



Universidad  
de O'Higgins

Escuela de Ingeniería  
Ingeniería Civil Geológica

# **Transición Pliniana–Efusiva gradual en la erupción de riolita Los Espejos, Laguna del Maule.**

**Alan Inostroza Urzúa**

Profesor guía: Dr. Claudio Contreras Hidalgo

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Geológico

Miembros de la Comisión evaluadora:

Dra. Laura Becerril

Dr. Ángelo Castruccio

Rancagua, Chile

Enero, 2024

## **Agradecimientos.**

Me gustaría comenzar expresando mi agradecimiento a mi familia, quienes me han apoyado desde el primer momento que ingresé a la carrera. Su ánimo constante me impulsó a seguir adelante, incluso en los días en los que la motivación flaqueaba y los trabajos parecían abrumadores. Agradezco sus consejos y el enfoque que me ayudaron a mantener, siempre han estado a mi lado en todos los procesos de mi vida, brindándome apoyo en los momentos difíciles.

Quiero extender mi gratitud a mi profesor guía, Claudio, quien, con su conocimiento y tiempo, me proporcionó valiosos consejos y retroalimentación. Su orientación no solo facilitó la realización de este trabajo, sino que también contribuyó a mejorar mis habilidades. Aprecio especialmente la disponibilidad de las muestras necesarias, que sustentaron la hipótesis de este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi círculo de amistades. Si bien me gustaría mencionar a todos, saben que este mensaje está dirigido a cada uno de ustedes. Gracias por el tiempo dedicado a escucharme en los días difíciles, por organizar planes para relajarnos, y por los momentos de risas que enriquecieron positivamente este proceso. Quiero destacar a Valentina, Brayan, Felipe y Nicole, quienes desde el primer momento me brindaron su apoyo y compartieron muchos momentos positivos conmigo.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que conocí a lo largo de la carrera: amistades, compañeros y profesores. Cada uno de ustedes me enseñó cosas diferentes, me brindó confianza y ánimo. Un reconocimiento especial a Benjamín, Alan, Arnaldo, Gianfranco, Nicolás B., Nicolás U., Natalia, Andrea y Paulina. Gracias por conocerlos, por los buenos momentos y por compartir conocimientos durante los trabajos de la carrera. Les auguro mucho éxito como profesionales y les envío ánimos en las etapas que les esperan, el mismo ánimo que en su momento recibí de ustedes.

## Índice.

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMEN.....                                                                         | 7  |
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                                                 | 8  |
| HIPÓTESIS.....                                                                       | 9  |
| OBJETIVO GENERAL.....                                                                | 9  |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                           | 9  |
| 2.ANTECEDENTES GEOLÓGICOS.....                                                       | 10 |
| 2.1. ERUPCIONES VOLCÁNICAS SILÍCICAS.....                                            | 10 |
| 2.2. COMPLEJO VOLCÁNICO LAGUNA DEL MAULE.....                                        | 14 |
| 2.3. ERUPCIÓN RIOLITA LOS ESPEJOS.....                                               | 16 |
| 2.3.1. Unidad de rle 1: Intercalación de capas de color gris y marrón.....           | 17 |
| 2.3.2. Unidad de rle 2: Un depósito de caída rica en piedra pómez.....               | 17 |
| 2.3.3. Unidad de rle 3: Un depósito de caída, rica en obsidiana.....                 | 18 |
| 2.3.4. Unidad de rle 4: Un flujo de lava.....                                        | 19 |
| 2.3.5. Interpretación de la dinámica eruptiva a partir de la tefroestratigrafía..... | 19 |
| 3. MARCO TEÓRICO.....                                                                | 20 |
| 4. MARCO METODOLÓGICO.....                                                           | 22 |
| 4.1. SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES.....                                                   | 23 |
| 4.2. MÉTODO ANÁLISIS DE TEXTURAS.....                                                | 24 |
| 4.3. CÁLCULOS TEXTURALES.....                                                        | 25 |
| 4.4. CÁLCULO DE ESTIMACIÓN DE LA TASA DE DESCOMPRESIÓN.....                          | 26 |
| 5. RESULTADOS.....                                                                   | 28 |
| 5.1. ANÁLISIS TEXTURAL DE BURBUJAS.....                                              | 28 |
| 5.1.1. Cualidades texturales de las burbujas.....                                    | 28 |
| 5.1.2. Variaciones de la distribución de tamaño de burbujas (BSD).....               | 29 |
| 5.1.3. Análisis de elongación.....                                                   | 32 |
| 5.1.4. Densidad numérica de burbujas (BND).....                                      | 33 |
| 5.1.5. Tasa de descompresión del magma.....                                          | 34 |
| 6. DISCUSIÓN.....                                                                    | 36 |
| 6.1. DENSIDAD DEL NÚMERO DE BURBUJAS (BND, $N_v$ ) Y TASA DE DESCOMPRESIÓN.....      | 39 |
| 6.2. DENSIDAD DEL NÚMERO DE BURBUJAS (BND, $N_v$ ) Y CLASTOS DE OBSIDIANA.....       | 40 |
| 6.3. RECONSTRUCCIÓN DE LA DINÁMICA ERUPTIVA DE LOS ESPEJOS.....                      | 41 |
| 6.4. CONSIDERACIONES PARA FUTURAS ERUPCIONES.....                                    | 45 |
| 7. CONCLUSIÓN.....                                                                   | 45 |
| 8. REFERENCIAS.....                                                                  | 47 |

|               |    |
|---------------|----|
| ANEXOS .....  | 50 |
| ANEXO 1 ..... | 50 |
| ANEXO 2 ..... | 51 |
| ANEXO 3 ..... | 54 |
| ANEXO 4 ..... | 55 |
| ANEXO 5 ..... | 60 |
| ANEXO 6 ..... | 62 |

## Índice de Figuras.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: <b>a)</b> Correlación entre el IEV y el número de erupciones volcánicas en los últimos 200 años, basado en análisis estadísticos efectuados por el vulcanólogo Robert W. Decker (1990). A significa que algo menos de 100 erupciones volcánicas con $IEV \geq 4$ , han ocurrido en los últimos 200 años. <b>b)</b> Relación entre las mayores erupciones ( $IEV \geq 5$ ), y el número de erupciones, de los últimos 10.000 años ( Lockwood, J.; Hazlett, R., 2011). .....                                                                                                                                                                                                                                    | 10 |
| Figura 2: <b>a:</b> Ubicación del Volcán Chaitén, Chile. <b>b:</b> Deposito de la erupción (Alfano et al.2011). <b>c:</b> Imagen mostrando las piedras pómez lapilli. Modificado de Alfano et al., (2012).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 11 |
| Figura 3: Ubicación complejo Cordón-Caulle. <b>a:</b> Ