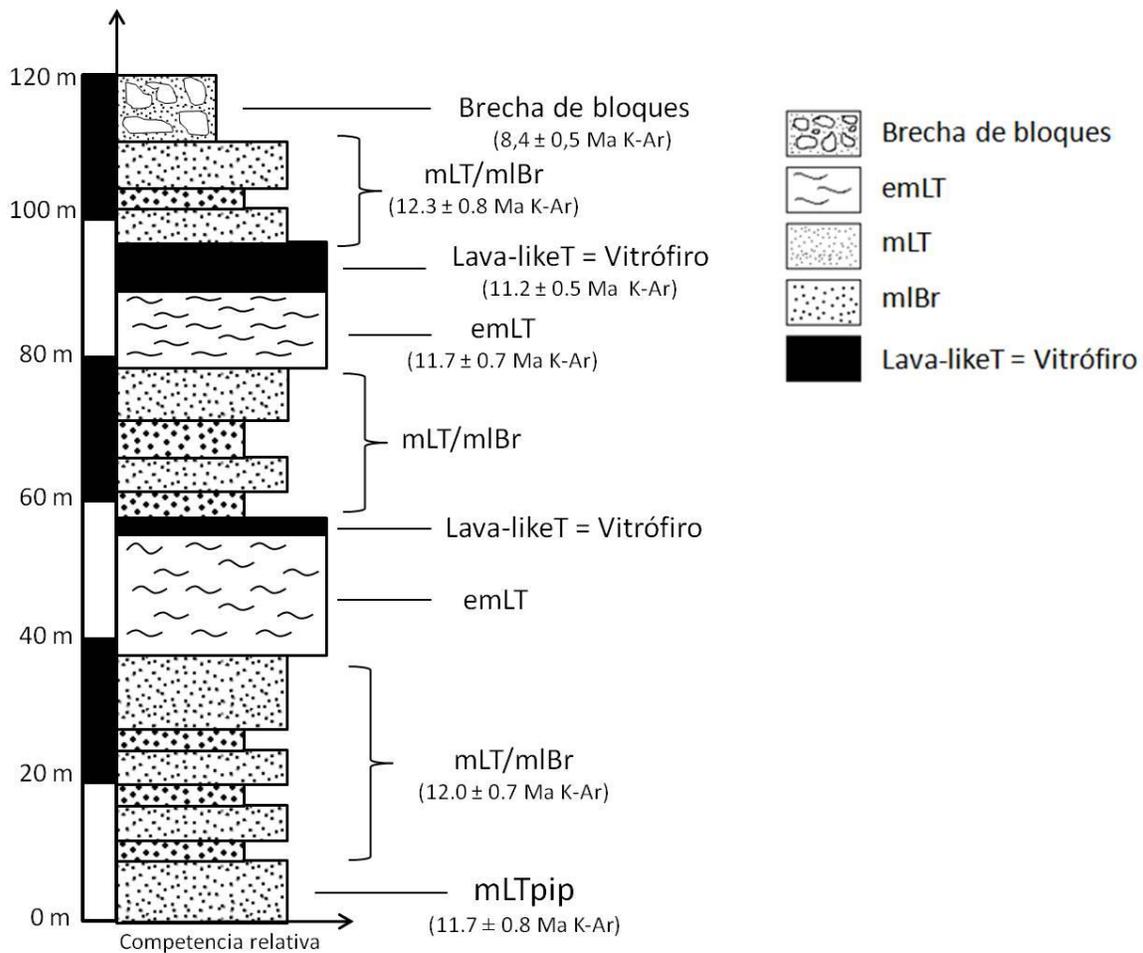


Figura 5.3- Columna integrada principal de la localidad N°1 Llano de la Laguna Seca sur con la clasificación de sus litofacies volcánicas (Branney y Kokelaar, 2002) y edades K-Ar de Naranjo y Cornejo (1992), y Clavero *et al.*, (1998).

No fue posible observar la unidad (base) que subyace en esta localidad los niveles de la ignimbrita. La sección principal (Fig. 5.3 y Fig. 5.4) de la sucesión se encuentra bajo depósito brechoso de bloques porfíricos con fragmentos juveniles prismáticamente fracturados y lavas miocenas. El depósito fue datado en uno de sus clastos, en $8,4 \pm 0,5$ Ma K-Ar en roca total. La lava fue datada en $9,2 \pm 0,5$ Ma K-Ar en roca total (ambas en Clavero *et al.*, 1998).



Figura 5.4- Vista general hacia el sur de la columna principal de la Localidad N°1. (De base a techo aprox. 120 m).

Descripción del perfil

0 – 40 m

Los niveles basales de la columna compuesta tienen expuestos aproximadamente 40 metros de espesor de tonalidad general blanca, y un nivel amarillo en la parte superior (Fig. 5.5A).

Debido a que son niveles fácilmente disgregables, los afloramientos son esporádicos, encontrándose en general cubiertos por un talud de bloques y fragmentos líticos más pequeños (Fig.5.4). Los niveles inferiores son litológicamente ricos en ceniza y pómez blancas en varias poblaciones en general de tamaño de hasta 5 cm, localmente de hasta 10 cm. En menor cantidad líticos porfíricos rojizos y morados tamaño lapilli. Al corte transparente se observan abundantes cristales y fragmentos de cristales de plagioclasas y en menor medida biotita, además de fragmentos líticos porfíricos, pómez fibrosas en matriz de esquirlas. Presenta intercalación subordinadas de niveles brechosos de hasta 30 cm, con variaciones longitudinales constituidos por clastos en su mayoría porfíricos de hasta 10 cm, pero generalmente menores a 5 cm. Estos niveles, a su vez, presentan intercalaciones de niveles ricos en cenizas centimétricos.

El contacto de estos niveles brechosos ricos en líticos con el nivel subyacente es levemente irregular y sinuoso, formando pequeños desniveles o depresiones (menores a 10 cm) que coinciden en general con pipas de elutriación de hasta 15 cm de ancho, pobres en finos y ricas en pómez y menor cantidad de fragmentos líticos lapilli provenientes del nivel inferior (Fig. 5.5B). Estas características permiten clasificar estas litofacies basales como *toba de lapilli maciza con pipas de elutriación (mLTpip)*.

A partir de los niveles brechosos se observa algunos metros con gradación inversa desde tamaño ceniza a pómez y líticos lapilli hasta ser tapados por el talud. Sin embargo, a pesar de estar tapado muestran, en ciertos sectores, una estratificación difusa escalonada que podría reflejar diferencias granulométricas y de densidad (Fig. 5.5A). En la parte superior aflora nivel amarillo de hasta 5 m expuestos, con variaciones laterales del espesor, rico en ceniza y pómez de tonalidades mayoritariamente amarillo claro, también rosado claro y en menor cantidad blancas de hasta 5 cm. Líticos porfíricos negros vítreos y pardo rojizos de hasta 5 cm. Distintas proporciones de cristales principalmente de biotita, plagioclasa y cuarzo (Fig. 5.5C). No fue posible observar el contacto con los niveles inferiores tapados por el talud.

Las litofacies anteriores, que corresponden a los primeros 40 m de la columna (Fig. 5.3) fueron clasificadas como una intercalación de *brechas líticas macizas (mlBr)* y *tobas de lapilli macizas (mLT)*.

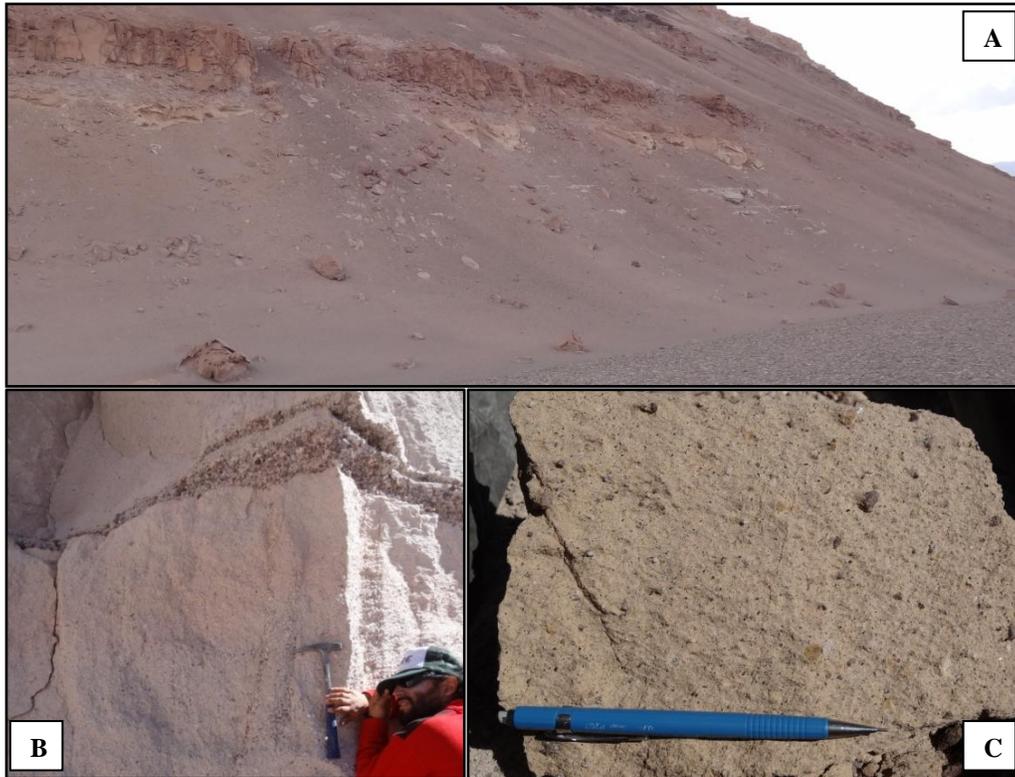


Figura 5.5- A: Perfil de la base de la columna integrada de la localidad Llano de la Laguna Seca sur. En la parte inferior intercalación de niveles brechosos (5.5A) y cineríticos bajo nivel amarillo rico en pómez (5.5C). **B:** Niveles brechosos intercalados en cineríticos y pipas de elutriación que coinciden con lentes brechosos. **C:** Muestra de mano nivel amarillo (5.5A). Pómez amarillas, líticos lapilli en matriz de cenizas pardas.

40 – 70 m

Nivel soldado de tonalidad general pardo y rosado oscuro de 20 m de espesor aproximado, con variaciones laterales del grado de soldamiento (Fig. 5.6A). Debido a su mayor competencia, no es disgregable y es fácilmente distinguible como un nivel guía continuo donde es posible observar el manteo general de la sucesión de aproximadamente 10° al W. No fue posible observar el contacto con los niveles subyacentes en terreno, sin embargo en fotografías se observa una línea divisoria abrupta entre este nivel y el inferior de tonalidad amarilla (Fig. 5.4). Petrográficamente presenta una marcada textura de soldamiento, con *fiamme* aplastadas y orientadas, moradas y blancas de hasta 4cm con un anillo rojizo alrededor. Algunas son muy alargadas y delgadas de hasta 10 cm por pocos milímetros de ancho (Fig.5.6B). Presenta cristales de plagioclasa, biotita negra y cobrizas además de escasos líticos porfíricos morados en general menores a 1 cm, pero localmente de hasta 5cm. Algunos de estos fragmentos presentan bordes muy sinuosos e irregulares. Todo lo anterior en una masa fundamental vítrea de tonalidades rosadas y moradas.

Presenta variaciones verticales en el grado de soldamiento. En las partes intermedias se puede observar un nivel vitrofírico negro de 40 cm y hacia la parte superior, disminuye grado de soldamiento hasta observarse con los mismos constituyentes, con pómez rojiza levemente aplastada y orientada, en una matriz blanca a gris claro (Fig. 5.6C). La erosión enfatiza fracturas perpendiculares al nivel y subparalelas entre sí que podrían corresponder a un diaclasamiento columnar. El contacto con los niveles cineríticos y brechosos superiores no

fue observado. Los niveles soldados anteriores fueron clasificadas como *toba de lapilli maciza eutaxítica* (**emLT**) y vitrofírica (**lava-likeT**).

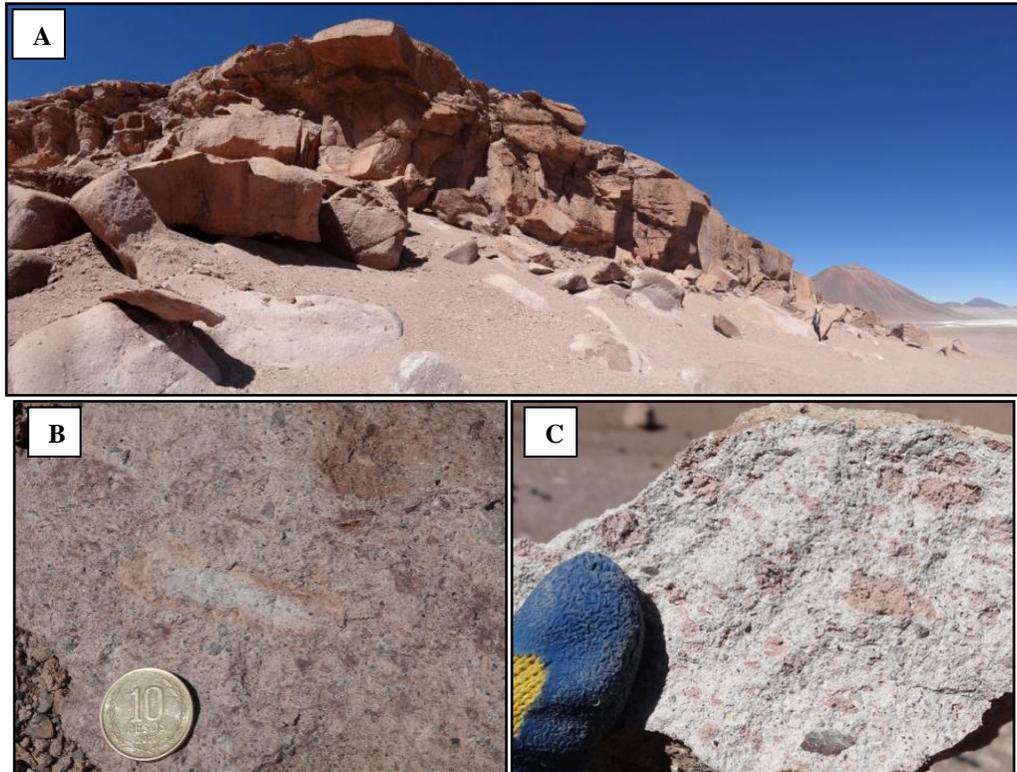


Figura 5.6- A: Vista hacia el SW del nivel soldado, de espesor 20 m, con variaciones del grado de soldamiento lateral y verticalmente. A la izquierda en 2do plano el Vn. Salar Grande del Mioceno superior (Clavero *et al.*, 1998). **B:** Muestra de mano del nivel soldado (5.6A), *fiamme* y esquirlas aplastadas y amalgamadas, escasos líticos. **C:** Muestra de mano de la parte alta nivel soldado. Presenta menor grado de soldamiento manifiesto en pómez rojas aplastadas y orientadas en matriz de ceniza gris (ancho de la foto: 10 cm).

70-100 m

Intercalación de niveles brechosos ricos en líticos y cineríticos blancos y pardos claro ricos en ceniza y distintas proporciones de líticos. En general se encuentran como depósitos no consolidados, sin fracción de ceniza en la superficie, pero si hacia abajo, con clastos angulosos, con distintas proporciones de tamaño, que en general no superan los 20 cm, pero ocasional y localmente pueden componerse de bloques métricos. En explanadas y llanos, forman superficies aterrazadas fácilmente confundibles con depósitos aluviales (Fig. 5.7A). Ocasionalmente es posible observar bancos cineríticos blancos de hasta 1 metro, con pómez blancas a pardo-amarillas fibrosas alargadas de hasta 3 cm, en menor cantidad líticos de hasta 5cm en matriz cinerítica blanca.

Sobre las brechas aflora nivel de 5 m, de tonalidad amarilla y parda claras más consolidado. Las litofacies anteriores fueron clasificadas como intercalación de *brechas líticas macizas* (**mLBr**) y *tobas de lapilli macizas* (**mLT**).

El contacto entre estos niveles y los superiores, más soldados, es difuso, pero puede observarse un aumento en la cantidad de líticos y pipas de elutriación hacia arriba, además

de un cambio relativamente abrupto de color y competencia de la roca (Fig. 5.7B). Este nivel amarillo es rico en líticos de hasta 10 cm, pómez blancas, rosado claro y amarillas fibrosas además de cristales de biotita y plagioclasa (Fig. 5.7C).



Figura 5.7- A: Brechas no-consolidadas que forman superficies aterrazadas, ricas en líticos porfíricos angulosos, en matriz de ceniza. B: Nivel amarillo (inferior) rico en pómez, ceniza y menores líticos porfíricos angulosos, en contacto con nivel soldado (superior). C: Fotografía del detalle de la petrografía de 5.7B. Pómez rosadas y amarillas en matriz de esquirlas y ceniza con menor cantidad líticos porfíricos angulosos.

100-140 m

Niveles soldados y vitrofíricos que alcanzan una potencia máxima aproximada de 40 metros. De la misma forma que los niveles inferiores, el contacto entre nivel amarillo y nivel soldado superior posiblemente es transicional, pero el contraste de color como en grado de consolidación es relativamente abrupto, entre ellos (Fig. 5.8A).

La parte inferior presenta zonas particularmente ricas en líticos en una matriz soldada blanquecina que varia hacia el techo a pardo rojiza. En afloramientos al poniente se presenta nivel lajeado de tonalidades grises, con cristales de biotita, además de pómez rosadas granulares de hasta 2 cm. Hacia arriba aumenta el grado de soldamiento observándose *fiamme* negras muy aplastadas y orientadas subhorizontalmente de hasta 15 cm (Fig. 5.8B), cristales de plagioclasa y biotita negra, en menor medida líticos porfíricos. Se observan pipas de elutriación subverticales, sinuosas y segmentadas (parten y terminan dentro del mismo nivel, sin estar asociadas necesariamente a un quiebre en la estratificación). Tiene un ancho de hasta 10 cm y constan de fragmentos líticos gruesos menores a 4 cm. Coinciden con zonas de fracturamiento (Fig. 5.8C). En contacto abrupto y aprox. en la parte intermedia de los niveles soldados se encuentra un nivel vitrofírico negro de 5 m de espesor con importantes variaciones laterales. Posee cristales de plagioclasa y biotita, escasos líticos en distintas

proporciones de tamaño y localmente se observan xenolitos de ignimbrita soldada de pómez y *fiamme* (Fig. 5.8D). Lo anterior en una matriz o masa fundamental vítrea negra. Estas litofacies fueron clasificadas en este trabajo como *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)* y vitrofírica (**lava-likeT**) respectivamente. Sobre el vitrofiro, en contacto no observado, niveles brechozos y cineríticos ricos en pómez amarillas fibrosas y líticos, clasificados, a su vez, como intercalación de *brechas líticas macizas (mlBr)* y *tobas de lapilli macizas (mLT)*.

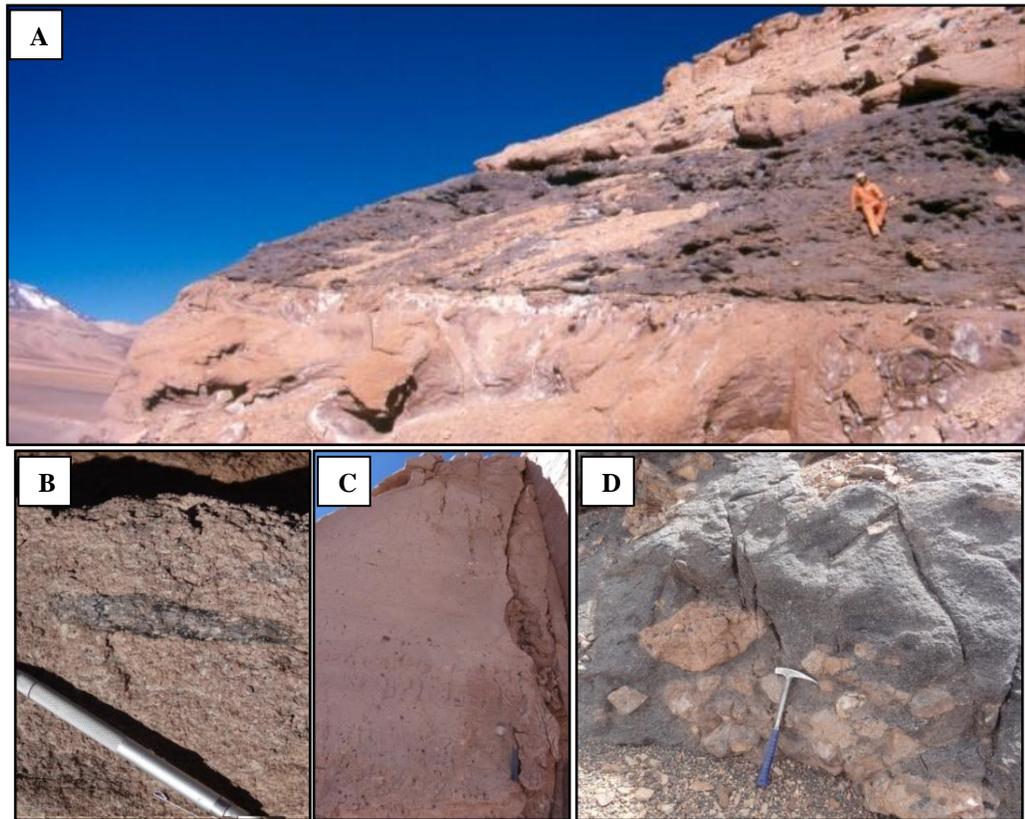


Figura 5.8- A: Contacto abrupto entre niveles soldados pardos y vitrofiro oscuro de 5 m de potencia. B: Muestra de mano de roca soldada, cristales de plagioclasa, menor biotita y *fiamme* vítrea aprox. 14 cm. C: Pipas de elutriación subverticales, sinuosas y segmentadas que coinciden con zonas de fractura. Aumenta el grado de soldamiento hacia arriba. D: Vitrofiro de 5.8A. Localmente muestra xenolitos de hasta 50 cm de rocas soldadas pardas de pómez y *fiamme*.

140-150 m

10 m de espesor aproximado depósito de bloques porfíricos y fragmentos juveniles prismáticamente fracturados (PJB). Uno de los bloques presenta una edad de $8,4 \pm 0,5$ Ma (Clavero *et al.*, 1998), K-Ar en roca total (Fig. 5.9).



Figura 5.9- Deposito no-consolidado de brecha de bloques, con fragmentos juveniles prismáticamente fracturados, ubicada en el techo de la columna de la Localidad N°1 Llano de la Laguna Seca sur. (Barra amarilla representa 5 metros).

5.2.2 Localidad integrada N°2: Portezuelo León Muerto

Descripción general:

Esta localidad integrada consta de 8 puntos de terreno revisados. Se ubica al SE del Llano de la Laguna Seca, al oeste del Vn. Nevados del León Muerto (Fig. 5.2) del Plioceno (Naranjo *et al.* en prep.) El portezuelo es formado por los niveles ignimbríticos que a su vez forman un suave anticlinal de gran longitud de onda de eje aprox. NS. Para efectos de la descripción, se dividió esta localidad en dos columnas A y B.

Estratigrafía local:

Lavas amigdaloidales, porfíricas y domos riolíticos entre 16 y 18 Ma (Clavero *et al.*, 1998) subyacen los niveles ignimbríticos (Fig. 5.10 y 5.11) que a su vez, subyacen lavas porfíricas del Cordón de las Chinchillas datadas en $9,3 \pm 0,4$ Ma K-Ar en biotita (Clavero *et al.*, 1998).

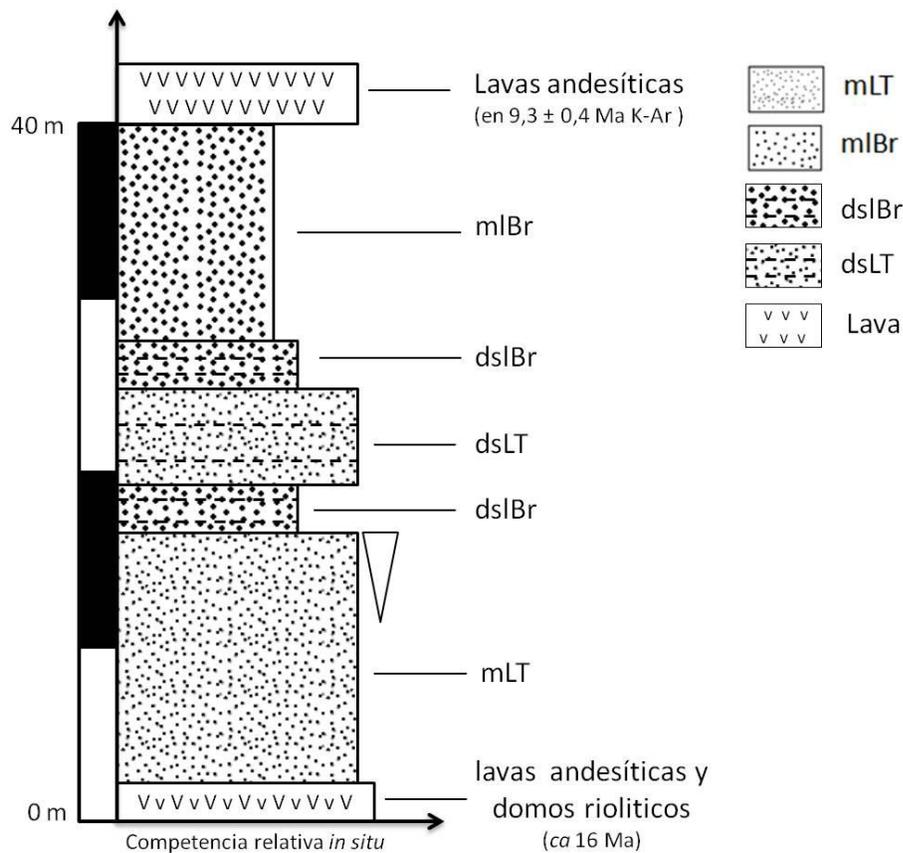


Figura 5.10- Columna A de la Localidad N°2 “Portezuelo León Muerto” y la clasificación de sus litofacies volcánicas (Branney y Kokelaar, 2002) y edades K-Ar de Naranjo *et al.*, (2013) y Clavero *et al.*, (1998).

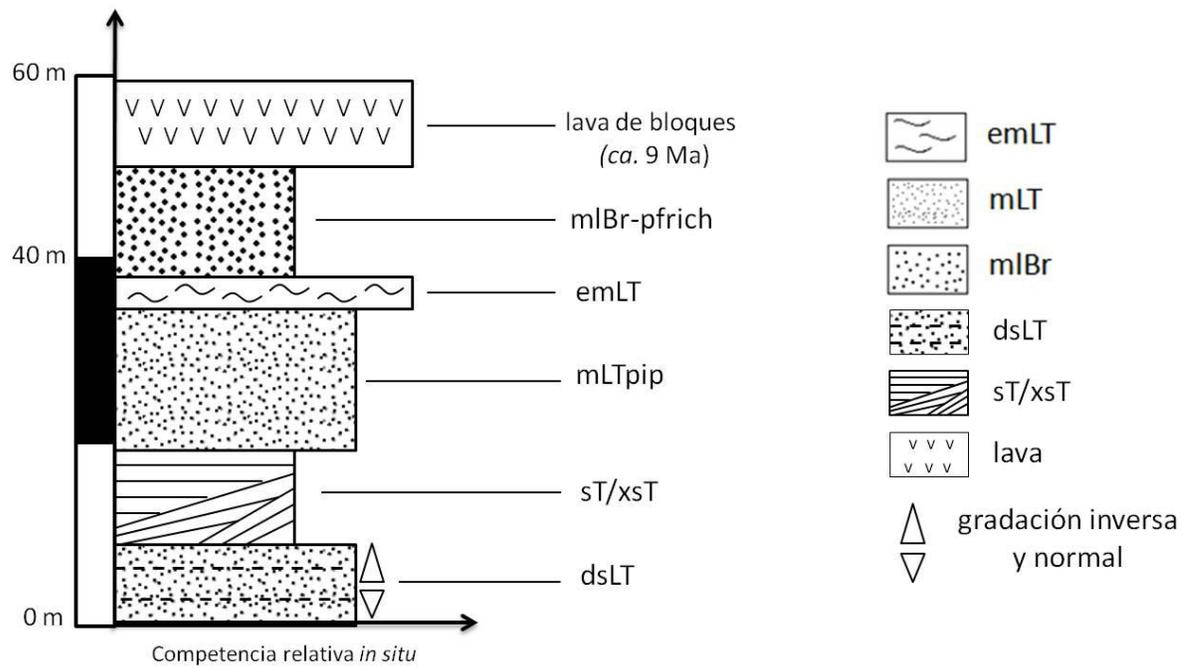


Figura 5.11- Columna B de la Localidad N°2 “Portezuelo León Muerto” y la clasificación de sus litofacies volcánicas (Branney y Kokelaar, 2002). Edad K-Ar de Clavero *et al.*, (1998).

Descripción del perfil:

Columna A

0 – 60 m

Los primeros 40 m de la columna mantean aprox. 30° al E y se separan al menos en cinco paquetes claramente distinguibles (Fig. 5.12).



Figura 5.12- Vista general, hacia el sur de los niveles de la columna A. Mantean aprox. 30° al E. Se observan en esta imagen al menos cinco niveles.

El primer nivel tiene aproximadamente 20 m de espesor expuestos, posee tonalidades grises y es muy rico en líticas angulosos porfíricos y vítreos de hasta 20 cm y pómez de hasta 20 cm blancas y gris claro ricas en cristales de biotita, en una matriz rica en ceniza gris clara y particularmente abundante en cristales de biotita (Fig. 5.13A). El depósito es macizo, no presenta laminaciones ni estratificación, sin embargo presenta una tendencia poco acentuada al crecimiento del tamaño de grano hacia arriba (tanto pómez como líticas) y se puede observar fracturas (a pesar de su poca compactación) sub-horizontales y oblicuas en ángulos de 120°/60° aprox. (Fig. 5.13B). Estas facies fueron clasificadas en este trabajo como *tobas de lapilli macizas (mLT)*.

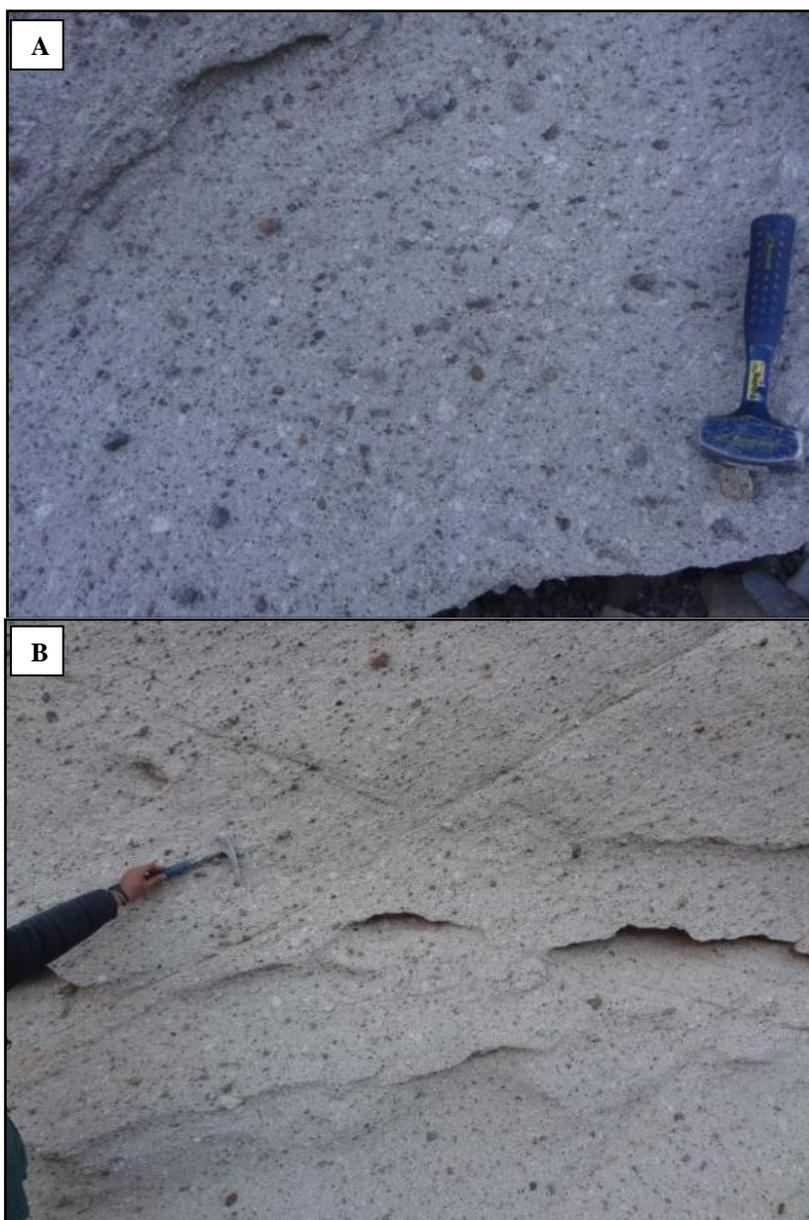


Figura 5.13- A: Nivel semi-consolidado, muy rico en líticos angulosos porfíricos, vítreos y pómez en matriz rica en ceniza gris clara particularmente rica en cristales fragmentados de biotita. B: Deposito semi-consolidado (5.13A), con fracturas sub-horizontales y oblicuas en ángulos de 120°/60°.

En contacto abrupto y sub-horizontal sobreyace un segundo nivel, brechoso con laminaciones finas (< 2 cm) con distintas variaciones granulométricas, de aprox. 20 cm de espesor, muy rico en líticos en general menores a 2 cm, y ocasionalmente hasta 10 cm que cortan la laminación (Fig. 5.124). Esta facies fué clasificada en este trabajo como *brecha lítica con estratificación difusa (dslBr)*

En contacto abrupto, nivel de aprox. 6 metros de espesor, blanco en la parte inferior, rico en ceniza y pómez blancas de hasta 1 cm y escasos líticos, gradando a gris claro hacia la parte superior, más brechosa, rica en pómez y distintas proporciones de líticos en general de hasta 3cm, en matriz de ceniza, localmente muy rica en cristales. Variaciones de granulometría y constituyentes se observan en la vertical. Presenta además, estratificación difusa tanto en la parte inferior, como en la transición a niveles más brechosos en la parte superior. Además, se encuentran fragmentos líticos dispuestos discontinuamente (sin formar una capa u estrato) pero alineados (Fig. 5.14B). En la parte media del nivel, todavía rico en cenizas y pómez se observan esporádicos líticos de hasta 40 cm, aislados (Fig. 5.14C). La litofacies anterior fue clasificada como *toba de lapilli con estratificación difusa (dsLT)*.

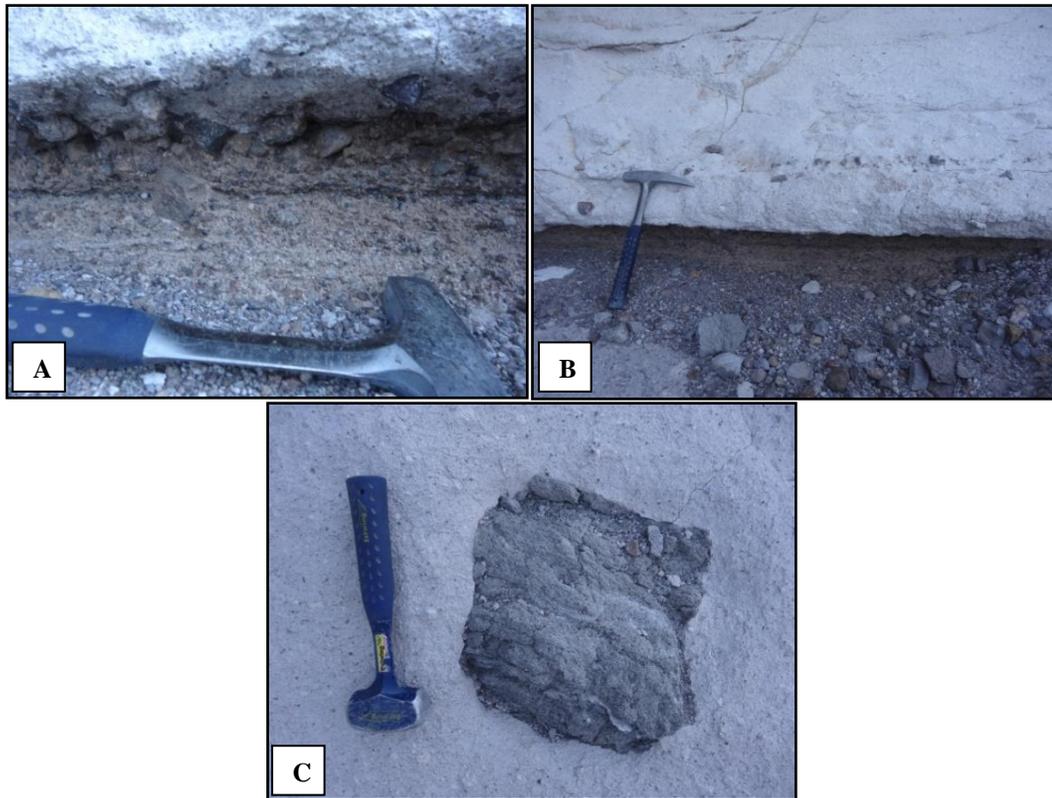


Figura 5.14- A: Nivel brechoso de 20 cm con laminaciones finas (< 2 cm) con distintas variaciones granulométricas, muy rico en líticos en general menores a 2 cm y matriz de ceniza. B: Fragmentos líticos alineados y dispuestos discontinuamente, formando una superficie de tracción y agradación. C: Fragmento lítico porfírico de 40 cm aislado en matriz de ceniza y pómez.

El cuarto nivel, presenta una parte inferior en contacto abrupto con el nivel subyacente. Los primeros 40 cm presentan distintas gradaciones granulométricas de niveles centimétricos ricos en ceniza y líticos, a otros brechosos en matriz de ceniza con clastos menores a 2 cm con laminación paralela sinuosa centimétrica. Sobre lo anterior, potente nivel brechoso más grueso, clastosoportado (particularmente rico en líticos), de al menos 20 m de espesor, con fragmentos líticos en general de hasta 15 cm, alcanzado en ciertos sectores 50 cm y escasos pómez < 10 cm en matriz de ceniza gris claro (Fig. 5.15). Esta litofacies fue clasificada como *brecha lítica maciza (mlBr)*.

Los últimos 10-15 m no pudieron ser observados *in situ* y a partir de las imágenes satelitales se puede deducir que después del talud vendría un nivel amarillo que continuaría hacia el NW y formaría el siguiente nivel, descrito en la Columna B (parte de la columna entre 60-70 m).



Figura 5.15- Brecha volcánica clastosoportada, particularmente rica en líticos < 50 cm y escasas pómez < 10 cm en matriz de ceniza gris claro.

Columna B

0 – 40 m

Sucesión de aproximadamente 20 m de espesor expuesto. Intercalaciones predominantemente centimétricas y en menor medida métricas de niveles cineríticos deleznales con distintas proporciones y composiciones de fragmentos líticos, pómez y escoria (Fig. 5.16).



Figura 5.16- Intercalaciones de niveles cineríticos deleznales con distintas proporciones de fragmentos líticos, pómez y escoria.

Los niveles inferiores, métricos y centimétricos, de tonalidad general clara, gris, blanca y rosado claro (dependiendo de las proporciones de líticos y juveniles) presentan laminaciones generalmente difusas, y en sectores, estratificación bien marcada (Fig.5.17A). Algunos niveles son particularmente ricos en pómez blancas menores a 4 cm con cristales de biotita (Fig.5.17B) y otros con mayor concentración de fragmentos líticos. Estos niveles fueron clasificados como *toba de lapilli con estratificación difusa (dsLT)*.

Intercalado en los niveles cineríticos anteriores, destacan, por su contraste de colores con el resto, niveles rojizos, anaranjados, amarillos y oscuros de aprox. 2 m de espesor máximo, con estratificación centimétrica paralela, sinuosa con variación de espesor y gradaciones inversas y normales de los constituyentes. En la base de este paquete se observan niveles de laminación fina cruzada y paralela. De base a techo; nivel de 15 cm de espesor máximo, acuñado hacia los extremos, rico en líticos menores a 5 mm en general, con laminaciones finas, paralelas y cruzada. El nivel siguiente es centimétrico, rico en líticos gruesos angulosos de hasta 10 cm. Hacia arriba, intercalación de niveles ricos en pómez rojizas y anaranjadas, amarillas, con gradación inversa y normal, con un tamaño de grano general menor a 2 cm con un máximo de 5 cm (Fig. 5.17C y 5.17D). Las facies de los niveles anteriores fueron clasificadas como *tobas con estratificación paralela (sT)* y *cruzada (xsT) ricas en líticos*.



Figura 5.17- A: Niveles inferiores de la Fig. 5.16. Muestran laminación y estratificación generalmente difusa. En la parte alta, estatificación bien marcada. B: Detalle de la parte superior de 5.17A, particularmente ricos en pómez blancas menores a 4 cm con cristales de biotita. C: Intercalación de niveles lenticulares y continuos, ricos en pómez rojizas, anaranjadas y amarillas, menores líticos angulosos. D: Estratificación y laminación cruzada en la base de la sucesión en mostrada en 5.17C.

Sobre los niveles anteriormente descritos se encuentra un nivel escarpado de aprox. 10 m de potencia de color gris claro y amarillo, bien consolidado, muy diaclasado y fragmentado. En la base se observan clastos imbricados y orientados, perdiéndose esta característica hacia arriba (Fig.5.18A). En general rico en líticos lapilli fino, ceniza y pómez amarillos y anaranjados fibrosas tubulares de lapilli fino hasta 2 cm (Fig.5.18B). Las abundantes diaclasas, a veces discontinuas y segmentadas coinciden con pipas de elutriación subverticales ricas en líticos gruesos y pómez, de geometría recta y levemente sinuosas que alcanzan de unos pocos centímetros, hasta 30 cm en “clusters” (Fig.5.18C y 5.18D). Existen además diaclasas subverticales rectas y subhorizontales transversales al afloramiento que no se asocian a pipas. Este nivel fue clasificado como *toba de lapilli maciza con pipas de elutriación (mLTpip)*.

Hacia arriba el nivel muestra características de soldamiento, que aumenta gradualmente hacia el techo. La parte superior tiene tonalidades rojizas, marrón y gris oscuro rico en biotita y plagioclasa, menores líticos. Estas características permiten clasificar esta litofacies como *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)*. Este nivel, a su vez, disminuye el grado de soldamiento hacia arriba a niveles anaranjados y amarillos textural y petrográficamente similares al nivel de *toba de lapilli maciza con pipas de elutriación* anteriormente descrito.



Figura 5.18- A: Clastos imbricados y orientados, perdiéndose esta característica hacia arriba. B: Pómez amarillos y anaranjados fibrosas tubulares de lapilli fino hasta 2 cm. Menor cantidad de líticos lapilli fino y ceniza. C: Diaclasas en ignimbrita, que coinciden con pipas de elutriación subverticales ricas en líticos gruesos y pómez, alcanzan de unos pocos centímetros, hasta 30 cm de ancho formando “clusters” D: Detalle de las pipas de elutriación de 5.18C.

40 – 60 m

Sobreyace los niveles anteriores una brecha no consolidada de aprox. 10 m, con fragmentos líticos tamaño bloques y pómez de hasta 30 cm en abundante matriz fina de ceniza rosada. No es posible ver esta sección a lo largo del perfil, posiblemente debido a la erosión, facilitada por su nula compactación y consolidación. Coladas de lava, con espesores de al menos 10 m altamente variables lateralmente, cubren tanto los niveles soldados anteriores como las brechas de bloques. (Fig.5.19). Por sus características litológicas, esta brecha fue clasificada como *brecha lítica maciza rica en pómez y fragmentos finos (mlBr-pfrich)*.



Figura 5.19- En primer plano, y hacia la izquierda de la imagen, brecha volcánica, no consolidada, matriz rica en ceniza, pómez de hasta 10 cm y fragmentos líticos. Infrayace lavas de bloques *ca* 9 Ma (a la derecha).

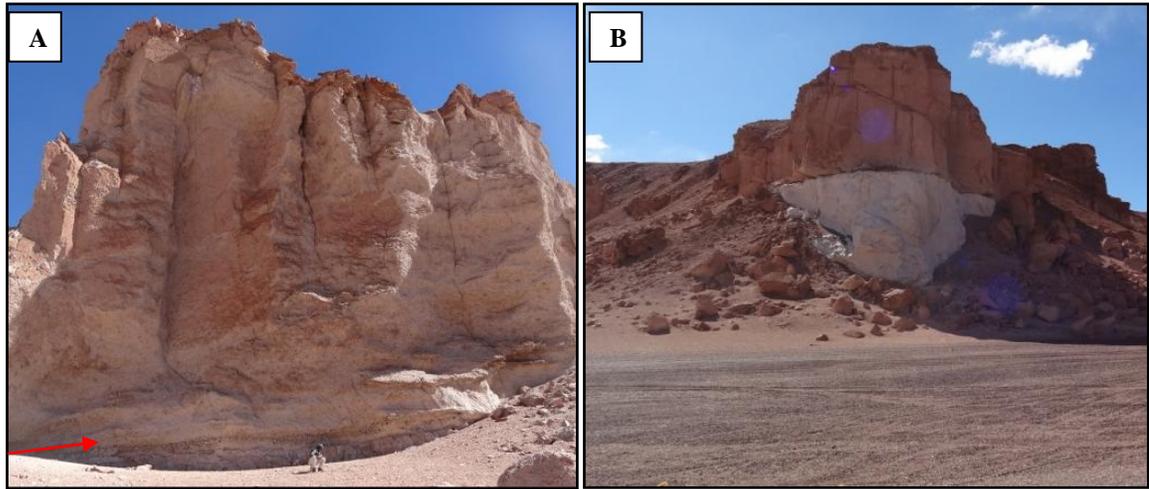


Figura 5.22- A: Contacto erosivo (flecha roja) entre dos unidades de flujo de las ignimbritas Salar Grande. B: Nivel de la ignimbrita Salar Grande (blanco) subyaciendo, en contacto erosivo, nivel de la ignimbrita Los Colorados. Potencia de los dos niveles de aprox. 20 m.

Los niveles de la ignimbrita Salar Grande, y en menor profundidad, los de las ignimbritas Laguna Verde y Los Colorados son descritos en la siguiente sección.

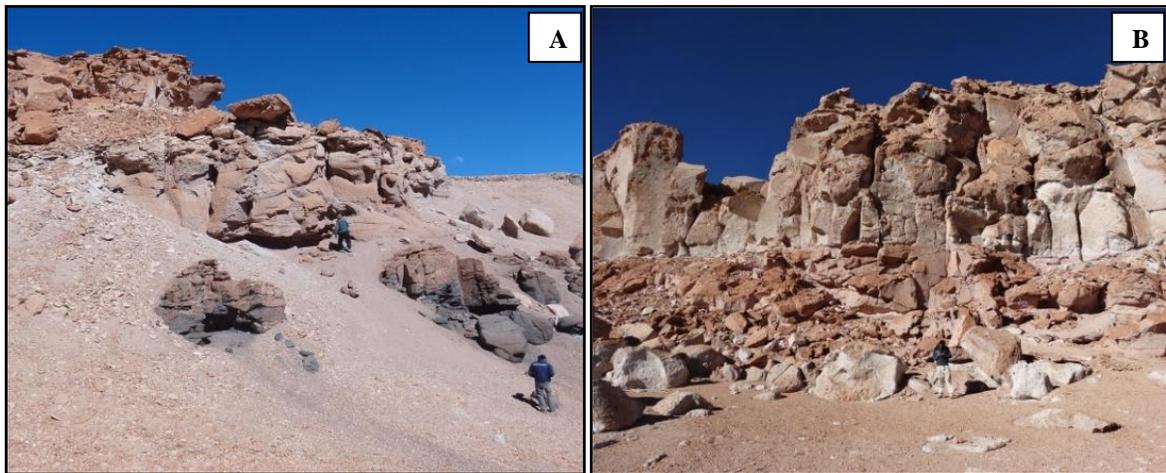


Figura 5.23- A: Perfil de 12 m. Vitrófireo en la base, disminuye el grado de soldamiento hacia el techo. Infrayace a la ignimbrita Laguna Verde. B: Dos unidades de enfriamiento distintas de la ignimbrita Laguna Verde. Potencia aprox. 8 m.

Descripción perfil

Columna A, parte Sur

0 – 1 m

La base de esta columna compuesta tiene expuesto aprox. 1 metro de nivel soldado rosado claro y blanco, con diaclasamiento columnar subvertical bien desarrollado y juego de diaclasas oblicuos (Fig. 5.24A). Abundante fracción fina de líticos vítreos, porfíricos y cristales de biotita negra y cobriza, plagioclasa y cuarzo menores a 2 mm, que en sectores poblan densamente la matriz. Se encuentra en menor cantidad pómez blancas fibrosas y ovaladas y, *fiamme* aplastadas y orientadas gris oscuro, fibrosas, además de fragmentos de vidrio amorfos negros a rojizos en matriz de ceniza blanca compacta y abundantes cristales de biotita. Se observan fragmentos líticos y cristales finos (menores a 1 mm) alineados de forma subvertical, paralelos al diaclasamiento columnar. (Fig. 5.24B). El contacto con el nivel cinerítico, potente rico en pómez y ceniza que lo sobreyace es claramente erosivo (Fig. 5.24A). Este nivel soldado fue clasificado como *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)*.

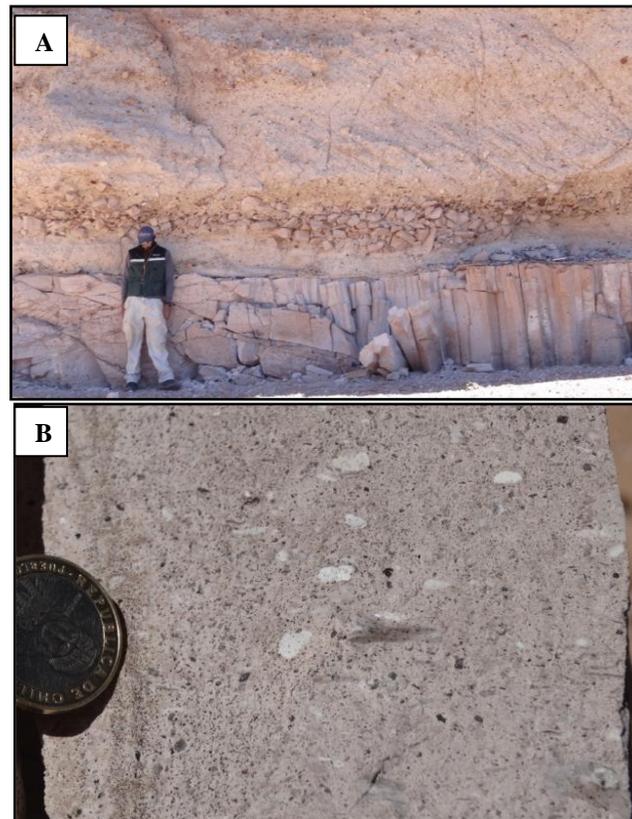


Figura 5.24- A: Contacto erosivo entre dos unidades de flujo de las ignimbritas Salar Grande. Diaclasamiento columnar en el nivel inferior. B: Fragmento columnar de 5.24A, con pómez blancas, fibrosas, ovaladas y *fiamme* gris oscuro, aplastadas y orientadas, en matriz rica en cristales de biotita y fragmentos líticos lapilli medio a fino. A la izquierda, fragmentos líticos y cristales finos (menores a 1 mm) alineados de forma subvertical, paralelos al diaclasamiento columnar.

1 – 15 m

Potente nivel de aprox. 15 m principalmente macizo, de tonalidades blancas y rosadas. A pesar de no estar soldado presenta fracturas subverticales transversales bien desarrolladas (Fig.5.25A). Presenta poca compactación y es deleznable. Muy rica en cenizas y pómez, menor cantidad de líticos porfíricos lapilli media a grueso. La matriz es cinerítica con cristales de biotita, plagioclasa y líticos. Las pómez son ovaladas y también alargadas principalmente blancas, blancas con borde rojo (de mayor tamaño) rojizas y también pardo anaranjadas y alcanzan hasta 30 cm (Fig.5.25B). Hacia el techo de la sucesión disminuyen notablemente el porcentaje y tamaño de las pómez, quedando un depósito macizo rico en cenizas y fragmentos líticos que localmente presentan disgregados en franjas sub-horizontales. Esta litofacies fue clasificada como *toba de lapilli maciza rica en pómez (mLTp)*.

La base de este nivel es erosiva y presenta fragmentos angulosos y lajas de hasta 70 cm del nivel soldado diaclasado descrito anteriormente (Fig. 5.24 A y B). Subyace nivel pardo rojizo en contacto relativamente abrupto (por contraste de colores), y erosivo (Fig.5.22B).

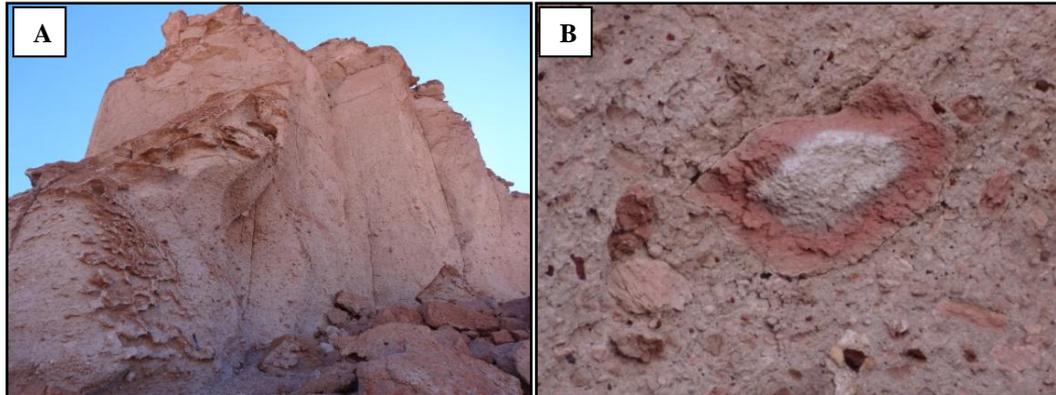


Figura 5.25- A: Nivel cinerítico rico en pómez. A pesar de no estar soldado presenta fracturas subverticales bien desarrolladas (marillo de escala en la parte inferior). B: Pómez pardas, rosadas y blancas con borde rojo de hasta 20 cm en matriz de ceniza y cristales. Largo de la foto: 40 cm.

15 – 30 m

Sobre el nivel anterior y en contacto erosivo se encuentra nivel de aprox. 15 m de potencia, característicamente pardo-rojizo. Se observa un claro contraste con el nivel inferior marcadamente blanco. En la base predominan las pómez blancas y rosadas de hasta 5 cm y escasos líticos del mismo tamaño, excepto los fragmentos, angulosos de la ignimbrita inferior, que alcanzan los 30 cm y muestran signos de oxidación de la matriz de tonalidades rosadas, claramente distintas de la roca fresca de color blanco. La matriz es pardo verdosa que varia gradualmente a anaranjada y rojiza hacia arriba, además de una gradación inversa visible en las pómez y poco clara en los líticos porfíricos. Hacia arriba se encuentra un predominio de pómez pardas, rojizas, marrón y grises muy fibrosas y tubulares de distintas formas, escasos líticos morados y rojizos porfíricos y negros escoriaceos, en matriz rica en esquirlas tamaño ceniza gruesa, cuarzo, plagioclasa y biotita (Fig.5.26A). Además, hacia arriba se observa un aumento del soldamiento llegando a encontrarse pómez aplastadas y orientadas, y más arriba *fiamme* negras de hasta 5 cm aplastadas y orientadas (Fig.5.26B). Estas litofacies fueron clasificadas como una variación de *toba de lapilli maciza (mLT)* en la parte inferior a *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)* en la parte superior.

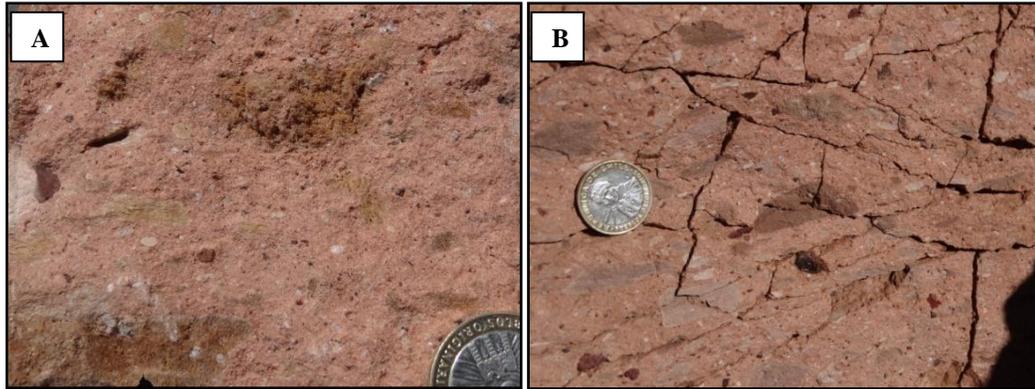


Figura 5.26- A: Pómez pardas muy fibrosas y tubulares, escasos líticos morados y rojizos porfíricos, en matriz rica en esquirlas tamaño ceniza gruesa, cuarzo, plagioclasa y biotita. Ignimbrita Los Colorados. B: Poblaciones de pómez aplastadas de la ignimbrita Los Colorados.

Columna B, parte norte

0 - 12 m

Afloran aprox. 12 m de roca soldada a muy soldada (Fig. 5.21A). En la base de la columna (se encuentra un vitrófiro negro azulado con *fiamme* negras de hasta 10 cm (Fig.5.27A). Presenta cristales de plagioclasa y biotita y menores líticos porfíricos en matriz vítrea oscura. Disminuye progresivamente su grado de soldamiento hacia arriba. La parte superior se presenta de color gris, rica en líticos porfíricos, presenta pómez aplastadas y orientadas, granulares rosadas y amarillas de hasta 3 cm y fragmentos porfíricos rojizos con plagioclasa aplastados y orientados (Fig.5.27B). Estas litofacies fueron clasificadas como *vitrófiro (lava-likeT)* y *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)*, respectivamente.



Figura 5.27- A: Muestra de mano de la base de la columna (Figura 5.21 y 5.23A) correspondiente a vitrófiro negro azulado con *fiamme* negras de hasta 10 cm. B: Fragmento de roca gris, rica en líticos porfíricos angulosos, pómez aplastadas y orientadas, granulares rosadas y amarillas de hasta 3 cm. Pertenece a los niveles menos soldados superiores de la columna de la Fig. 5.23A.

En las rocas grises se observa fracturamiento denso centimétrico. Hacia el techo el fracturamiento es horizontal formando bloques de lajas de pocos centímetros de espesor. Lo anterior es característico de explanadas, de las partes altas de las ignimbritas más jóvenes de la zona (Laguna Verde, ca 4 Ma, por ejemplo), por lo que podría corresponder a un *hiatus* respecto del nivel superior, lo suficiente como para generar este tipo de superficies.

12 – 30 m

Sobre los niveles anteriores, aprox. 8 metros de rocas de coloración rosada a anaranjada rica en pómez blancas fibrosas y alargadas de hasta 5 cm, grises, pardas y rosadas de menor tamaño alargadas y ovaladas. Escasos fragmentos negros escoriaceos de hasta 4 cm. Abundantes cristales de cuarzo, plagioclasa y biotita, escasos líticos morados y rojizos en matriz cinerítica rosada. En contacto abrupto subhorizontal, con alto contraste de coloración de rosado (abajo) a blanco (arriba), nivel de aprox. 12 m rico en cuarzo, menor biotita y pómez blancas y amarillas granulares de hasta 4 cm, escasos líticos porfíricos (Fig.5.23B). Estas litofacies corresponden a *tobas de lapilli macizas (mLT)*.

5.2.4 Localidad integrada N°4: Llano de la Laguna Seca norte

Localidad integrada formada por 9 puntos revisados en terreno, ubicados principalmente al E del Salar Grande y del Vn. Negro, al oeste del cordón que culmina al norte con el Co. del Medio. La columna integrada mide aproximadamente 60 m y se muestra en la Figura 5.28.

Estratigrafía local

En esta localidad, tal como se resume en la columna (Fig. 5.28) los niveles de la ignimbrita Salar Grande sobreyacen domos riolacíticos y lavas porfíricas de *ca* 16-18 Ma (Clavero *et al.*, 1998). Subyacen, a su vez, depósitos piroclásticos de caída del Vn. Negro del Mioceno superior – Plioceno inferior (Naranjo *et al.*, en prep).

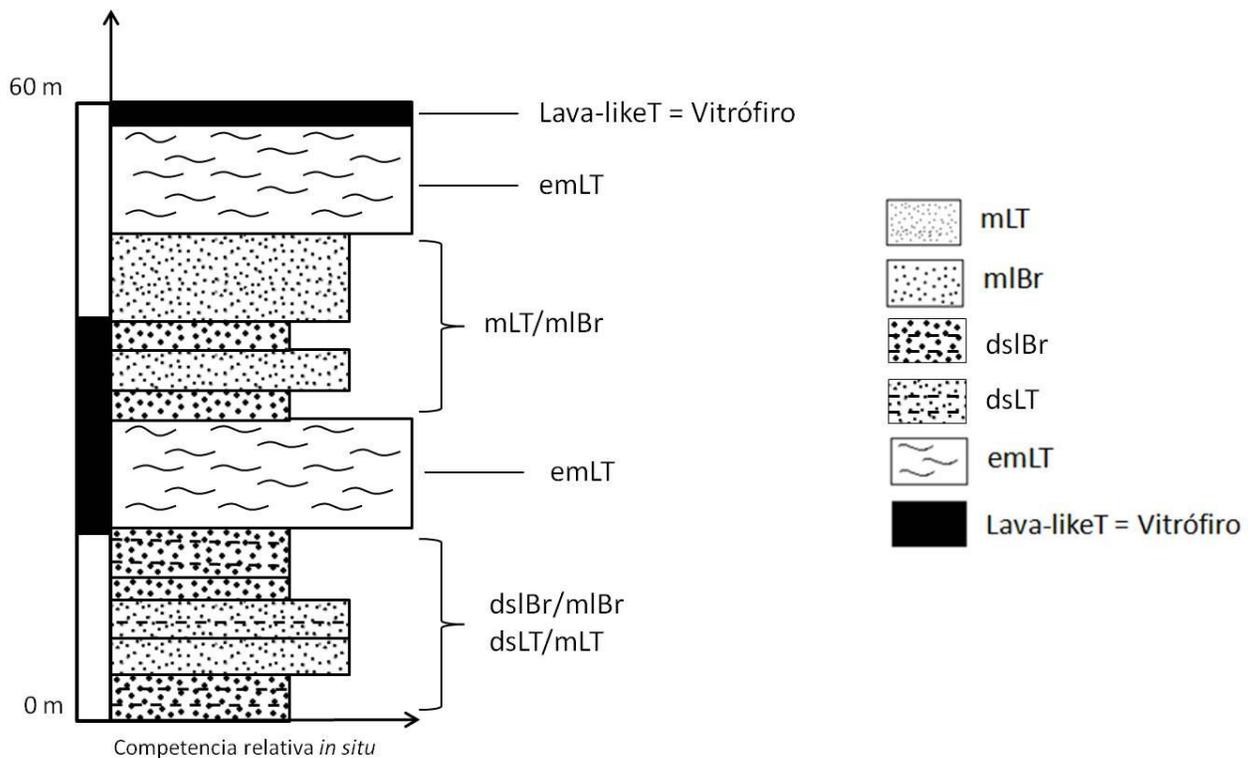


Figura 5.28- Columna de la Localidad N°4 Llano de la Laguna Seca norte y la clasificación de sus litofacies volcánicas (Branney y Kokelaar, 2002).



Figura 5.29- Columna completa de la Localidad N°4 Llano de la Laguna Seca norte. En la parte inferior, niveles cineríticos y brechosos intercalados. En la parte superior, niveles soldados intercalados con niveles cineríticos grises y brechas volcánicas.

Descripción del perfil

0 – 15 m

La base de la columna corresponde a una intercalación de niveles cineríticos y brechosos de aprox. 10 m (Fig. 5.30A). Tienen tonalidades rosadas y gris claro, en general son muy deleznales y presentan estratificación difusa, salvo en los contactos entre niveles brechosos (Fig. 5.30B). El nivel inferior y más potente de 6-8 m muestra notable set estructuras oblicuas paralelas entre sí, centimétricas, que podrían corresponder a estructuras sedimentarias (ver discusión) que reflejan las características de depositación de este nivel (5.30C). Presenta abundantes pómez blancas y rosadas de hasta 6 cm, menores líticos en matriz de ceniza rosada y cristales. Más arriba y en contacto difuso gradacional se encuentra nivel menor a 1 m, rojizo amarillento rico en pómez con núcleo rosado y borde rojizo de hasta 10 cm (Fig. 5.30D) y menos líticos en matriz de cenizas rosado claro y cristales. El nivel inferior, rosado claro, es rico en pómez rosadas y blancas, menores líticos en matriz de ceniza rosado claro y cristales.



Figura 5.30- A: Vista general a NE de la base (10 m) de la columna del Llano de la Laguna Seca norte. **B:** Estratificación difusa (dsLT) manifiesta tanto en la granulometría como en los cambios de tonalidades rosadas. **C:** Estructuras oblicuas de gran escala en los niveles rosados inferiores que posiblemente corresponden a estratificación cruzada. **D:** Detalle del nivel intermedio rico en pómez blancas, rosadas y blancas con borde rojizo de hasta 15 cm.

Aproximadamente 15 m de depósito con variaciones laterales y verticales de sus facies. Base brechosa, rica en líticos lapilli medio. Hacia arriba nivel de aprox. 50 cm. de pómez gruesas blancas (< 5 cm) y ceniza blanca con gradación normal. Variaciones de la granulometría y componentes se observan lateral y verticalmente que se reflejan en niveles ricos en pómez grises y niveles ricos en líticos, ceniza, menores pómez. Forman comúnmente superficies aterrazadas ricas en líticos y deprimidas en finos similares en morfología a terrazas aluviales. Localmente se observan laminaciones difusas, con distintas variaciones granulométricas (Fig.5.31A). Estos niveles fueron clasificados como una serie de *tobas de lapilli*, *macizas (mLT)* y *con estratificación difusa (dsLT)* intercaladas con *brechas líticas*, *macizas (mlBr)* y *con estratificación difusa (dslBr)*.

15 – 25 m

En la parte superior, hacia el techo, aumenta el grado de soldamiento, cambiando su coloración de niveles grises y blancos a morado, además de cambios en la dureza reflejados en su respuesta a la erosión. Variaciones laterales de la competencia son observadas. Además, localmente es posible observar diaclasamiento columnar y fracturamientos irregulares (Fig.5.31B). Este nivel corresponde a una *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)*.

25 – 50 m

Corresponden a los 25 m de la parte superior de la Figura 5.31B. Los primeros 15 metros corresponden a una intercalación de niveles cineríticos y brechosos, de tonalidades gris claro, hacia arriba rosado y amarillo. En general son ricos en líticos y distintas proporciones de ceniza y pómez pardo-amarillas fibrosas, en bancos de 50 cm hasta varios metros. Las litofacies anteriores fueron clasificadas como intercalación de *brechas líticas macizas* (**mIBr**) y *tobas de lapilli macizas* (**mLT**).

En contacto abrupto, nivel morado muy soldado con fracturamiento columnar heterogéneo (distintos tamaños de las columnas y formas de las fracturas que varia hacia arriba a un nivel vitrofírico negro lajeado). Estos niveles fueron clasificados como a una *toba de lapilli maciza eutaxítica* (**emLT**) y *vitrofiro* (**lava-likeT**).

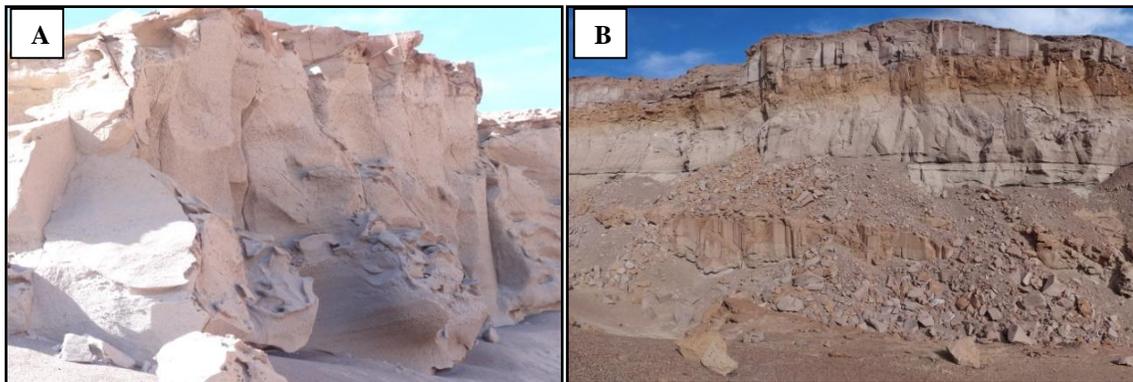


Figura 5.31- A: 5 m de tobas de lapilli con estratificación difusa (dsLT) en la parte inferior y macizas (mLT) en la parte superior. B: Vista general hacia el SE. 50 m con dos paquetes de tobas macizas y brechas intercaladas bajo niveles soldados diaclasados.

5.2.5 Localidad integrada N°5: Salar Grande norte

Descripción de la localidad integrada

Se revisaron 13 localidades, ubicadas en la parte norte del Salar Grande. Limita al oeste con el volcán Negro Filudo, al Norte por el volcán Puntigudo de la Isla y al oriente por el cerro Del Medio.

Estratigrafía local

En la parte norponiente del salar, estos niveles de la ignimbrita Salar Grande (Fig. 5.32) sobreyacen niveles superiores de las ignimbritas Rio Frio (*ca.* 17 Ma, Naranjo *et al.*, 2013). Al nororiente, sobreyacen los productos del Vn. Puntigudo de la Isla (*ca.* 17 Ma) y lavas porfíricas del Mioceno inferior (18 Ma).

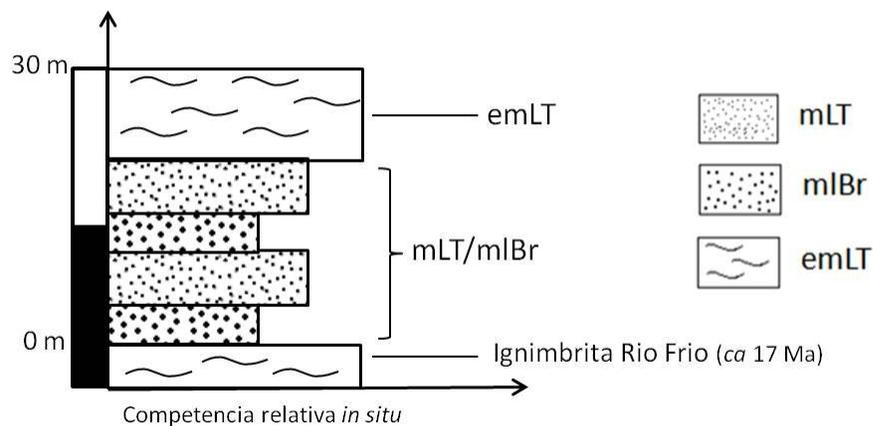


Figura 5.32- Columna de la Localidad N°5 Salar Grande norte y la clasificación de sus litofacies volcánicas (Branney y Kokelaar, 2002). Edades de la ignimbrita Rio Frio en Naranjo *et al.* (2013).

Descripción del perfil

0 – 20 m

Distintos niveles no consolidados y brechosos ricos en líticos hasta tamaño bloque (Fig.5.33A) con matriz de ceniza y otros con predominante ceniza blanca a rosado claro con cristales de plagioclasa y biotita y pómez blancas (Fig.5.33B). Uno de estos niveles ricos en ceniza fue datado en 11.7 Ma K-Ar en biotita (Naranjo *et al*, 2013). Forman en la zona norte del Salar Grande y sur del Vn. Puntagudo de la Isla, superficies aterrazadas (Fig.5.33C). Contiene niveles ricos en ceniza y en superficie se pueden observar fragmentos líticos angulosos de distintos tamaños centimétricos hasta bloques métricos. Hacia el este, presentan niveles brechosos intercalados ricos en escoria y pómez de espesor aprox. 10 m. Los niveles anteriores fueron clasificados como intercalación de *brechas líticas macizas (mlBr)* y *tobas de lapilli macizas (mLT)*. En estas intercalaciones se puede reconocer localmente una facies particularmente rica en escorias, clasificada como *toba de lapilli maciza rica en escoria (mLTsc)*. Ver Figuras 5.33 D y E.

No se observaron cortes que permitieran verificar de manera clara sus relaciones de contacto, por lo que han inferido por continuidad lateral observada en imágenes satelitales.

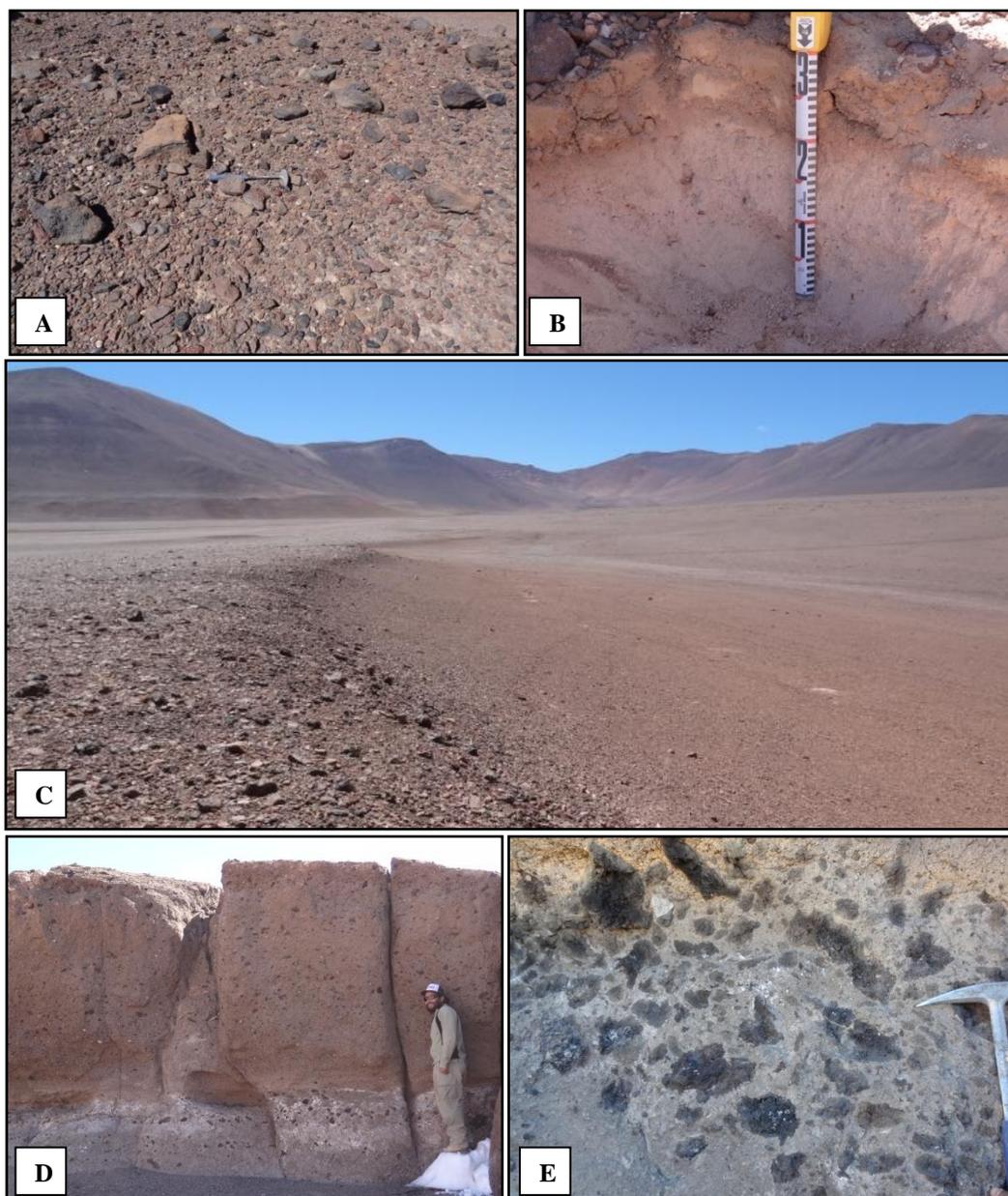


Figura 5.33- A: Fragmentos líticos angulosos de brechas no consolidadas. B: Niveles cineríticos intercalados en las brechas, ricos en ceniza y critales de biotita (ca 11.7 Ma, Naranjo *et al.* 2013). C: Nivel no consolidado, brechosos ricos en líticos hasta tamaño bloque, deprimido en fracción fina en la superficie. D: Distintos niveles de tobas de lapilli maciza rica en escoria (mLTsc). E: Detalle de los fragmentos escoriaceos que alcanzan hasta 20 cm.

20 – 35 m

Sobre niveles clásticos anteriores se reconocen 3 litofacies, con distinto grado de soldamiento ubicadas en los alrededores del Salar Grande (Fig. 5.34A y B).



Figura 5.34- A: Vista hacia el norte. Niveles soldados de las ignimbritas Salar Grande manteniendo al este, sobreyacen a la ignimbrita Río Frio (17 Ma) en el borde norte de la caldera Salar Grande (Naranjo *et al.*, 2013). B: Vista al E, en primer plano niveles soldados de las ignimbritas Salar Grande mantean suavemente hacia el SW. En segundo plano el cerro del Medio.

Parte inferior aprox. 5 m nivel cinerítica, matriz pardo claro rica en esquirlas y cristales de plagioclasa y biotita, menores pómez lapilli finos a medio rojizas y escasos líticos lapilli medio e inferiores (Fig. 5.35A).

Parte intermedia de aprox. 5 m de ignimbrita levemente soldada, rica en pómez rojizas granulares localmente aplastadas y orientadas, menores líticos lapilli medio con bordes irregulares (Fig. 5.35B) en matriz gris claro rica en cristales de biotita orientados y plagioclasa.

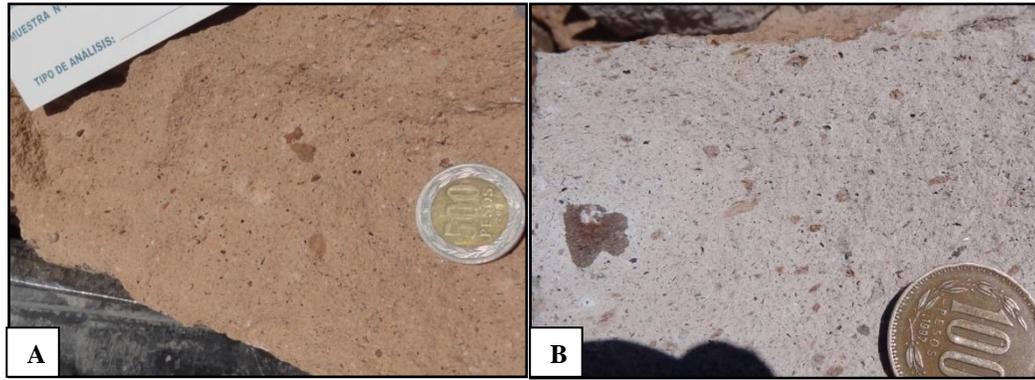


Figura 5.35- A: Muestra de mano rica en esquirlas y cristales de plagioclasa y biotita, menores pómez lapilli finos a medio rojizas y escasos líticos lapilli medio. **B:** Detalle de roca soldada, rica en pómez rojizas granulares localmente aplastadas y orientadas, menores líticos lapilli medio con bordes irregulares.

Sobre los anteriores, nivel soldado superior morado a gris oscuro rico en cristales de plagioclasa, menor biotita y *fiamme*, escasos líticos en matriz vítrea morada. Bandas moradas y grises sinuosas que podrían indicar reomorfismo. Localmente, a los pies del Vn. Puntiajudo de la Isla, manteando hacia el W niveles con bandeamientos centimétricos deformados asociados a posible reomorfismo (Fig. 5.36 A y B).

Los niveles soldados anteriores fueron clasificados como *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)* con estructuras reomórficas locales (**emLT-rheo**).



Figura 5.36- A: Vista panorámica hacia el NW. En primer plano brechas no consolidadas y en segundo plano, niveles muy soldados de las ignimbritas Salar Grande manteando hacia el SW. **B:** Muestras de mano de los niveles mostrados en 5.36A. Se observan texturas de deformación reomórfica centimétrica.

6. Resultados del análisis de circones

6.1 Marco teórico

6.1.1 Edades radiométricas

Todos los métodos de dataciones por medio de isotopos radioactivos siguen la misma ley de desintegración radioactiva. Un isotopo padre decae a un isotopo hijo a una tasa para todos los efectos, constante. Se puede relacionar el tiempo que ha pasado desde que empezó a decaer el sistema isotópico dado con la constante de decaimiento, la cantidad de isotopos “padre” e “hijos”.

Los isotopos radioactivos U^{238} y U^{235} decaen a los isotopos radiogénicos estables Pb^{206} , y Pb^{207} respectivamente. Del total de uranio encontrado en rocas terrestres, aproximadamente el 98% es U^{238} y menos del 1% es U^{235} , por lo tanto, dado los límites de detección de los instrumentos de medición, para rocas “jóvenes”, en particular del Cenozoico, se utiliza el sistema $U^{238} \rightarrow Pb^{206}$.

Para rocas cenozoicas, la cantidad de plomo incorporado al momento de la cristalización (generalmente llamado plomo común) que no es generado por el decaimiento del uranio del sistema, puede eventualmente llegar a ser significativa. Es por esto que es conveniente aplicar criterios que en la práctica corrigen la dispersión de las edades que pueden deberse al plomo común (Williams, 1998, Stacy y Kramers, 1975).

Se puede detectar si existe dispersión de los datos por Pb común observando el diagrama Concordia o Tera-Wasserburg (Fig. 6.7) si se observa una sistemática dispersión de puntos hacia la izquierda y hacia arriba en el gráfico, alejándose de la concordia (Williams, 1998).

6.1.2 Imágenes de cátodo-luminiscencia

Es de conocimiento actual que los circones pueden guardar en su estructura, una compleja historia evolutiva geocronología y geoquímica (Corfu, *et al.*, 2003). Los circones pueden tener distintos eventos de cristalización, disolución y metamorfismo que hacen que su datación, cualquiera sea su objetivo y método, deba ser revisada cuidadosamente. En los inicios de geocronología U-Pb, los circones eran disueltos por completo (método TIMS). Posteriormente por otros mecanismos, se separaba la “cascara” del núcleo. Solo hasta la llegada de la datación puntual y las imágenes de cátodo-luminiscencia, se pudo comprender con mejor certeza las distintas evoluciones del cristal y así obtener mejores edades para cada estudio (Corfu, F. *et al.*, 2003). Las imágenes CL son muy útiles en este sentido, ya que es posible detectar zonaciones, inclusiones y núcleos heredados antes de “pinchar” el circón.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) toma fotografía utilizando un haz de electrones que es impactado en el cristal, y este, a su vez emite fotones capturados por un sensor. El contraste de las fotografías entre zonas claras y oscuras es función del radio atómico de los elementos que constituyen el mineral. En particular en los circones, las zonas más oscuras tienen

relativamente mayor cantidad de uranio que las más claras. Por las metodologías de datación puntual, es conveniente saber donde datar, ya que, por ejemplo, para roca jóvenes como las de este estudio, es preferible datar en zonas de mayor cantidad de uranio, para asegurar una mayor cantidad de Pb y que la detección sea exitosa.

6.2 Caracterización de circones

Con el objetivo de buscar rasgos que permitan definir la génesis de los cristales de circón y su relación con la ignimbrita, se dividieron en grupos según la edad, se hicieron mediciones de largo (L) y ancho (A) y se calculó una edad integrada de la población más joven.

6.2.1 Grupos

La muestra para datación fue tomada de la parte alta de la columna principal (Fig. 7.1). Se separaron 197 circones, de los cuales se obtuvieron 146 edades (tabla Anexo 2). Las imágenes CL muestran los cristales datados y no datados, con el punto donde se realizó el análisis (aprox. 30 μm) y la edad respectiva del punto. Además se pueden distinguir, en general, cristales subhedrales fracturados y euhedrales, con zonación oscilatoria, sectorial, y en menor medida cristales homogéneos. Como se puede apreciar en los histogramas de edades (fig. 6.1 y 6.2), existen 4 grupos de edades importantes. Se realizaron mediciones de ancho mayor (A) y largo mayor (L) de los circones en las imágenes CL (Fig. 1.2), y se encuentran resumidas en la Tabla 1 y graficadas en los histogramas (Fig. 6.3 a 6.6). Rangos para histogramas de proporciones y tamaños se eligen como punto medio 0, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, etc.). Dado que el circón no necesariamente muestra el cristal completo (el resto puede quedar tapado por resina) estos tamaños son aparentes.

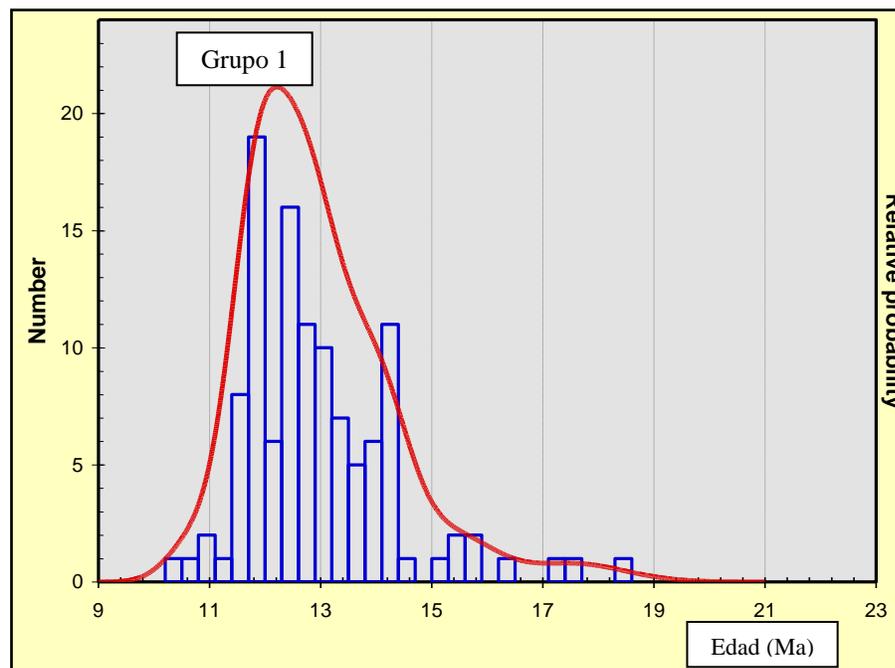


Figura 6.1- Histograma de edades Grupo 1. En el eje de las ordenadas el número de circones, en las abscisas, la edad en millones de años.

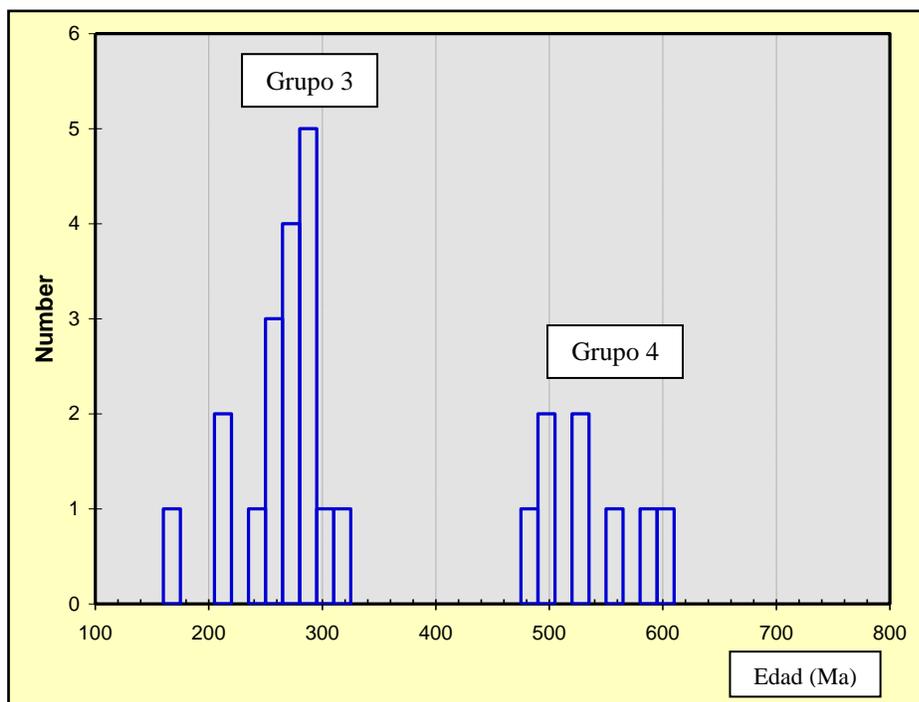


Figura 6.2- Histograma de edades de los grupos 3 y 4 (sin edades mayores a 1000 Ma). En el eje de las ordenadas el número de circones, en las abscisas, la edad en millones de años

Como se puede observar en el histograma general de tamaños (Fig. 6.3), cerca del 68% de los circones están en las proporciones cercanas a 0.5 y 0.75 (26% y 42% respectivamente), siendo esta tendencia también reproducible en cada uno de los grupos.

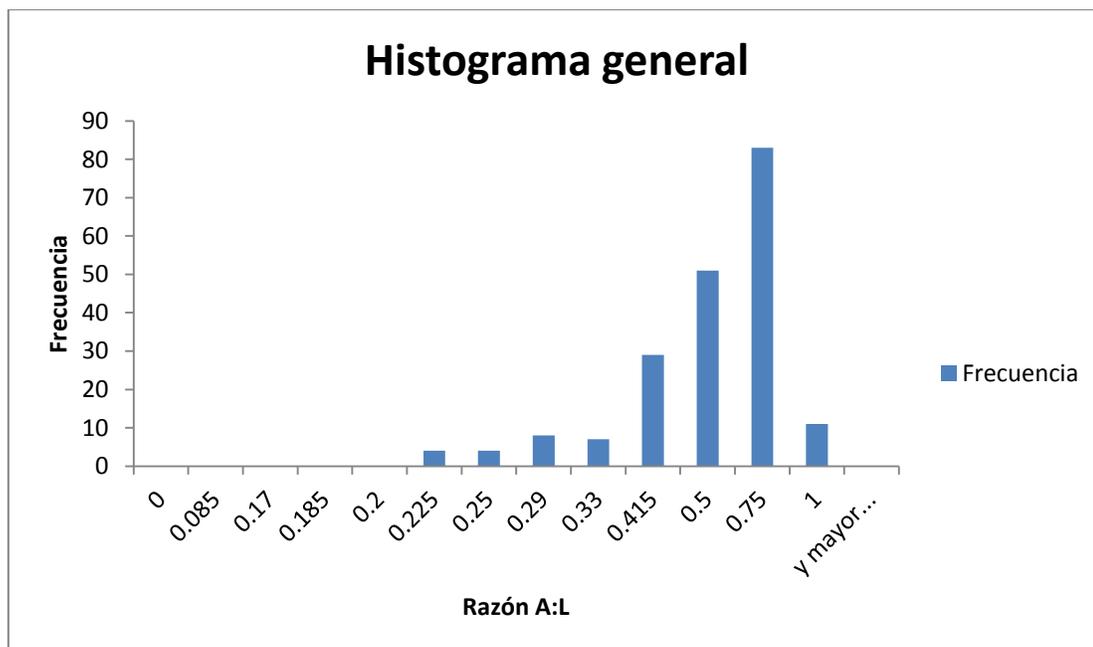


Figura 6.3- Histograma de razones de tamaño (Ancho: Largo) de todos los circones (datados y no datados), en 197 cristales.

A continuación se describen las principales características morfológicas, texturales y geocronología de cada grupo, junto con los datos de medición:

Grupo 1 (ca. 10 – 18 Ma)

Corresponde al grupo de circones con edades más jóvenes y de mayor población (suma 88 circones). La distribución de tamaños se muestra en histograma Grupo 1 (fig. 6.4). El 60% de los circones tiene razones cercanas a 0.75 y 0.5 (34% y 26% respectivamente). A pesar de esta estadística de la los 88 circones, notar también que en los circones que se acercan a la edad K-Ar de la ignimbrita, se observan dos grupos morfológicos característicos. El primer grupo tiene razones de A:L bajas, relativamente aciculares, con desarrollo importante de prisma y menor desarrollo de pirámides que además, presenta zonación en genera homogénea sin presentar oscilación oscilatoria. El segundo grupo presenta desarrollo de prisma e igualmente de pirámides simples o dobles. Estos últimos presentan importantes anillos de contrastes de colores típicos de una zonación oscilatoria

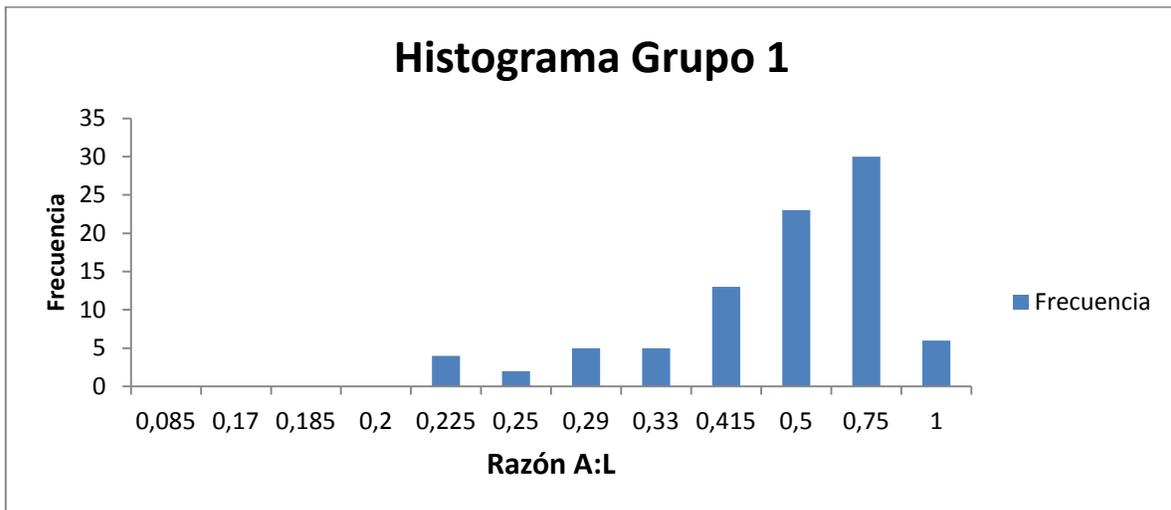


Figura 6.4- Histograma de razones de tamaño (Ancho:Largo) de los circones del grupo 1.

Grupo 2

Este grupo tiene 4 circones 38, 40, 90 y 165 Ma, y corresponden a cristales, con fracturas internas y núcleos heredados. Al ser menor cantidad, su presencia en la estadística de medidas total está poco representada. Sin embargo, estos 4 granos se encuentran en entre las proporciones cercanas a 0.5 y 0.75 (1 y 2 granos respectivamente)

Grupo 3 (212 – 324 Ma)

Este grupo está representado por 12 circones. La estadística de las razones de tamaño en el histograma (fig. 6.5) muestra que un 75% de los circones tiene relaciones de tamaño cercanas a 0.5 y 0.75 (33% y 42% respectivamente). Varias de estas edades corresponden a núcleos heredados con borde recrystalizado más joven, sin embargo mucho de estos bordes no pudieron

ser datados debido a que el espesor era menor al tamaño del punto de datación, en torno a los 30 μm .

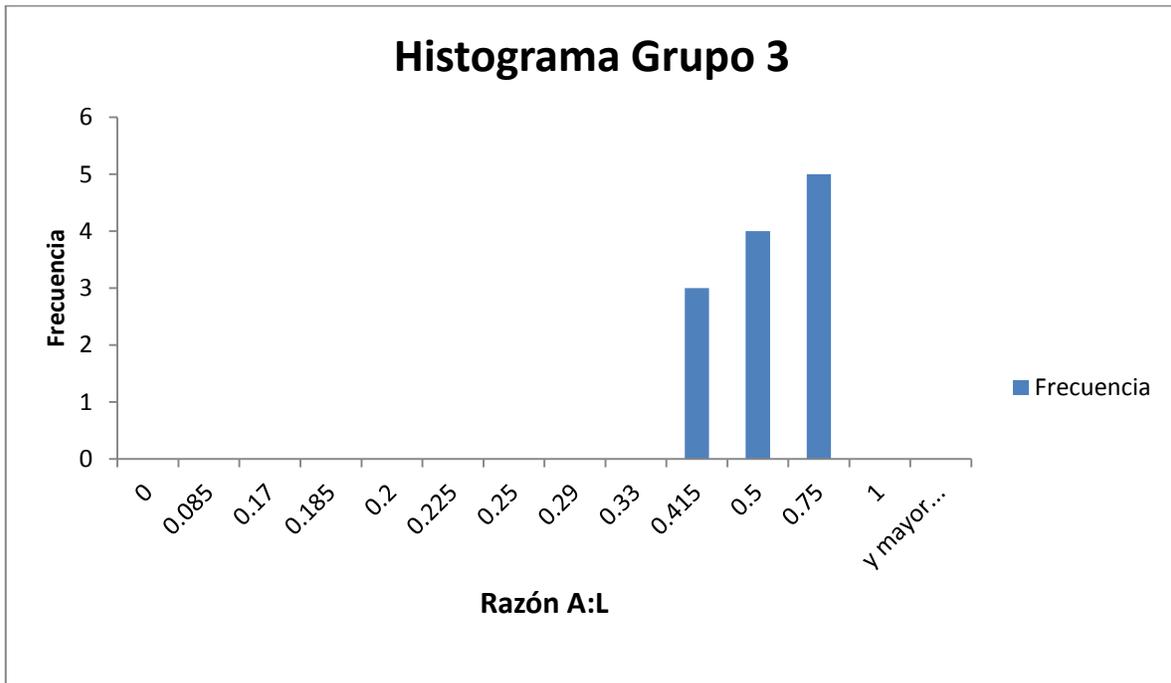


Figura 6.5- Histograma de razones de tamaño (Ancho:Largo) de los circones del grupo 3.

Grupo 4 (488 – 2910 Ma)

Grupo de los circones de mayor edad, consta de 7 granos, 86% de los cuales integran proporciones de tamaño cercanas a 0.5 y 0.75, mientras que el circón restante tiene una proporción cercana 1:1. Las edades de estos circones también representan en general núcleos heredados con borde de crecimiento más joven, sin embargo a diferencia del grupo 3, los bordes no son de edades jóvenes sino dentro del mismo grupo 4 (fig. 6.6) sin embargo, por los motivos antes descritos, no se descarta que pudiera tener bordes recristalizados jóvenes delgados menores a 30 μm que no pudieron ser datados. Los núcleos heredados son fácilmente reconocibles ya que presentan bordes redondeados, a veces rectos pero con zonación oscilatoria truncada.

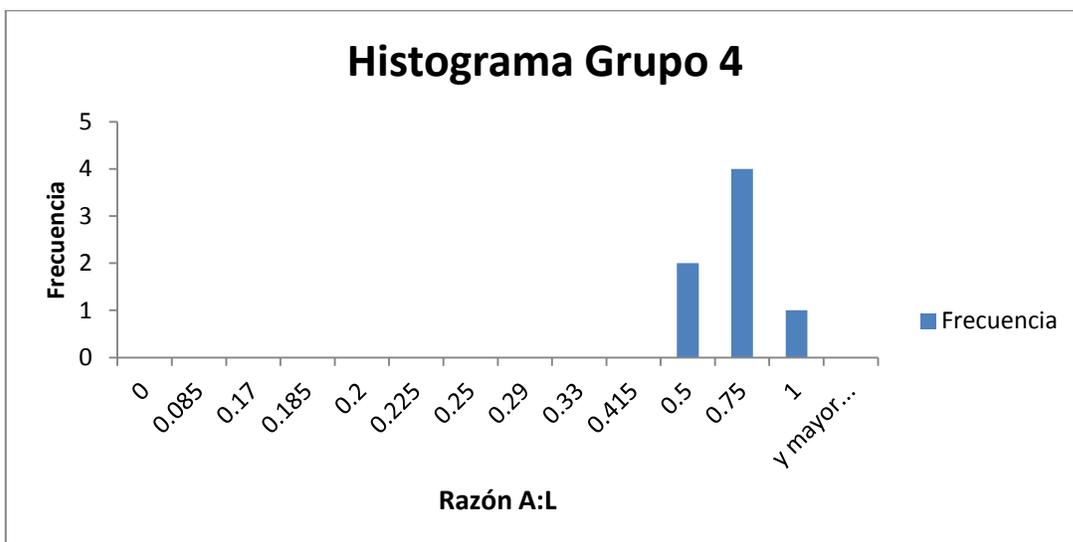


Figura 6.6- Histograma de razones de tamaño (Ancho : Largo) de los circones del grupo 4.

6.2.2 Casos particulares

A continuación se describen de forma general aquellos cristales de circón datados que presentan características texturales y geocronológicas particulares.

Circones con núcleo heredado y borde recrystalizado

Se detectaron 4 cristales con núcleos heredados y bordes recrystalizados, las edades se resumen en la Tabla 1:

N° Circón	Edad del borde (Ma)	Edad del núcleo (Ma)
19	12,3 ± 1,0	240 ± 17
31	12,3 ± 1,0	212 ± 17
37	12,6 ± 1,0	219 ± 16
150	14,1 ± 1,1	333 ± 57

Tabla 1- N° del circón, edades del núcleo y borde. Imágenes CL en Anexo 4.

El cristal más antiguo

El circón más antiguo encontrado en la muestra es el N° **176**. Tiene una edad puntual corregida $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de $3023 \pm 276,9$ Ma, y $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de 2687 ± 20 Ma. Presenta un núcleo homogéneo de color calipso y un borde recrystalizado menor a $5 \mu\text{m}$ de tonalidades moradas. Las tonalidades del núcleo son observables solamente en el circón antiguo N°172, de edad puntual *ca.* 500 Ma.

Otros

Los circones del Grupo 2 (N° 46, 54 y 58) presentan características geocronológicas particulares, ya que son los únicos 3 granos de edades entre 40 y 165 Ma. Por la textura y las características de la datación, se consideran los circones de este grupo como problemáticos (ver discusión).

6.3 Geocronología U-Pb

6.3.1 Concordia

Diagrama Tera-Weisserburg (Fig. 6.7) de las edades del grupo 1. Se puede observar un desplazamiento de varios puntos en la vertical alejándose de la concordia.

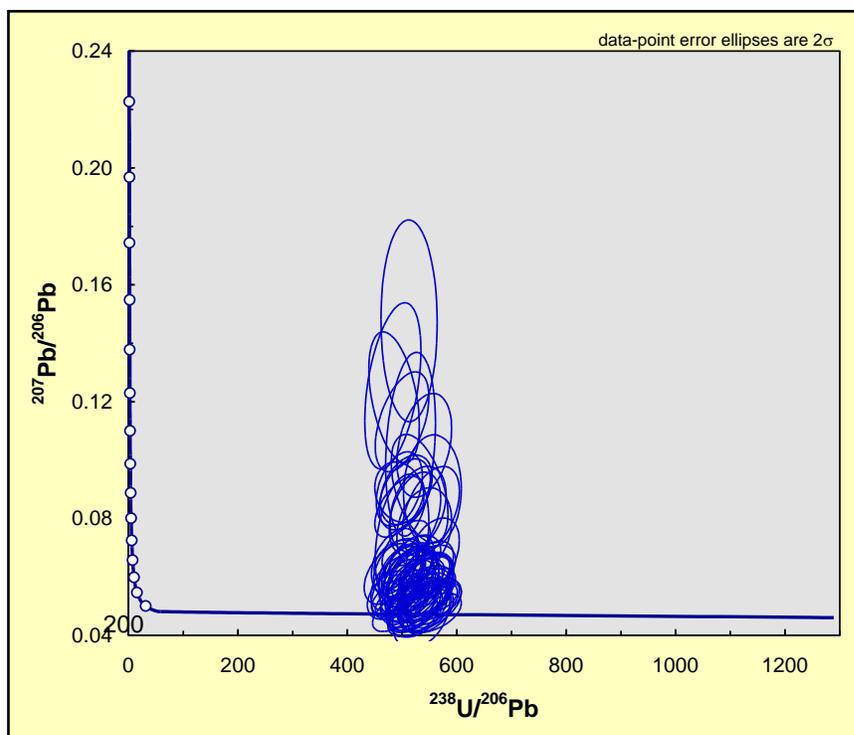


Figura 6.7- Diagrama Tera-Weisserburg de las edades del grupo 1

6.3.2 Corrección plomo común

Se aplicó el modelo de evolución de Stacey y Kramers, (1975) para corrección de Pb común utilizando las funciones programadas en Isoplot 3.75 (SingleStagePbR(Age, WhichRatio)). Los resultados de las edades se contrastan en la tabla del Anexo 2. En los histogramas de las Figuras 6.1 y 6.8 se muestra la comparación de los datos con y sin corrección por Pb común, respectivamente.

6.3.3 Histograma de edades

En los siguientes gráficos de histogramas se representan los principales grupos de edades de circones, además de una comparación del grupo 1 con y sin corrección de Pb común.

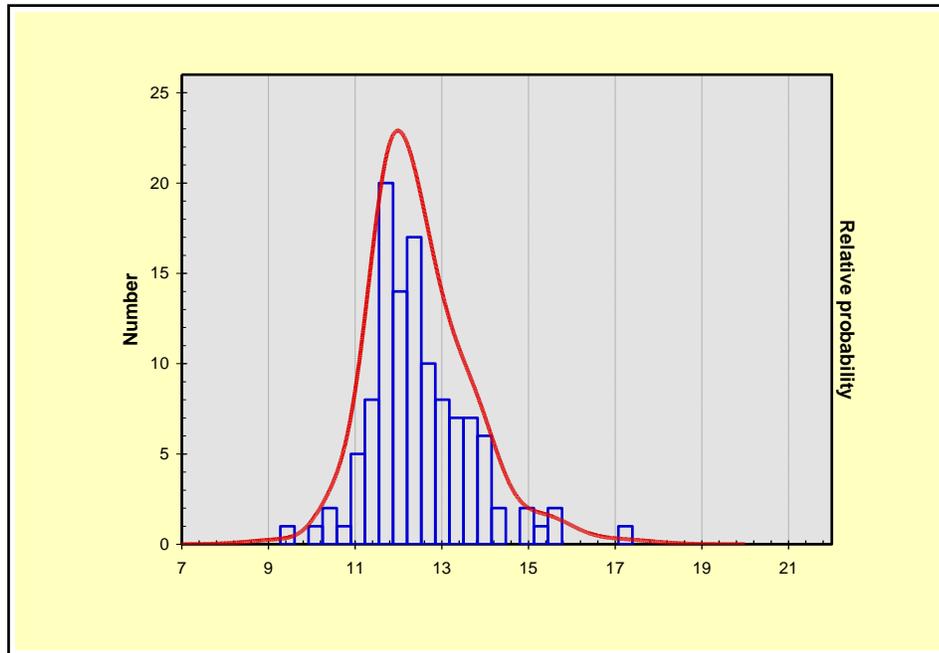


Figura 6.8- Histograma de edades Grupo 1 con corrección del Pb común

6.3.4 Edad integrada

Para calcular la edad integrada del nivel de la ignimbrita, se ocuparon las herramientas del software “isoplot 3.75”, en particular *Tuffzircage* para visualizar las edades del grupo 1 (Fig. 6.9) y *Weighted average age* para calcular la edad promedio ponderada del grupo seleccionado (Fig.6.10 y 6.11).

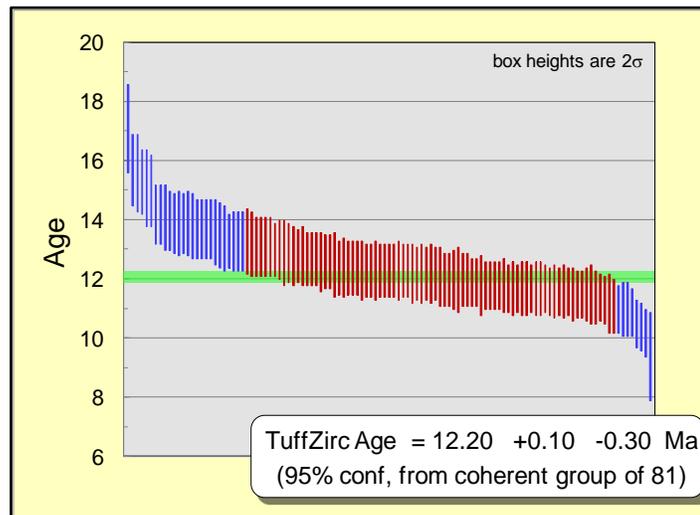


Fig. 6.9. Diagrama que muestra las edades del grupo 1 y sus errores asociados. En rojo las 81 edades que el software considera como “coherentes” analíticamente para el cálculo de edades

Se realizaron 2 cálculos de edades promedio ponderadas considerando los datos “coherentes” del diagrama *Tuffzircage* (fig.6.10) y considerando la mayoría de las edades del grupo 1 excepto por aquella *ca.* 17 Ma. La edad promedio calculada para los circones del grupo 1 fue de 12.29 ± 0.19 Ma, con un MSWD = 4.7. La edad promedio calculada considerando las edades “coherentes” del *tuffzirc* fué de 12.09 ± 0.11 Ma, MSWD = 1.3.

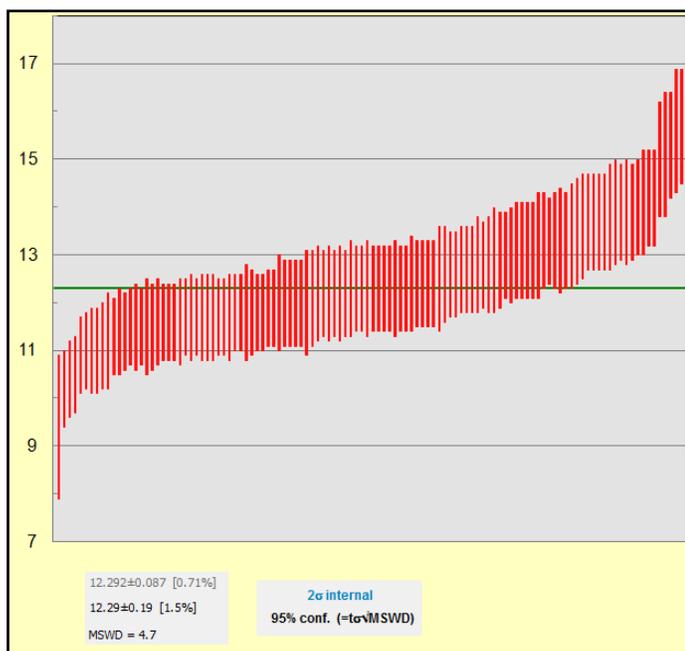


Figura 6.10- Diagrama que muestra las edades del grupo 1 sin considerar la edad de ca. 17 Ma y sus errores asociados. La edad promedio calculada de esta forma es 12.29 ± 0.19 Ma, MSWD = 4.7

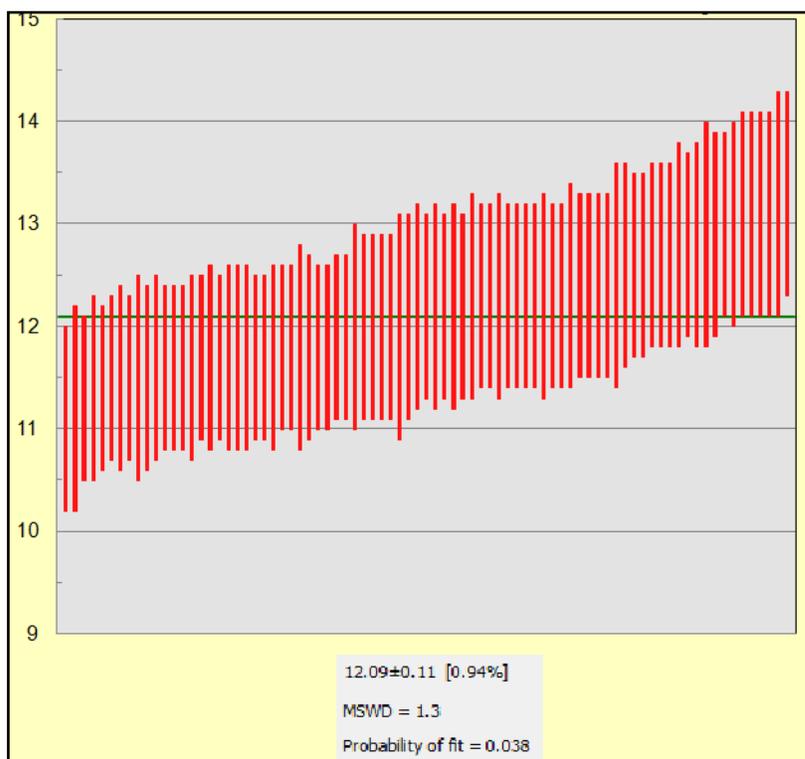


Figura 6.11- Diagrama que muestra las edades de los 81 circones seleccionados por *tuffzirc* y sus errores. La edad promedio calculada de esta forma es 12.09 ± 0.11 Ma, MSWD = 1.3

7. Discusión

7.1 Análisis de litofacies

A continuación se analizan y comparan los resultados de la descripción y clasificación de las principales litofacies de la sección principal y más completa de las ignimbritas Salar Grande (Localidad N°1: Llano de la Laguna Seca sur). Tanto la clasificación como la interpretación de las litofacies se hicieron de acuerdo a lo señalado por Branney y Kokelaar (2002). Posteriormente se correlaciona litológica y estratigráficamente esta columna principal con las otras 4 localidades descritas en el Capítulo 5. Muchas de las litofacies de estas últimas localidades coinciden con la columna principal, por lo que se limita a describir las litofacies distintas, que estarían indicando variaciones laterales de las características de depositación y régimen de la corriente que las generó. Cabe destacar que la mayoría de las localidades revisadas están dentro de la caldera Salar Grande (Fig. 5.2), por lo que estos depósitos corresponden al *in flow* de la misma. Lo anterior añade mayor complejidad a las interpretaciones de los depósitos asociados al colapso de una caldera.

7.1.1 Columna Principal (Llano de la Laguna Seca sur)

Las litologías que afloran en la localidad N°1 Llano de la Laguna Seca sur, se resumieron en la columna integrada de la Fig. 5.3. A continuación se describen brevemente las características de las litofacies y su interpretación.

La base de la columna es una *toba de lapilli maciza con pipas de elutriación (mLTpip)*. Originalmente (Wilson, 1980, Francis, 1993) se propuso que estas pipas se formaban por fluidización durante el flujo en movimiento. Posteriormente se propuso que, dada la dificultad de preservar estas estructuras subverticales durante el movimiento, estas se habrían formado debido al escape de gas a través del depósito no compactado, una vez depositado, removiendo la fracción fina (Branney y Kokelaar, 2002). Estos autores interpretan un régimen de agradación rápida para las condiciones de depositación.

Sobre este nivel se encuentra un paquete de 25 m donde se intercalan *brechas líticas macizas (mlBr)* y *tobas de lapilli macizas (mLT)*. El contraste litológico que existe entre las brechas, que generalmente tienen un espesor de decenas de centímetros y las tobas de lapilli macizas métricas (Fig. 5.4B) sugiere al menos, dos escenarios: 1- Contacto entre unidades de flujo en cuyo caso los niveles brechosos corresponderían al Layer 3 en el modelo del “Standard flow unit” de Sparks *et al.* (1973). 2- Litofacies depositadas de manera agradacional, por una misma corriente de densidad piroclástica que cambia en aporte y régimen de depositación. No existen evidencias tales como contactos evidentemente erosivos, *hiatus*, entre otros, que permitan discernir que la corriente piroclástica que formó cada una de las capas brechosas fue distinta, una de otra. Por anterior, es plausible considerar que corresponden a superficies de agradación y cambios en los aportes (mayor cantidad de clásticos) a la corriente. Estos componentes, que pueden ir de lapilli a bloques, podrían corresponder a “lag-breccias” o brechas de arrastre (Walker, 1985; Branney y Kokelaar, 2002) producto del colapso del conducto eruptivo, que en este caso está relacionado, en parte, al proceso de colapso de la caldera Salar Grande. Walker, (1985) señala que este tipo de brechas podría generarse también por avalanchas relacionadas al evento

volcánico incorporadas al flujo, sin embargo, en todas las localidades se encuentran este tipo de brechas intercaladas, lo que denota que el proceso que la generó distribuyó ampliamente los depósitos, lo que contrasta a lo que podría generar un proceso más local como una avalancha.

El contacto entre los niveles anteriores y los niveles soldados de *toba de lapilli maciza eutaxítica* (**emLT**) y el vitrofiro (**lava-likeT**) que los sobreyacen no fue observado en terreno.

La explicación clásica propone el soldamiento como producto de la compactación y carga de una capa con alto contenido calórico, a alta temperatura, luego de su emplazamiento. El contacto relativamente abrupto entre los niveles soldado y vitrofirico, sugieren distintas proporciones de fragmentos juveniles y fragmentos líticos, que podrían estar controlando la capacidad de mantener el calor en los distintos niveles. En otras palabras, niveles con mayor cantidad de juveniles estarían más soldados que aquellos con más fragmentos líticos, que podrían enfriar el sistema disminuyendo el soldamiento (Branney y Kokelaar, 2002; Naranjo, com. verbal).

Sobre los niveles anteriores (contacto no observado *in situ*) se repite una sucesión de aprox. 40 m de potencia, de iguales características a los primeros 60 m de la columna. Están compuestos por *brechas líticas macizas* (**mLBr**) intercaladas en *tobas de lapilli macizas* (**mLT**), que a su vez, infrayacen niveles de *toba de lapilli maciza eutaxítica* (**emLT**) y un vitrofiro (**lava-likeT**). Los siguientes 10 m, que corresponden al techo de la columna consisten principalmente en *tobas de lapilli macizas* (**mLT**) y subordinadas *brechas líticas macizas* (**mLBr**) intercaladas.

Cabe destacar que la brecha de bloques (8.4 ± 0.5 Ma) que sella la columna completa habría ayudado a preservar los depósitos de la ignimbrita, que tanto al norte como al este, en el Llano de la Laguna Seca, aparecen evidentemente más erosionados, con pérdida importante de material a través de las quebradas.

7.1.2 Correlación de localidades

Localidad N°2 Portezuelo León muerto

Las litologías que afloran en la localidad N°2 Portezuelo León muerto, se resumieron en las columnas A y B de las Fig. 5.10 y 5.11, respectivamente. A continuación se describen brevemente las características de las litofacies y su interpretación.

La columna A, presenta en la base una *toba de lapilli maciza* (**mLT**) de 15 m, con una matriz particularmente rica en cristales de biotita, que además tienen mayor proporción de estos cristales que en las pómez, lo que estaría indicando que una gran cantidad de material fino se perdió por procesos de elutriación y/o segregación durante el transporte y emplazamiento de la corriente piroclástica (Branney y Kokelaar, 2002). Los siguientes niveles son *brechas líticas con estratificación difusa* (**dslBr**) de pocos centímetros y *tobas de lapilli con estratificación difusa* (**dsLT**) métricas que infrayacen una potente *brecha lítica maciza* (**mlBr**) de poco más de 10 m. Los distintos niveles con estratificación difusa y clastos de mayor tamaño, formando capas discontinuas (Fig. 5.12B y C) sugieren una superficie de agradación en la cual los clastos de mayor tamaño se transportaron por saltación o rotación hasta ser depositados. Posiblemente las brechas intercaladas, y en particular el nivel potente en el techo de esta columna, correspondan a “lag-breccias” o brechas de arrastre, producto de los colapsos sucesivos de la caldera Salar Grande, de igual forma como los niveles brechosos descritos en la columna principal. Más aun, estos niveles se correlacionan espacial y litológicamente con los niveles intermedios de la columna principal de la Localidad N°1 Llano de la Laguna Seca (Fig. 7.1).

La columna B, presenta en la base una sucesión constituida por *toba de lapilli con estratificación difusa* (**dsLT**), *tobas con estratificación paralela* (**sT**) y *cruzada* (**xsT**) ricas en líticos, *toba de lapilli maciza con pipas de elutriación* (**mLTpip**), *brecha lítica maciza rica en pómez y fragmentos finos* (**mlBr-pfrich**) y un nivel de *toba de lapilli maciza eutaxítica* (**emLT**). Por su disposición estratigráfica, espacial y características litológicas se correlacionan con niveles intermedios de la columna principal y a su vez, con los niveles inferiores de la Columna A de la localidad N°2 Portezuelo León muerto (Fig. 7.1).

Localidad N°3 Llano de las Lagunas Bravas

Las litologías que afloran en la localidad N°3 Llano de las Lagunas Bravas, se resumieron en las columnas A y B de las Fig. 5.20 y 5.21, respectivamente. A continuación se describen brevemente las características de las litofacies y su interpretación.

La columna A presenta en su base una *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)* con diaclasamiento columnar, que subyace, en contacto erosivo, potente nivel de cinerítico deleznable muy rico en pómez clasificado como *toba de lapilli maciza rica en pómez (mLTp)*. Por su relación de contacto se puede inferir que pasó un tiempo suficiente de enfriamiento, diaclasamiento y posterior erosión. Evidencia de esto es la morfología de los fragmentos líticos angulosos del nivel inferior, inmersos en el nivel superior. Estas lajas y bloques probablemente ya estaban fragmentados al momento del emplazamiento del nivel superior, tal como se observan hoy superficies de ignimbritas más jóvenes. Se reconoce en esta zona, por lo descrito anteriormente, dos unidades de flujo separadas por un *hiatus*, manifestado en el contacto erosivo entre ambos niveles (Fig. 5.24A).

Sobre la unidad de flujo superior descrita anteriormente, se encuentra, en contacto erosivo, un nivel de al menos 15 m de *toba de lapilli maciza (mLT)* en la parte inferior, que varía de manera gradual a una *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)* hacia el techo. Corresponde a una ignimbrita compacta, rica en pómez amarillas y pardas fibrosas tubulares en matriz particularmente rojiza, rica en esquirlas y cristales de plagioclasas, biotita y cuarzo, cuyo grado de soldamiento aumenta hacia el techo, donde es posible encontrar pómez aplastadas y fiamme vítreas negras. Estas características no han sido observadas en las litofacies de la ignimbrita Salar Grande. Sobreyace en esta localidad unidades volcánicas del Mioceno superior datadas en ca. 10 Ma (Naranjo *et al.*, en prep.) y fué definida como “ignimbrita Narnia” por Clavero, *et al.* (1998), datada en ca. 9.8 Ma, K-Ar en biotita. Sin embargo sus características petrográficas, geocronológicas, estratigráficas y de distribución espacial son coincidentes con la ignimbrita Los Colorados definida en Argentina por Seggiaro *et al.* (2007) y que Naranjo *et al.* (2014), asigna como fuente a la caldera Los Colorados, ubicada 30 km al NE del Salar de las Parinas (Fig.5.2). Se propone asignar esta unidad de flujo a la ignimbrita Los Colorados. Cabe destacar que, si la unidad de flujo de la ignimbrita Salar Grande corresponde a los niveles propuestos de la columna principal, algunos niveles que se observan tanto en la columna principal como en columna B de esta localidad (en particular los niveles soldados que se describen en el párrafo siguiente), habrían sido erosionada previa al emplazamiento de la ignimbrita Los Colorados.

La columna B se divide básicamente en dos grandes niveles. El primero presenta un nivel vitrofirico inferior *vitrofito (lava-likeT)* que disminuye su grado de soldamiento hacia hacia el techo variando a una *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)*. Subyace en aparente contacto erosivo, dos unidades de enfriamiento de la ignimbrita Laguna Verde, datada 10 km al sur en ca 4 Ma (Clavero *et al.*, 1998). Las litofacies anteriormente descritas estarían sobre aquellos niveles cineríticos ricos en pómez de la columna A, localmente erosionados previa depositación de las ignimbritas Los Colorados y Laguna Verde.

Se propone que los niveles de las columnas A y B de la localidad N°3 Llano de las Lagunas Bravas se correlacionan con aquellos de la columna principal (localidad N°1 Llano de la Laguna Seca sur) de la siguiente manera: El nivel soldado, diaclasado inferior de la columna A corresponde a los niveles con iguales características litológicas (petrografía y soldamiento principalmente), de la parte inferior de la columna principal, y que a su vez, el nivel cinerítico superior corresponde a los niveles de brechas intercaladas en tobas macizas de la parte media de la columna principal (Fig. 7.1). Menos probable es que correspondan a niveles de similares características de la parte alta de la columna principal ya que no se han reconocido las mismas facies (tobas macizas ricas en pómez, cinerítica, con potencias superiores a 15 m) con la potencia y las características antes descritas.

Por otra parte, es probable que los niveles soldados y vitrofíricos (**emLT** y **lava-likeT**) de la columna B (que topográficamente se encuentran más de 30 metros sobre la base de la columna A) se correlacionen con los niveles soldados y vitrofíricos superiores de la columna principal de las Ignimbritas Salar Grande (Fig. 7.1), por sus características petrográficas, y los potentes espesores, que localmente alcanzan 20 m. Sin embargo, también pueden corresponder a niveles soldados del techo de la ignimbrita Los Colorados, observados más al norte. Para confirmar a cual pertenece, se necesitan más antecedentes de distribución espacial y los cambios laterales de las distintas facies y datos geocronológicos adicionales. Por los argumentos expuestos anteriormente, en este trabajo se considera, como más probable, que estos niveles corresponden a aquellos superiores de las ignimbritas Salar Grande.

Localidad N°4 Llano de la Laguna Seca norte

Esta sección fue realizada a menos de 4 km al norte de los principales puntos de la sección principal de la Localidad N°1. A diferencia de esta última, los afloramientos en esta localización no son abundantes ni continuos, salvo excepciones en algunas quebradas profundas. Allí fue posible reconocer las mismas litofacies identificadas previamente en la columna principal. Estas son dos paquetes de similares características que, de base a techo, consisten en: *tobas de lapilli, macizas (mLT)* y *con estratificación difusa (dsLT)* intercaladas con *brechas líticas, macizas (mlBr)* y *con estratificación difusa (dslBr)* bajo *toba de lapilli maciza eutaxítica (emLT)*, ver Figura 7.1. Destacan, en los niveles basales de esta columna, estructuras oblicuas respecto de la horizontal, que se interpretan como estratificación cruzada, de gran espesor (métricas) posiblemente debido a la depositación del material piroclástico debido a la presencia de un obstáculo topográfico (Fig. 5.30C)

Localidad N°5 Salar Grande norte

La localidad N° 5 tiene continuidad estratigráfica y litológica con la Localidad N°4 hacia el norte. Consta de 3 litofacies principales. La primera son niveles brechosos y cineríticos ricos en cenizas y pómez intercalados (**mlBr**, **mLT** y localmente *toba de lapilli maciza rica en escoria mLTsc*). Naranjo *et al*, (2013) reportan una edad para uno de estos niveles de 11.7 Ma, K-Ar en biotita. Estos niveles brechosos no consolidados, como describió anteriormente, generalmente forman superficies aterrazadas ricas en líticos angulosos, que en particular, en esta zona, pueden alcanzar tamaño de bloques métricos, en matriz de ceniza. Estas brechas, corresponderían

también, al igual que con los niveles brechosos de la columna principal, a “lag-breccias” o brechas de arrastre de fragmentos asociados al colapso de la caldera Salar Grande (Naranjo *et al*, 2013).

Sobre estas brechas, se encuentran *tobas de lapilli macizas* (**mLT**) que aumentan el grado de soldamiento hacia el techo, pudiendo encontrarse *fiamme* orientadas paralelas e incluso, en ciertas zonas, a los pies del volcán Puntiajudo de la Isla (Fig.5.2), estas rocas presentan bandeamientos centimétricos, irregulares y sinuosos que podrían corresponder a estructuras de deformación reomorfica (*toba de lapilli maciza eutaxítica*, **emLT** con estructuras reomorficas locales, **emLT-rheo**). Las rocas con estas características coinciden con una pendiente de aprox. 15-20°, por lo que esta deformación podría corresponder a una acomodación gravitacional post-soldamiento.

Por la posición estratigráfica y la continuidad observada tanto en terreno como en imágenes aéreas (Google Earth) estos niveles se correlacionan con aquellos ubicados en la parte superior de la columna principal (Fig. 7.1).

Síntesis

Existe una clara repetición de dos sucesiones de litofacies, que tienen su mejor representación en la localidad N°1. Se reconoce además, una correlación estratigráfica, espacial y litológica con las otras localidades. Adicionalmente fue posible identificar, en la localidad N°3, columna A, una superficie de erosión, interpretada como un *hiatus* entre dos unidades de flujo distintas de las ignimbritas Salar Grande, y esta, a su vez, inferida en los niveles de la columna principal. Sobre la base de estos antecedentes, se propone una división de los distintos niveles de las ignimbritas Salar Grande en dos subunidades (Fig. 7.1). La subunidad 1 consiste en una intercalación de brechas (**mBr**, muchas de ellas de arrastre o “lag breccias”) y niveles cineríticos macizos (**mLT**), algunos de ellos asociados a la depositación agradacional de la misma corriente piroclástica de densidad. La sucesión anterior se encuentra bajo potentes niveles soldados (**emLT**) y vitrofíricos (**lava-likeT**).

La subunidad 2 presenta las mismas litofacies, salvo que en su techo, sobre los niveles soldados, presenta distintos niveles de tobas macizas y brechas (**mLT** y **mBr**). Ambas subunidades están separados una superficie de erosión que representa un *hiatus* entre la depositación de cada una. Con las edades K-Ar disponibles (Fig. 5.3, Anexo 1), no es posible establecer este lapso, sin embargo, considerando que todas las edades son concordantes, cercanas a los 12 Ma, el periodo de tiempo probablemente fue reducido (miles o cientos de miles de años).

Ambas subunidades están constituidas por al menos una unidad de flujo y una de enfriamiento. No fue posible distinguir, dentro de cada subunidad y particularmente en los niveles intercalados brechosos, indicadores erosivos ni termales que permitieran separar en más unidades de flujo o de enfriamiento distintas.

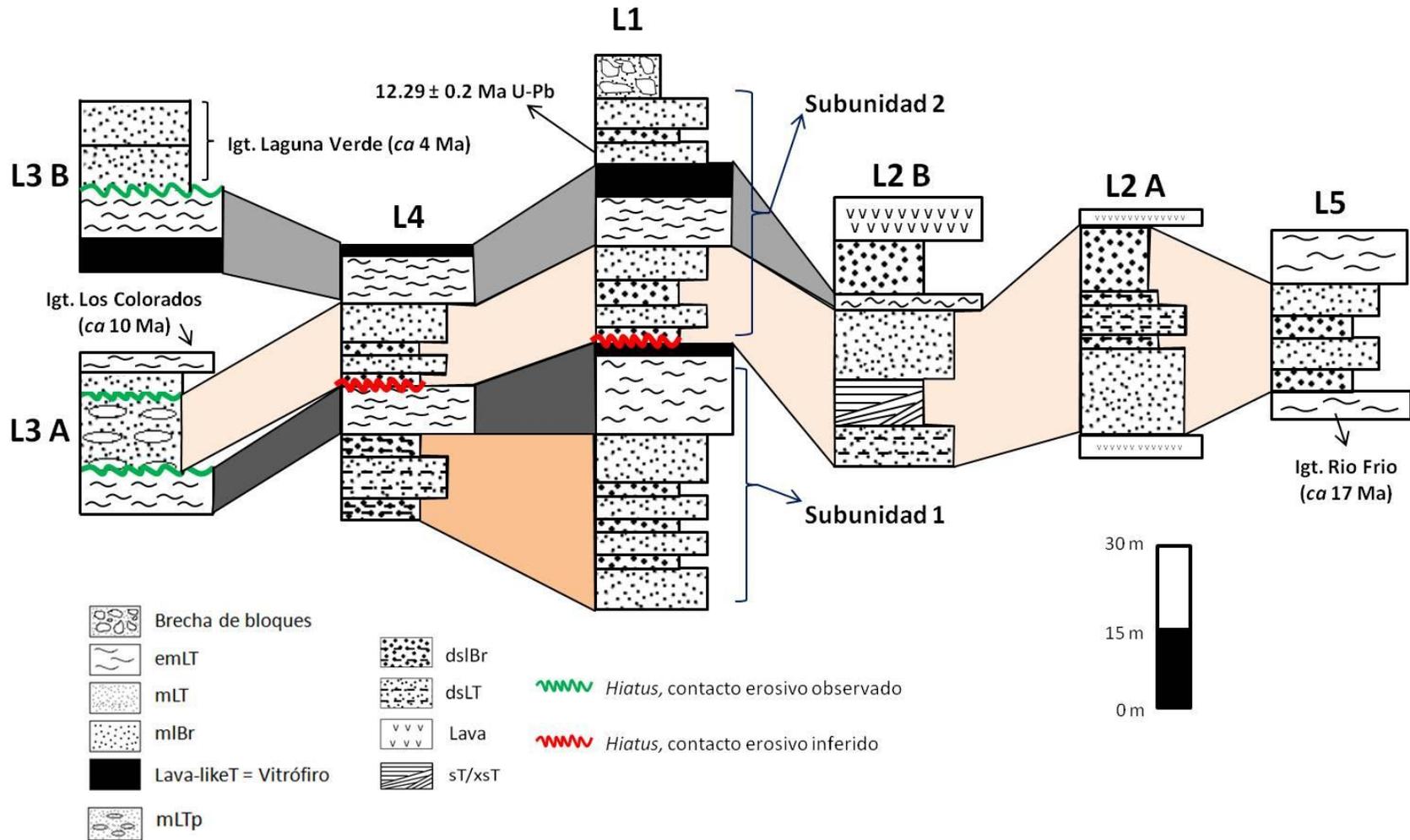


Figura 7.1- Esquema integrado de las columnas de las 5 localidades. L1: Llano de la Laguna Seca sur. L2 A y B: Portezuelo León Muerto. L3 A y B: Llano de las Lagunas Bravas. L4: Llano de la Laguna Seca norte. L5: Salar Grande norte. Las subunidades se componen de distintas litofacies y pulsos, y se encuentran limitadas por superficies de erosión (*hiatus*) observadas en L3A e inferidas en L1 y L4. Los colores unen las equivalencias entre litofacies.

7.2 Análisis de circones

7.2.2 Grupos

Morfologías, tamaños y zonaciones

Los circones comúnmente crecen en radios entre 0.2 y 1 (100% de los 197 circones de las ignimbritas Salar Grande). Este parámetro reflejaría principalmente la velocidad de cristalización. Circones de cristalización rápida, en intrusiones subvolcánicas o granitoides someros típicamente tienen relaciones ancho:largo (A:L) pequeñas (Fig. 7.2), de formas aciculares (Corfu, *et al*, 2003). Del total de circones, menos del 12% tiene relaciones A:L entre 1:5 y 1:3, y en particular para el grupo de edades más jóvenes (Grupo 1), donde se espera, estén los cristales asociados a la ignimbrita, el porcentaje alcanza el 18%. Para poder decir si estos porcentajes son representativos de las poblaciones de circones de una roca piroclástica, que podría o no tener circones asociado al evento volcánico, más poblaciones de circones con residencia prolongada en la cámara (Schmitt *et al*, 2002), además de accesorios y accidentales, sería necesario realizar más mediciones en otros niveles de la ignimbrita. Independiente del porcentaje (si se considera alto o bajo para una roca volcánica), el 100% de los circones en estas razones (1:5 a 1:3) está en el grupo 1. Esta información tiene importancia para las metodologías de selección de circones para geocronología. Por ejemplo, si objetivo es obtener las edades de rocas volcánicas (o cercanas), sería recomendable elegir, tanto en la etapa de separación como en la de datación, los circones con baja razón A:L.



Figura 7.2. Cristal de circonio N° 28. Razón A:L = 0.21. Spot del láser (circunferencia roja) de 30 μm .

Las zonaciones de los circones reflejan variaciones en la composición, asociadas principalmente a las cantidades de los elementos traza Hf, P, Y, tierras raras, U y Th, entre otros. Pueden ser reconocidas con facilidad en imágenes de catodoluminiscencia y en menor medida, particularmente en circones metamórficos, bajo el microscopio óptico (Corfu, *et al*, 2003).. Los circones de la muestra en estudio presentan en general zonaciones oscilatorias, sectoriales y en menor medida son homogéneos. Se observa que en general, para todos los grupos definidos, las

dataciones en distintas zonaciones (zonas oscuras y claras, o entre bandas) no afectan significativamente la edad puntual considerando los errores individuales (Ver Anexo 3, circones N° 12, 17, 20, 39, entre otros).

Existen casos particulares, como los circones N° 46 (Fig. 7.3) y 58, donde el tamaño del punto de datación, de aprox. 30 μm , aparentemente realizó el análisis en dos zonaciones distintas, que corresponderían a un núcleo heredado con un borde de cristalización, por lo que las edades del borde probablemente estén promediadas con las edades del núcleo. Esto denota la importancia de las imágenes CL para poder distinguir posibles núcleos heredados y evitar obtener edades si significado geológico.

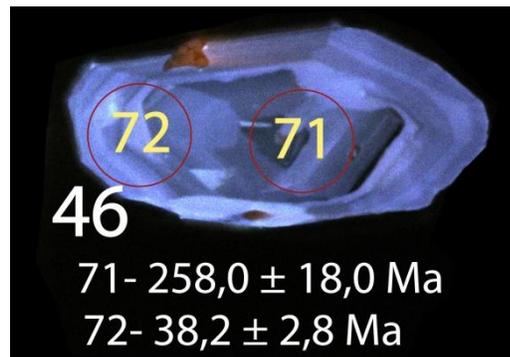


Figura 7.3- Cristal de circon N° 46. Núcleo heredado de 258 Ma y borde de cristalización más joven (38 Ma) que probablemente corresponda a un promedio entre el núcleo y el borde. Spot del laser (circunferencia roja) de 30 μm .

Los circones N° 46, 54, 58 y 99 pertenecen al grupo 2. Debido a su reducido tamaño respecto del ancho del laser de datación, tanto el circon N°46 (Fig. 7.3) como el N°58 probablemente tenga edades promediadas entre su borde y su núcleo. Los circones N° 54, y N°99 que tienen edades de 40 y 90 Ma, posiblemente correspondan a circones detríticos de unidades eocenas y del Cretácico Superior que no afloran en el área de estudio, pero son abundantes en la cordillera de Domeyko.

Basamento

En los histogramas de edades se identifican los 3 grupos principales. Las edades más jóvenes se han asociado a la edad de la ignimbrita (ver discusión respecto a edad integrada). Del grupo 1, se ve una serie de edades prácticamente concordante (con los errores individuales) entre 10 y 15 Ma. Sin embargo, el grano más antiguo del grupo 1 de *ca.* 17 Ma rompe con la tendencia. Dado lo anterior, y teniendo en cuenta que en la zona afloran unidades como la ignimbrita Rio Frio de edades K-Ar y Ar/Ar entre 17 y 20 Ma (Naranjo *et al.*, 2013) y las rocas efusivas riódacíticas, como los domos al W y SW del Co. del Medio tienen edades K-Ar reportadas entre 16 y 18 Ma (Clavero *et al.*, 1998, Naranjo *et al.*, en prep.) se considera este grano como posible cristal accidental de alguna de estas unidades. Por otro lado, es esperable que algunos de los circones restantes en el rango 10-15 Ma no sean de la ignimbrita Salar Grande, sino del volcanismo Mioceno previo a la erupción en la zona, sin embargo, el volcanismo efusivo de la zona se caracteriza por ser andesítico y en menor medida andesítico-basáltico (Naranjo *et al.*, 2013), por lo que su importancia no debiera ser preponderante en esos rangos, ya que los circones son menos abundantes en rocas con esa composición (Corfu, *et al.*, 2003).

El segundo grupo importante (Grupo 3) posee edades entre 212 y 324 Ma (Fig. 6.2) obtenidas a partir de xenocristales y posiblemente circones detríticos. Algunos de los granos presentan bordes recristalizados datados, con edades cercanas a 12 Ma, y otros no datados debido a su delgado espesor. Los anteriores son interpretados como xenocristales con borde de autocristales, que habrían cristalizado en estadios finales de la cámara magmática, probablemente somera, previo a la erupción de la ignimbrita (Folkes, *et al.* 2011). Estos núcleos y xenocristales más antiguos pudieron ser incorporados por asimilación de la roca caja en la cámara magmática, por lo que reflejan que unidades estructuran el basamento en la zona de la Caldera Salar Grande. En efecto, 30 km al SW del salar Grande, en el cordón NS denominado Sierra de Aliste, afloran granitoides y pórfidos riolíticos asociados a lavas porfíricas de la formación La Tabla (Naranjo *et al.*, en prep). Una de las unidades intrusivas posee una edad U-Pb en circón de 263.8 ± 3.4 Ma (Naranjo *et al.*, en prep.). 40 km al NE del salar, en lado argentino, afloran las unidades intrusivas Granito Parinas, cuyas edades U-Pb en circón varían entre $265,1 \pm 2,6$ y $270,7 \pm 4$ Ma y la Granodiorita León muerto 246 ± 6 K-Ar y $253,7 \pm 1.9$ U-Pb en circón (Naranjo *et al.*, 2013). Todas estas edades son coincidentes con el rango de edades de los circones heredados del grupo 3 de 212 a 324 Ma. Cabe señalar que la comparación se está haciendo entre edades puntuales en granos individuales y edades integradas de unidades intrusivas.

Más al sur (28° - 31°), Hervé *et al.*, 2014 reconocen, sobre la base de edades U-Pb en circones, 4 subdivisiones de las unidades intrusivas del Carbonífero al Triásico; Missisipiano (330 – 326 Ma), Cisuraliano (301 – 284 Ma), Permo-triasico (264 – 242 Ma) y Triásico superior (225 - 215 Ma). Así mismo, las edades del Grupo 3 coinciden particularmente, considerando los errores puntuales, con los *peaks* del Cisuraliano (entre 324 ± 23 Ma y 258 ± 18 Ma) y del Triásico superior (entre 212 ± 17 Ma y 242 ± 17 Ma).

El Grupo 4, con las edades más antiguas de la muestra posee 8 circones en el rango 488 ± 34 Ma y 601 ± 41 Ma, y dos cristales de edades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de 1093 ± 74 Ma y 2687 ± 20 Ma respectivamente. 38 km al NE del salar Grande, afloran esquistos, gneises y granitoides de las unidades Metamorfitas de mediano a alto grado y el granito Cerro Plegado, respectivamente, asignadas al lapso Cámbrico-Ordovícico inferior (Seggiaro *et al.*, 2007). Además, el rango de

edades cámbricas y precámbricas de los circones coincide con la edad del basamento metamórfico e intrusivo de las Sierras Pampeanas Orientales de 600 a 525 Ma y Occidentales de 515 a 460 Ma (Loewy *et al*, 2004, Ramos, 2008).

7.2.3 Edad integrada

Respecto de la corrección usada para el Pb común, comparando los histogramas de las edades con y sin corrección se puede notar que disminuyó la dispersión de los datos, lo que se refleja en un gráfico más cerrado, con un rejuvenecimiento en general de las edades más jóvenes del Grupo 1. Notoriamente las edades más antiguas, de los grupos 3 y 4 no sufrieron cambios significativos.

Se realizaron 2 cálculos de edades promedio ponderadas, concordantes considerando los errores individuales, utilizando los datos “coherentes” del diagrama *Tuffzircage* y considerando la mayoría de las edades del grupo 1 excepto por aquella *ca.* 17 Ma. La edad promedio calculada para los circones del grupo 1 fue de 12.29 ± 0.19 Ma, con un MSWD = 4.7. La edad promedio calculada considerando las edades “coherentes” del *tuffzirc* fué de 12.09 ± 0.11 Ma, MSWD = 1.3.

La herramienta *Tuffzircage*, del software Isoplot, considera edades coherentes analíticamente, pero no toma en cuenta razones geológicas para descartar aquellos circones no considerados. Más aun, no es posible determinar texturalmente que los circones más antiguos del grupo 1 (excepto el de *ca.* 17 Ma) no correspondan a la ignimbrita. Por lo anterior, se considera la primera como la edad integrada U-Pb para el nivel datado.

La edad U-Pb de 12.29 ± 0.19 Ma se interpreta como edad de cristalización de los circones en etapas finales de la cámara magmática previas a la erupción. Los tiempos de residencia se calculan como la diferencia entre la edad de un cristal y la edad de erupción y dependen de múltiples factores, el tipo de cristal, volumen del reservorio magmático, entre otros (Folkes, *et al.*, 2011). Se han estimado tiempos menores a 10.000 años para ignimbritas como la Bishop Tuff (650 km³), ignimbrita Oruani (530 km³) en Nueva Zelanda (Reid y Coath, 2000; Wilson y Charlier, 2009; Simon y Reid, 2005) y mayores a 100.000 años para las ignimbritas de La Pacana, Fish Canion (5000 km³), entre otras (Schmitt *et al.*, 2002; Bachmann *et al.*, 2007). Por otro lado en el Monte Unzen, se han estimado 90.000 años a partir de piroclastos de una erupción histórica (Sano *et al*, 2002).

En la Figura 7.5 se muestran las edades K-Ar en biotita de Naranjo y Cornejo, (1992) y la edad U-Pb de este estudio para la misma localidad (columna principal del Llano de la Laguna Seca sur). Se puede observar que las edades K-Ar son concordantes entre sí y la edad U-Pb es concordante con 4 de las 5 edades K-Ar, considerando los errores. La edad K-Ar que no es concordante con la edad U-Pb correspondiente a la N°4 (Fig. 7.5) de 11.2 ± 0.5 Ma, es la más joven de la columna y está intercalada en las demás, es decir, tiene edades más antiguas arriba y abajo estratigráficamente. Por lo anterior no es posible realizar un cálculo fiable del tiempo de residencia de los circones.

Debido a las bajas temperaturas de cierre de la biotita, calculadas en 295°C a $410^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ (Rollison, 1993) estas son interpretadas como edades eruptivas en este estudio. Se realizó una estimación con la edad más joven K-Ar de la columna N°4 de 11.2 ± 0.5 Ma y se obtuvo un rango de diferencia (residencia) de 400 ka a 1.78 Ma.

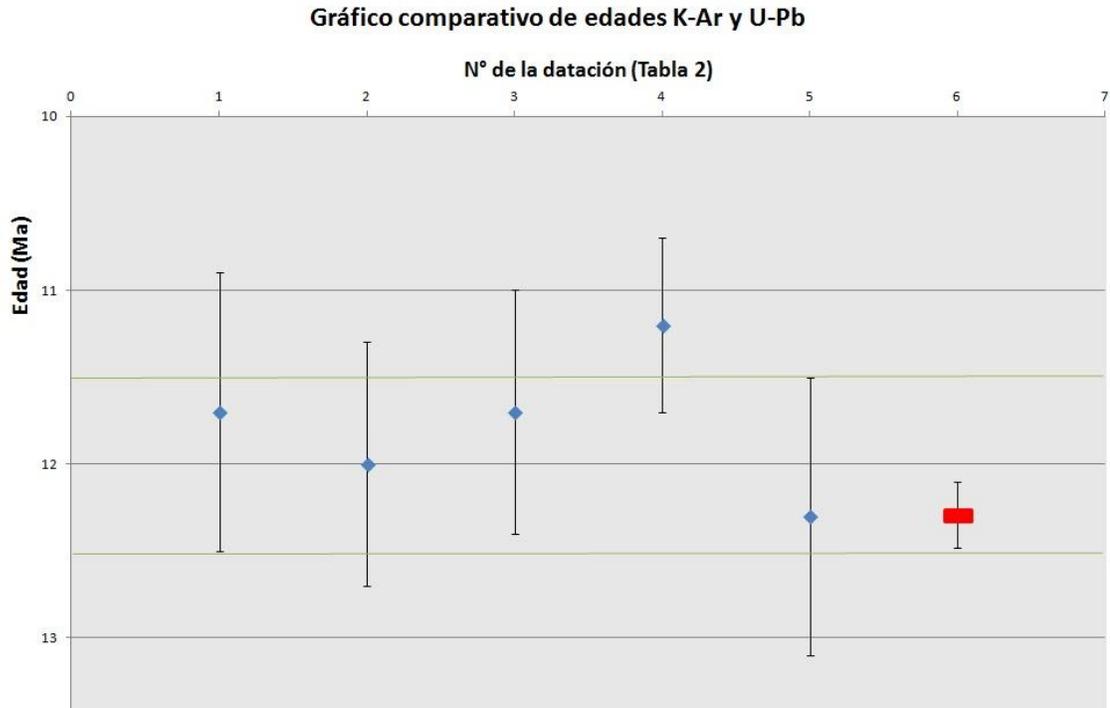


Figura 7.5- Edades K-Ar en biotita (en azul) de Naranjo y Cornejo (1992); y edad U-Pb en circón de este trabajo (en rojo) obtenidas de la localidad N°1 Llano de la Laguna Seca sur, en orden estratigráfico (base a la izquierda). 1: 11.7 ± 0.8 Ma 2: 12 ± 0.7 Ma 3: 11.7 ± 0.7 Ma 4: 11.2 ± 0.5 Ma 5: 12.3 ± 0.8 Ma 6: 12.29 ± 0.19 Ma (U-Pb)

8. Conclusiones

- 1- Se encontraron características litológicas y estratigráficas equivalentes entre columnas de las 5 localidades descritas para las ignimbritas Salar Grande que permitieron correlacionarlas. Existen variaciones laterales de las distintas litofacies que reflejan cambios locales en las condiciones del flujo y aportes a la corriente piroclástica. Ejemplos de lo anterior son las estructuras de estratificación cruzada métricas de la localidad N°4, posiblemente generadas por diferencias topográficas en el terreno, como también, las variaciones de niveles macizos (**mLT**) a estratificados y laminados (**xsT** y **sT**) y también difusos (**dsLT**). Las estructuras anteriores dejan de manifiesto que, para los niveles no-soldados, son comunes las superficies de agradación, que sugieren, para esos niveles, es mecanismo de sedimentación.
- 2- Se definieron dos subunidades para las ignimbritas Salar Grande, que presentan una asociación de litofacies equivalentes separadas por un *hiatus*, manifestado en una superficie de erosión observada en la columna A de la localidad N°3 del Llano de las Lagunas Bravas, e inferida sobre la base de las correlaciones litoestratigráficas, en la columna principal. La subunidad 1 consiste en una intercalación de brechas (**mBr**, muchas de ellas de arrastre o *lag breccias*) y niveles cineríticos macizos (**mLT**) bajo potentes niveles soldados (**emLT**) y vitrofíricos (**lava-likeT**). La subunidad 2 presenta litofacies equivalentes a la subunidad 1 y en su techo, sobre los niveles soldados, presenta distintos niveles de tobas macizas y brechas (**mLT** y **mBr**). Estas dos subunidades corresponden a lo menos a dos unidades de flujo y enfriamiento de las ignimbritas Salar Grande. No fue posible distinguir dentro de las subunidades características que permitieran separar entre distintas unidades de flujo o de enfriamiento.
- 3- Algunas de las intercalaciones de niveles brechozos (**mBr**) interpretados como brechas de arrastre de las subunidades 1 y 2 podrían reflejar un cambio en el aporte a la corriente piroclástica de densidad debido a colapsos sucesivos de distintos sectores de la caldera Salar Grande, ubicados predominantemente al este del Volcán Salar Grande (Llano de la Laguna Seca norte y sur) y al oeste del volcán Nevado León Muerto (Portezuelo León Muerto).
- 4- Las litofacies de la unidad de flujo presente en el techo de la columna B, de la localidad Llano de las Lagunas Bravas, no tienen correspondencia con los niveles de las ignimbritas Salar Grande (sublocalidad 1 y 2) y sus características permiten suponer que corresponderían a la ignimbrita Los Colorados.
- 5- La caracterización de los circones permitió identificar varios grupos según su morfología. Particularmente para el Grupo 1, cerca del 18% de los circones tienen bajas razones de ancho y largo, entre 1:5 y 1:3 (100% de estos circones están en el Grupo 1). Los cristales con estas características son interpretados como producto de una cristalización rápida en una cámara magmática somera previo a la erupción de la ignimbrita. Por otro lado, para

obtener edades U-Pb en circón de rocas volcánicas, la selección de cristales con estas razones de ancho y largo podría ser útiles para acotar el proceso de selección y separación, y eventualmente mejorar los datos geocronológicos.

- 6- La edad U-Pb calculada para la ignimbrita de $12,29 \pm 0.19$ Ma se interpreta como edad de cristalización de los circones en la cámara que albergó los magmas que produjeron este nivel de la ignimbrita Salar Grande. No es posible establecer el lapso entre las edades de cristalización de los circones y la edad de la erupción (K-Ar en este estudio) debido a la variabilidad de las edades. Por otro lado, una estimación con la edad más joven de la columna principal entrega rangos mayores a 400 ka.

- 7- El circón más antiguo del Grupo 1 (*ca* 17 Ma) se interpreta como un cristal accidental proveniente unidades volcánicas del Mioceno inferior, como niveles de las Ignimbritas Rio Frio, que afloran en el borde noroccidental de la caldera Salar Grande o de unidades efusivas riódacíticas que afloran en los alrededores del cerro del Medio.

- 8- Los circones del Grupo 3 tienen edades entre 212 y 324 Ma y los del Grupo 4 entre 488 – 600 Ma, con 2 cristales de 1093 y 2687 Ma. Estos fueron interpretados como xenocristales heredados y circones detríticos. Aquellos con borde recristalizado pudieron ser incorporados por asimilación de la roca caja (basamento) en la cámara magmática. Estos últimos reflejan que unidades estructuran el basamento en la zona de la Caldera Salar Grande.

Bibliografía

Allmendinger, R., Jordan, T., Kay, S. M., & Isacks, B. (1997). The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Ann Rev Earth Planetary Science* 25., 139-174.

Alpers, C.N., Brimhall, G.H., (1988). Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: Evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geological Society of America Bulletin*, v. 100, 1640-1656.

Bachmann, O., Charlier, B., Lowenstern, J., (2007). Zircon crystallization and recycling in the magma chamber of the rhyolitic Kos Plateau Tuff (Aegean Arc). *Geology* 35 (1), 73-76.

Black, L. and B. L. Gulson (1978). The age of the Mud Tank Carbonatite, Strangways Range, Northern Territory. *BMR Journal of Australian Geology & Geophysics*, 3, 227-232.

Clavero, J., Gardeweg, M., Mpodozis, C. (1998). Mapa Geológico Preliminar del Área del Salar de Piedra Parada, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). Mapas Geológicos N°, Escala 1:100.000.

Corfu, F., John M. Hanchar, Paul W.O. Hoskin, and Peter Kinny (2003). In Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 53, p. 469-500.

De Silva, S. (1987). Large volume explosive silicic volcanism in the central Andes of northern Chile. *PhD Thesis, Open University, U.K.*, 409 pp (no publicado).

De Silva, S. L. (1989). The Altiplano-Puna volcanic complex of the Central Andes. *Geology* 17, 1102-1106.

De Silva, S., Francis, P., (1989). Correlation of large ignimbrites: Two case studies from the central Andes of northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37, 133-149

Fisher, R. V. (1966). Mechanism of deposition from pyroclastic flows. *American Journal Science*, 264, 350-363.

Folkes, C., de Silva, S., Schmitt, A., Cas, R., (2011). A reconnaissance of U-Pb zircon ages in the Cerro Galán system, NW Argentina: Prolongated magma residence, crystal recycling, and crustal assimilation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 206, 136-147.

Francis, P., Oppenheimer, C., (2004). Volcanoes, second edition. Oxford University. Press, Oxford.

Hervé F., Fanning, M., Calderón, M., Mpodozis, C. (2014). Early Permian to Late Triassic batholiths of the Chilean Frontal Cordillera (28°–31°S): SHRIMP U–Pb zircon ages and Lu–Hf and O isotope systematic. *Lithos*, 184-187, 436 – 446.

Isacks, B. (1988). Uplift of the Central Andean Plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research* 93, 3211-3231.

Jackson, S., Norman J. Pearson, William L. Griffin, Elena A. Belousova, (2004). The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology* 211, 47–69.

Jordan, T, Nester, L., Blanco, N., Hoke, G.D., Dávila, F., Tomlinson, A. J. (2010). Uplift of the Altiplano Puna plateau: A view from the west. *Tectonics*, vol. 29.

Lettau, H., (1978). Explaining the world's driest climate, *In* Lettau, H.H.; Lettau, K., Exploring the world's driest climate. University of Wisconsin Center for Climatic Research, Institute for Environmental Studies, Report 101: 182-248. Madison, Wisconsin.

Loewy, S.L., Connelly, J.N., Dalziel, I.W.D., (2004). An orphaned basement block: the Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America. *Geol. Soc. Am. Bull.* 116:171–87

Branney, M.J., Kokelaar, B.P., (2002). Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geological Society Memoir* N°27. London.

Naranjo, J. A., Cornejo, P., (1992). Hoja Salar de la Isla, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 72.

Naranjo, J. A., Villa, V., Venegas, C, (2013). Área Salar de Aguilar y Portezuelo del León Muerto, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Nos 91 y 92.

Naranjo, J., Villa, V., Ramírez, C., Pérez de Arce, C., (2014). Evolución Oligo-Holocena de la parte sur de los Andes Centrales: volcanismo y tectónica. Jornadas Geológicas, Servicio Nacional de Geología y Minería, inédito.

Ramos, V.A., (2008), The basement of the Central Andes: The Arequipa and related terranes: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 36, p. 289–324.

Reid, M., Coath, C., (2000). In situ U-Pb ages of zircons from the Bishop Tuff; no evidence for long crystal residence time. *Geology* 28 (5), 443-446.

Sano, Y., Tsutsumi, Y., Terada, K., Kaneoka, I., (2002). Ion microprobe U-Pb dating of Quaternary zircon : implication for magma cooling and residence time. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117, 285 – 296.

Seggiaro, R., Becchio, R., Pereyra, F., & Martinez, L. (2007). Hoja Geológica 2569-IV. Antofalla, provincias de Catamarca y Salta. Buenos Aires.: Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico y Minero Argentino. Boletín 343, 62 p.

Schmitt, A. Lindsay, J., de Silva, S., Trumbull, R. (2002). U-Pb zircon chronostratigraphy of early-Pliocene ignimbrites from La Pacana, north Chile: implications for the formation of stratified magma chambers. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 120, 43-53.

Schnurr, W., R.B. Trumbull, J. Clavero, K. Hahne, W. Siebel, M. Gardeweg (2007). Twenty-five million years of silicic volcanism in the southern central volcanic zone of the Andes: Geochemistry and magma genesis of ignimbrites from 25 to 27 °S, 67 to 72 °W. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 166, 17–46.

Simon, J., Reid, M., (2005). The pace of rhyolite differentiation and storage in an “archetypical” silicic magma system, Long Valley, California. *Earth and Planetary Science Letters* 235 (1-2), 123-140.

Sláma, J., Košler, J., Condon, D., Crowley, J., Gerdes, A., Hanchar, J., Horstwood, J., Morris, G., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M., Whitehouse, M., (2008). Plešovice zircon — A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology* 249, 1–35.

Sparks, S., Self, S., Walker, G., (1973). Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1, 115-118.

Sparks, S., (1976). Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. *Sedimentology*, 23, 147-188.

Stacey, J.S. and Kramers, J.D. (1975). Approximation of Terrestrial Lead Isotope Evolution by a 2-Stage Model. *Earth and Planetary Science Letters* 26(2): 207-221.

Stern C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 31, N°2, 161-206

Villa Contardo, V. (2013). Morfología de estructuras volcánicas cenozoicas de los Andes Centrales entre los 25° y 26° S, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile. Disponible en <http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/114119>

Walker, G. P. L. (1985). Origin of coarse lithic breccias near ignimbrite source vents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 157-171.

Williams, Ian S. (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In Mckibben, M. A. Shanks III, W.C., and Ridley, W.I. (Eds): Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Review in Economic Geology* v.7. Pages 1-35.

Wilson, C. J. N. (1980). The role of fluidization in the emplacement of pyroclastic flows: an experimental approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8, 231-249.

Wilson, C. J. N. (1986). Pyroclastic flows and ignimbrites. *Science Progress*, 70, 171-207

Wilson, C.J.N., Charlier, B.L.A., (2009). Rapid rates of magma generation at contemporaneous magma systems, Taupo Volcano, New Zealand: Insights from U-Th model-age spectra in zircons. *Journal of Petrology* 50 (5), 875-907.

Anexos

Anexo 1: Edades K-Ar y U-Pb obtenidas de distintos niveles de las ignimbritas Salar Grande.

Nº	Edad	Error	N	E	Método	Material	Ref. geográfica	Ref. bibliográfica
1	12	0.7	7116473	532652	K-Ar	Biotita	8,3 km al este Vn. Salar Grande	Naranjo y Cornejo, 1992
2	12.3	0.8	7116473	532652	K-Ar	Biotita	8,3 km al este Vn. Salar Grande	Naranjo y Cornejo, 1992
3	11.7	0.7	7116473	532652	K-Ar	Biotita	8,3 km al este Vn. Salar Grande	Naranjo y Cornejo, 1992
4	11.7	0.8	7116473	532652	K-Ar	Biotita	8,3 km al este Vn. Salar Grande	Naranjo y Cornejo, 1992
5	11.2	0.5	7116473	532652	K-Ar	Biotita	8,3 km al este Vn. Salar Grande	Naranjo y Cornejo, 1992
6	10.1	1.1	7115898	534564	K-Ar	Biotita	10,3 km al este Vn. Salar Grande	Clavero, J. et al. 1998
7	8.5	1.5	7111598	541289	K-Ar	Biotita	6 km al oeste del Vn. Nevados del León muerto	Clavero, J. et al. 1998
8	9.8	0.8	7098443	548435	K-Ar	Biotita	7 km al NE del Vn. Tridente	Clavero, J. et al. 1998
9	11.3	0.7	7130112	531484	K-Ar	Biotita	6 km al sur del Vn. Puntigudo de la Isla	Naranjo et al, 2013
10	12.7	0.6	7121777	517258	K-Ar	Biotita	SW Salar Grande	Clavero, J. et al. 1998
11	12.29	0.19	7116473	532652	U-Pb	Circón	8,3 km al este Vn. Salar Grande	Este trabajo

Anexo 2: Tabla de edades U-Pb de cada circón. En columna verde edades con corrección de Pb común (en amarillo edades sin corregir)

N° Circón	N° Edad (spot)	Pb [ppm]	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 σ	Edad (Ma) $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	Edad (Ma) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ	Edad (Ma) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 σ	Edad (Ma) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ corregido	2 σ
34	55	37	0.5440	0.0480	0.0060	0.0005	0.6470	0.0250	439.0	31.0	38.8	3.3	4611	59	9.4	1.5
38	64	2	0.0130	0.0023	0.0016	0.0001	0.0570	0.0092	13.1	2.3	10.4	0.8	210	240	10.2	0.8
13	21	8	0.0147	0.0015	0.0017	0.0001	0.0647	0.0050	14.8	1.5	10.7	0.8	580	120	10.4	0.8
13	22	2	0.0170	0.0028	0.0017	0.0001	0.0740	0.0120	17.0	2.7	10.9	0.8	650	190	10.5	0.8
2	6	53	0.0191	0.0030	0.0018	0.0001	0.0776	0.0092	19.1	2.9	11.3	0.9	870	200	10.9	0.8
36	60	3	0.0129	0.0014	0.0017	0.0001	0.0545	0.0045	13.0	1.4	11.1	0.8	290	150	11	0.8
38	63	5	0.0222	0.0042	0.0018	0.0001	0.0890	0.0140	22.2	4.1	11.6	0.9	930	290	11	0.9
83	108	3	0.0268	0.0036	0.0019	0.0001	0.1040	0.0120	26.8	3.5	11.9	0.9	1640	240	11	0.9
33	56	3	0.0206	0.0028	0.0018	0.0001	0.0814	0.0091	20.6	2.8	11.7	0.9	950	180	11.1	0.9
37	61	4	0.0397	0.0083	0.0020	0.0002	0.1320	0.0220	38.8	7.9	12.6	1.0	1540	310	11.2	1
12	20	4	0.0167	0.0024	0.0018	0.0001	0.0671	0.0083	16.8	2.4	11.6	0.9	510	190	11.3	0.8
22	41	2	0.0195	0.0030	0.0019	0.0001	0.0780	0.0100	19.5	3.0	11.9	0.9	810	250	11.4	0.9
7	12	2	0.0126	0.0015	0.0018	0.0001	0.0522	0.0051	12.7	1.5	11.5	0.9	240	180	11.4	0.8
21	32	5	0.0118	0.0012	0.0018	0.0001	0.0480	0.0035	11.9	1.2	11.5	0.9	130	130	11.5	0.8
39	66	4	0.0128	0.0012	0.0018	0.0001	0.0523	0.0030	12.9	1.2	11.6	0.9	260	110	11.5	0.9
39	65	3	0.0128	0.0014	0.0018	0.0001	0.0511	0.0045	12.9	1.4	11.6	0.9	80	130	11.5	0.8
34	54	10	0.0960	0.0100	0.0025	0.0002	0.2770	0.0180	92.5	9.5	16.3	1.3	3310	100	11.5	1
17	27	3	0.0234	0.0051	0.0019	0.0002	0.0830	0.0140	23.2	5.0	12.1	1.0	800	270	11.5	0.9
21	31	5	0.0156	0.0017	0.0018	0.0001	0.0621	0.0055	16.0	1.7	11.8	0.9	620	170	11.6	0.9
35	59	3	0.0157	0.0018	0.0018	0.0001	0.0616	0.0055	15.8	1.8	11.8	0.9	510	160	11.6	0.8
29	48	5	0.0132	0.0012	0.0018	0.0001	0.0530	0.0030	13.3	1.2	11.7	0.8	280	110	11.6	0.8
41	68	4	0.0149	0.0018	0.0018	0.0001	0.0600	0.0067	15.0	1.8	11.8	0.8	330	150	11.6	0.8
11	23	4	0.0217	0.0030	0.0019	0.0002	0.0844	0.0096	21.8	2.9	12.2	1.0	1180	200	11.6	0.9
6	11	4	0.0151	0.0016	0.0018	0.0001	0.0596	0.0047	15.2	1.6	11.8	0.9	470	150	11.7	0.8
32	58	2	0.0138	0.0014	0.0018	0.0001	0.0546	0.0044	13.9	1.4	11.8	0.9	310	150	11.7	0.9
20	19	4	0.0155	0.0015	0.0019	0.0001	0.0612	0.0043	15.6	1.5	11.9	0.8	560	130	11.7	0.8
32	57	2	0.0144	0.0019	0.0018	0.0001	0.0569	0.0062	14.1	1.6	11.8	0.9	310	170	11.7	0.9
24	37	3	0.0141	0.0016	0.0018	0.0001	0.0558	0.0050	14.1	1.6	11.8	0.9	330	150	11.7	0.9
82	110	4	0.0282	0.0067	0.0019	0.0001	0.0960	0.0200	27.8	6.3	12.5	0.9	810	260	11.7	0.9
10	18	4	0.0139	0.0016	0.0018	0.0001	0.0550	0.0051	14.0	1.6	11.8	0.9	350	180	11.7	0.8
17	26	3	0.0123	0.0015	0.0018	0.0001	0.0496	0.0050	12.4	1.5	11.8	0.9	120	170	11.7	0.8
14	24	6	0.0150	0.0015	0.0019	0.0001	0.0577	0.0042	15.1	1.5	11.9	0.9	450	150	11.7	0.9
10	15	4	0.0132	0.0011	0.0018	0.0001	0.0520	0.0029	13.3	1.2	11.8	0.9	260	110	11.8	0.8
79	107	15	0.0130	0.0011	0.0018	0.0001	0.0506	0.0025	13.1	1.1	11.8	0.8	200	96	11.8	0.8
29	49	3	0.0312	0.0034	0.0020	0.0002	0.1132	0.0090	31.1	3.3	12.9	1.0	1740	160	11.8	1

Continuación Tabla Anexo 2

N° Circón	N° Edad (spot)	Pb [ppm]	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 σ	Edad (Ma) $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	Edad (Ma) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ	Edad (Ma) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 σ	Edad (Ma) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ corregido	2 σ
1	2	3	0.0215	0.0029	0.0019	0.0001	0.0788	0.0081	21.5	2.8	12.3	0.9	890	200	11.8	0.9
72	102	5	0.0135	0.0015	0.0019	0.0001	0.0527	0.0047	13.6	1.5	11.9	0.9	160	130	11.8	0.8
40	67	3	0.0123	0.0013	0.0018	0.0001	0.0484	0.0042	12.4	1.3	11.8	0.8	90	150	11.8	0.8
48	76	3	0.0132	0.0020	0.0019	0.0001	0.0521	0.0075	13.3	2.0	12.0	0.9	20	150	11.9	0.8
45	73	7	0.0131	0.0014	0.0019	0.0001	0.0518	0.0045	13.2	1.4	12.0	0.9	170	140	11.9	0.8
8	14	1	0.0123	0.0024	0.0019	0.0002	0.0520	0.0100	12.4	2.4	12.1	1.0	220	340	12	1
28	46	8	0.0154	0.0014	0.0019	0.0001	0.0588	0.0037	15.5	1.4	12.2	0.9	480	120	12	0.9
91	116	4	0.0244	0.0026	0.0020	0.0002	0.0897	0.0070	24.5	2.6	12.7	0.9	1320	140	12	0.9
26	45	4	0.0241	0.0026	0.0020	0.0002	0.0917	0.0078	24.1	2.5	12.7	0.9	1360	160	12	0.9
26	44	4	0.0173	0.0018	0.0019	0.0001	0.0641	0.0046	17.4	1.8	12.3	0.9	680	140	12	0.9
30	51	3	0.0358	0.0060	0.0021	0.0002	0.1230	0.0210	35.5	5.8	13.3	1.2	1610	270	12	1.1
43	70	6	0.0345	0.0068	0.0021	0.0002	0.1160	0.0180	34.1	6.6	13.2	1.0	1380	300	12.1	1
24	38	3	0.0133	0.0016	0.0019	0.0002	0.0516	0.0053	13.4	1.6	12.2	1.0	190	180	12.2	1
49	80	3	0.0155	0.0021	0.0019	0.0001	0.0593	0.0072	15.6	2.0	12.4	0.9	330	160	12.2	0.9
19	29	3	0.0148	0.0019	0.0019	0.0002	0.0547	0.0059	14.9	1.9	12.3	1.0	230	190	12.2	1
52	77	4	0.0156	0.0023	0.0019	0.0001	0.0587	0.0071	15.7	2.3	12.4	0.9	440	240	12.2	0.9
27	42	14	0.0386	0.0070	0.0021	0.0002	0.1250	0.0180	38.9	7.0	13.5	1.0	1640	290	12.2	1
90	115	3	0.0161	0.0018	0.0019	0.0001	0.0608	0.0057	16.2	1.8	12.4	0.9	560	190	12.2	0.9
31	53	1	0.0129	0.0020	0.0019	0.0002	0.0493	0.0067	12.9	2.0	12.3	1.0	100	240	12.3	1
9	16	2	0.0171	0.0017	0.0020	0.0001	0.0640	0.0046	17.2	1.7	12.6	0.9	700	150	12.3	0.9
28	47	6	0.0251	0.0028	0.0020	0.0001	0.0904	0.0076	25.2	2.7	13.0	0.9	1260	160	12.3	0.9
85	111	3	0.0133	0.0018	0.0019	0.0002	0.0506	0.0061	13.5	1.8	12.4	0.9	210	230	12.3	1
81	109	4	0.0135	0.0015	0.0019	0.0001	0.0500	0.0042	13.6	1.5	12.4	0.9	140	150	12.3	0.9
2	5	64	0.0190	0.0018	0.0020	0.0001	0.0694	0.0041	19.1	1.8	12.7	0.9	820	110	12.3	0.9
53	81	3	0.0152	0.0018	0.0019	0.0001	0.0568	0.0050	15.3	1.8	12.5	0.9	360	160	12.3	0.9
76	106	5	0.0248	0.0032	0.0020	0.0002	0.0874	0.0090	24.8	3.2	13.0	0.9	1090	210	12.3	0.9
92	114	4	0.0149	0.0030	0.0019	0.0002	0.0524	0.0088	15.0	3.0	12.4	1.0	150	260	12.3	1
47	75	3	0.0123	0.0013	0.0019	0.0001	0.0480	0.0038	12.4	1.3	12.3	0.9	110	140	12.3	0.9
9	17	3	0.0163	0.0019	0.0020	0.0001	0.0601	0.0054	16.2	1.8	12.6	0.9	440	170	12.3	0.9
1	1	3	0.0171	0.0020	0.0020	0.0002	0.0627	0.0063	17.1	2.0	12.6	1.0	500	160	12.4	1
69	99	2	0.0129	0.0014	0.0019	0.0001	0.0501	0.0040	13.2	1.4	12.5	0.9	170	150	12.4	0.9
121	133	15	0.0166	0.0017	0.0020	0.0001	0.0617	0.0053	16.7	1.7	12.6	0.9	490	120	12.4	0.9
25	40	10	0.0234	0.0020	0.0020	0.0002	0.0833	0.0046	23.5	2.0	13.0	0.9	1310	100	12.4	0.9
55	83	13	0.0136	0.0012	0.0019	0.0001	0.0500	0.0025	13.7	1.2	12.5	0.9	148	88	12.4	0.9
61	98	3	0.0450	0.0092	0.0022	0.0002	0.1410	0.0230	41.6	6.5	14.3	1.2	2170	240	12.5	1.1
8	13	3	0.0200	0.0049	0.0020	0.0002	0.0650	0.0120	20.0	4.7	12.9	1.0	490	300	12.6	1
166	146	5	0.0172	0.0018	0.0020	0.0001	0.0620	0.0045	17.3	1.7	12.9	0.9	530	140	12.6	0.9

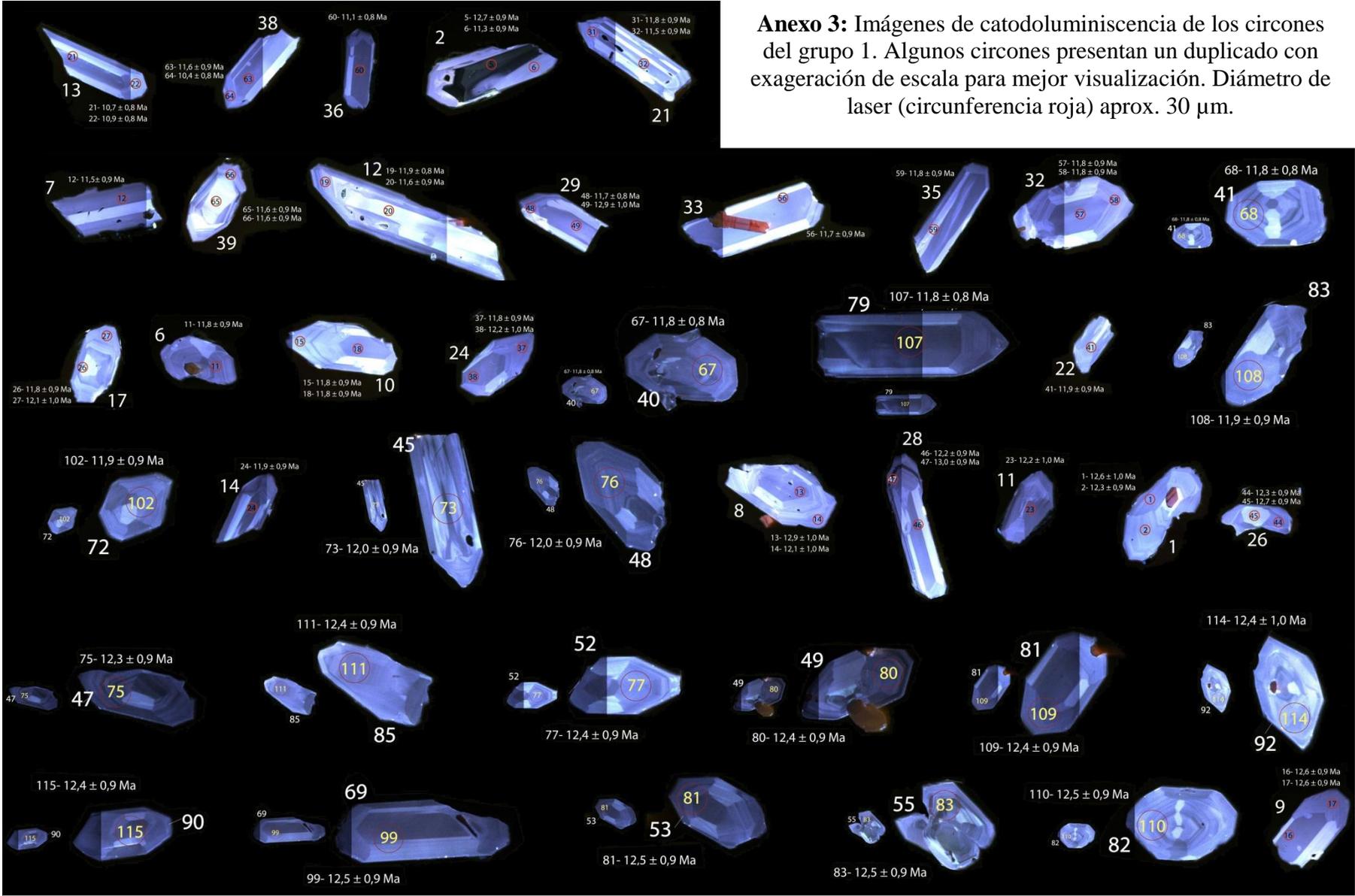
Continuación Tabla Anexo 2

N° Circón	N° Edad (spot)	Pb [ppm]	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2 σ	Edad (Ma) ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2 σ	Edad (Ma) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2 σ	Edad (Ma) ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2 σ	Edad (Ma) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U corregido	2 σ
89	113	3	0.0143	0.0017	0.0020	0.0001	0.0527	0.0050	14.5	1.7	12.8	0.9	230	180	12.6	0.9
71	103	2	0.0155	0.0020	0.0020	0.0001	0.0560	0.0057	15.6	2.0	12.8	0.9	300	180	12.7	0.9
88	112	5	0.0166	0.0021	0.0020	0.0001	0.0591	0.0064	16.6	2.1	12.9	0.9	300	140	12.7	0.9
139	137	4	0.0141	0.0015	0.0020	0.0001	0.0501	0.0038	14.2	1.5	12.7	0.9	170	140	12.7	0.9
51	78	3	0.0301	0.0044	0.0021	0.0002	0.1010	0.0110	30.0	4.3	13.7	1.0	1500	220	12.8	1
25	39	9	0.0184	0.0017	0.0020	0.0001	0.0653	0.0042	18.5	1.7	13.2	0.9	670	120	12.8	0.9
160	144	17	0.0177	0.0021	0.0020	0.0002	0.0615	0.0053	17.8	2.0	13.1	0.9	500	150	12.8	1
133	136	6	0.1020	0.0130	0.0027	0.0002	0.2590	0.0250	98.0	12.0	17.6	1.3	3150	180	12.9	1.1
103	123	3	0.0185	0.0024	0.0021	0.0002	0.0635	0.0067	18.6	2.4	13.2	1.0	510	190	12.9	1
42	69	73	0.0147	0.0011	0.0020	0.0001	0.0527	0.0020	14.8	1.1	13.1	0.9	281	76	13	0.9
62	90	8	0.0163	0.0020	0.0020	0.0002	0.0554	0.0048	16.4	2.0	13.1	1.0	320	150	13	1
61	97	10	0.0414	0.0081	0.0022	0.0002	0.1140	0.0160	40.5	7.7	14.3	1.1	1610	280	13.1	1
27	43	30	0.0152	0.0012	0.0021	0.0002	0.0534	0.0020	15.3	1.2	13.2	1.0	317	80	13.1	1
68	94	3	0.0155	0.0020	0.0021	0.0002	0.0523	0.0049	15.6	2.0	13.2	1.0	170	150	13.1	1
74	104	7	0.0136	0.0013	0.0020	0.0002	0.0480	0.0035	13.7	1.3	13.1	1.0	80	120	13.1	1
73	101	3	0.0176	0.0022	0.0021	0.0002	0.0603	0.0065	17.7	2.2	13.4	1.1	450	180	13.2	1.1
20	34	1	0.0242	0.0052	0.0022	0.0002	0.0800	0.0160	22.8	4.4	13.9	1.0	700	260	13.3	1
60	92	7	0.0207	0.0030	0.0021	0.0002	0.0692	0.0086	20.2	2.8	13.7	1.0	630	220	13.3	0.9
147	143	3	0.0177	0.0050	0.0021	0.0002	0.0600	0.0150	17.6	4.6	13.5	1.0	260	190	13.3	1
160	145	5	0.0517	0.0079	0.0024	0.0002	0.1500	0.0180	50.8	7.6	15.3	1.2	2160	220	13.3	1.1
5	10	5	0.0155	0.0018	0.0021	0.0002	0.0538	0.0048	15.6	1.7	13.5	1.0	245	89	13.3	1
195	160	3	0.0201	0.0035	0.0021	0.0002	0.0668	0.0092	20.1	3.5	13.8	1.1	660	280	13.4	1.1
44	74	1	0.0144	0.0030	0.0021	0.0002	0.0510	0.0100	14.4	3.0	13.6	1.1	190	370	13.5	1.1
18	30	3	0.0207	0.0025	0.0022	0.0002	0.0694	0.0065	20.8	2.4	14.0	1.1	700	160	13.6	1.1
20	33	3	0.0161	0.0016	0.0022	0.0002	0.0546	0.0040	16.2	1.6	13.9	1.0	310	120	13.7	1
96	118	2	0.0206	0.0038	0.0022	0.0002	0.0650	0.0110	20.6	3.7	14.0	1.0	360	220	13.7	1
150	140	2	0.0213	0.0032	0.0022	0.0002	0.0675	0.0084	21.3	3.2	14.1	1.1	550	170	13.7	1
138	138	9	0.0204	0.0029	0.0022	0.0002	0.0673	0.0075	20.4	2.8	14.1	1.0	490	160	13.7	1
190	159	3	0.0194	0.0030	0.0022	0.0002	0.0643	0.0088	19.4	2.9	14.1	1.1	520	240	13.8	1.1
181	155	3	0.0191	0.0022	0.0022	0.0002	0.0626	0.0062	19.1	2.2	14.1	1.1	510	190	13.9	1.1
149	142	7	0.0167	0.0014	0.0022	0.0002	0.0553	0.0030	16.8	1.4	14.0	1.0	300	77	13.9	1
94	117	2	0.0170	0.0022	0.0022	0.0002	0.0564	0.0062	17.1	2.2	14.1	1.1	330	200	13.9	1.1
5	9	3	0.0176	0.0020	0.0022	0.0002	0.0587	0.0053	17.7	1.9	14.2	1.0	330	130	13.9	1
57	89	13	0.0204	0.0022	0.0022	0.0002	0.0649	0.0043	20.4	2.2	14.3	1.0	660	120	14	1
124	134	2	0.0165	0.0021	0.0022	0.0002	0.0549	0.0065	16.6	2.1	14.3	1.1	260	200	14.1	1.1
59	86	4	0.0211	0.0027	0.0023	0.0002	0.0672	0.0066	20.8	2.5	14.5	1.1	640	180	14.2	1
60	85	4	0.0154	0.0016	0.0022	0.0002	0.0499	0.0040	15.5	1.6	14.3	1.1	150	140	14.2	1

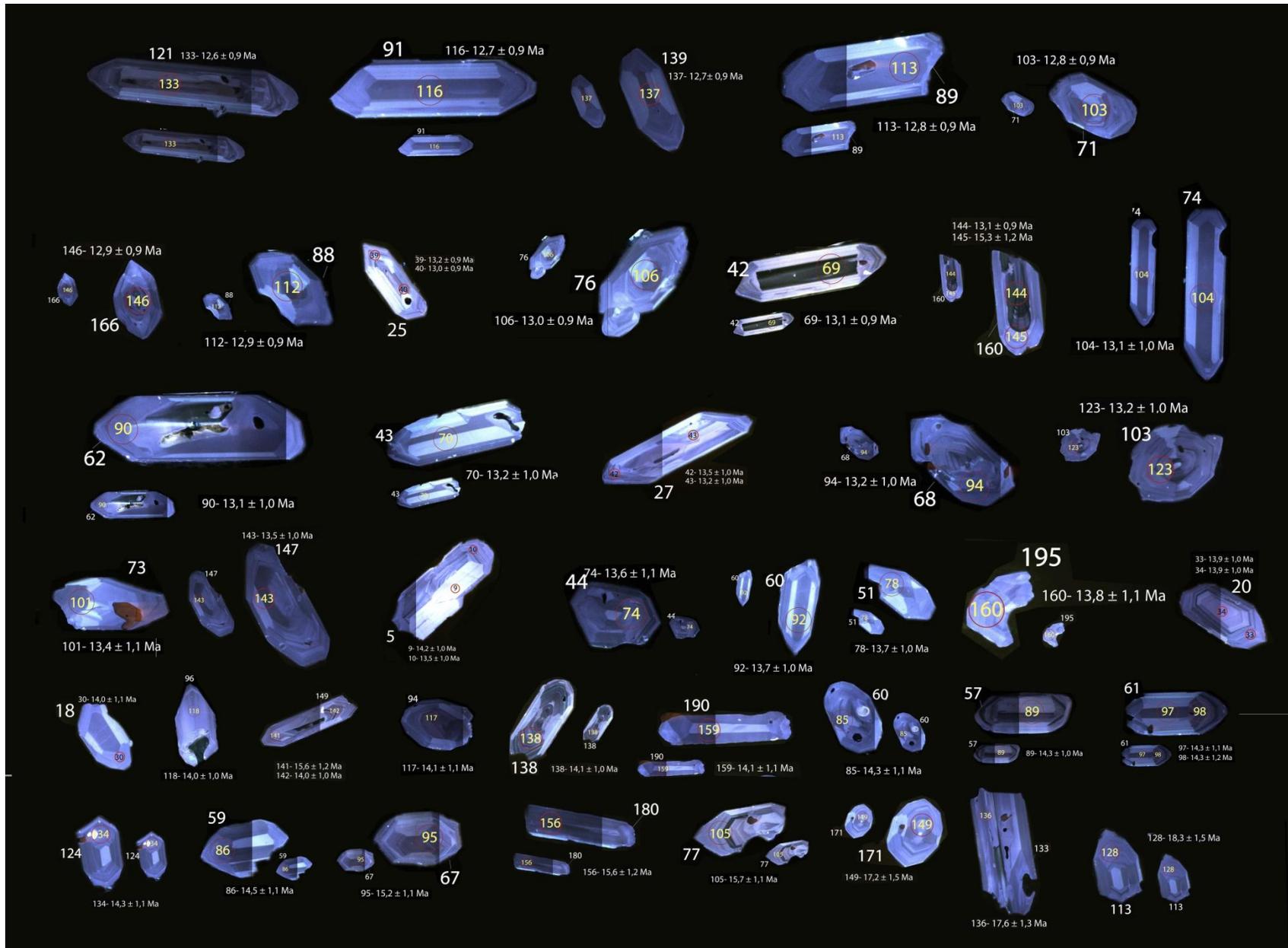
Continuación Tabla Anexo 2

N° Circón	N° Edad (spot)	Pb [ppm]	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2 σ	Edad (Ma) ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2 σ	Edad (Ma) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2 σ	Edad (Ma) ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2 σ	Edad (Ma) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U corregido	2 σ
67	95	4	0.0182	0.0022	0.0024	0.0002	0.0543	0.0049	18.3	2.2	15.2	1.1	350	180	15	1.2
180	156	4	0.0208	0.0033	0.0024	0.0002	0.0589	0.0075	20.9	3.3	15.4	1.4	450	240	15.1	1.3
149	141	3	0.0219	0.0028	0.0024	0.0002	0.0614	0.0061	22.0	2.8	15.6	1.2	610	190	15.3	1.1
113	128	12	0.0658	0.0076	0.0028	0.0002	0.1640	0.0140	64.3	7.2	18.3	1.5	2340	130	15.6	1.3
77	105	4	0.0153	0.0012	0.0024	0.0002	0.0461	0.0018	15.4	1.2	15.7	1.1	31	73	15.7	1.2
171	149	5	0.0179	0.0019	0.0027	0.0002	0.0509	0.0043	18.0	1.9	17.2	1.5	150	150	17.1	1.5
46	72	8	0.0504	0.0047	0.0059	0.0004	0.0632	0.0044	49.8	4.6	38.2	2.8	700	160	37.4	2.8
54	82	174	0.0528	0.0042	0.0062	0.0005	0.0617	0.0016	52.3	4.1	40.1	3.0	659	53	39.3	3
99	122	25	0.1140	0.0110	0.0142	0.0011	0.0582	0.0042	109.0	10.0	90.6	7.0	450	110	89.7	6.9
58	87	66	0.2000	0.0150	0.0259	0.0020	0.0552	0.0021	185.0	13.0	165.0	13.0	418	86	163.6	12.5
31	52	127	0.2350	0.0180	0.0335	0.0027	0.0515	0.0013	214.0	15.0	212.0	17.0	268	58	212.1	16.9
37	62	70	0.2580	0.0190	0.0345	0.0026	0.0551	0.0012	233.0	15.0	219.0	16.0	402	48	217.4	16.2
19	28	114	0.2950	0.0210	0.0383	0.0027	0.0550	0.0010	262.0	16.0	242.0	17.0	414	40	241.1	16.8
46	71	214	0.3300	0.0240	0.0409	0.0029	0.0594	0.0017	289.0	18.0	258.0	18.0	565	62	255.9	17.9
64	93	181	0.2930	0.0200	0.0408	0.0029	0.0518	0.0008	261.0	16.0	258.0	18.0	274	37	257.6	18.1
3	4	73	0.3030	0.0220	0.0420	0.0030	0.0525	0.0010	268.0	17.0	265.0	19.0	298	43	264.9	18.7
3	3	115	0.3200	0.0230	0.0429	0.0030	0.0542	0.0009	282.0	17.0	271.0	18.0	373	38	269.9	18.6
63	91	121	0.3070	0.0220	0.0431	0.0031	0.0523	0.0008	271.0	17.0	272.0	19.0	294	37	271.8	19.3
56	84	236	0.3660	0.0270	0.0444	0.0031	0.0600	0.0017	316.0	20.0	280.0	19.0	575	63	277.3	19.1
117	129	92	0.3300	0.0230	0.0443	0.0031	0.0542	0.0011	289.0	18.0	279.0	19.0	382	44	278.6	19.2
119	131	198	0.3410	0.0240	0.0446	0.0032	0.0551	0.0010	299.0	18.0	281.0	19.0	413	40	280.2	19.8
58	88	75	0.3260	0.0230	0.0454	0.0032	0.0518	0.0009	286.0	18.0	286.0	20.0	283	40	286.3	19.9
109	125	54	0.3350	0.0250	0.0455	0.0033	0.0530	0.0015	293.0	19.0	287.0	20.0	317	62	286.5	20.5
179	153	79	0.3370	0.0240	0.0462	0.0032	0.0528	0.0011	294.0	18.0	291.0	20.0	319	47	290.9	19.9
197	161	39	0.3390	0.0270	0.0467	0.0036	0.0520	0.0015	298.0	21.0	294.0	22.0	290	68	294.3	22.4
100	121	60	0.3550	0.0260	0.0474	0.0034	0.0541	0.0011	307.0	19.0	298.0	21.0	370	47	297.9	21.1
16	25	100	0.3770	0.0270	0.0516	0.0038	0.0530	0.0009	324.0	20.0	324.0	23.0	328	40	324.3	23.5
150	139	1747	15.2000	1.1000	0.0535	0.0095	0.4589	2.3600	2822.0	69.0	333.0	57.0	8490	750		
4	7	108	0.6130	0.0440	0.0786	0.0057	0.0562	0.0009	484.0	28.0	488.0	34.0	464	35	488.2	34.6
172	147	234	0.6250	0.0440	0.0796	0.0057	0.0567	0.0009	492.0	28.0	493.0	34.0	479	33	493.9	34.6
122	132	217	0.6360	0.0460	0.0808	0.0060	0.0573	0.0011	499.0	29.0	501.0	36.0	513	39	500.9	36.4
168	150	198	0.6790	0.0500	0.0844	0.0063	0.0581	0.0011	525.0	30.0	522.0	38.0	528	42	522.1	38.1
172	148	382	0.6800	0.0480	0.0862	0.0061	0.0571	0.0008	526.0	29.0	533.0	36.0	494	31	533.6	36.9
168	151	380	0.7190	0.0590	0.0911	0.0075	0.0577	0.0011	548.0	35.0	562.0	44.0	514	45	562.8	45.2
102	119	56	0.9840	0.0680	0.0965	0.0068	0.0741	0.0010	696.0	36.0	594.0	40.0	1044	28	583.7	40.1
116	130	253	0.8170	0.0580	0.0977	0.0070	0.0603	0.0010	605.0	33.0	601.0	41.0	627	38	600.6	41.9
102	120	133	1.8300	0.1300	0.1840	0.0130	0.0721	0.0010	1057.0	46.0	1087.0	70.0	993	26	1093.3	74.4
176	152	341	14.5000	1.0000	0.5710	0.0400	0.1839	0.0023	2784.0	67.0	2910.0	160.0	2687	20	3023.8	276.9

Anexo 3: Imágenes de catodoluminiscencia de los circones del grupo 1. Algunos circones presentan un duplicado con exageración de escala para mejor visualización. Diámetro de laser (circunferencia roja) aprox. 30 μm .



Continuación Imágenes Anexo 3



Anexo 4: Imágenes de catodoluminiscencia de los circones de los grupos 2, 3 y 4. Algunos circones presentan un duplicado con exageración de escala para mejor visualización. Diámetro de laser (circunferencia roja) aprox. 30 μm .

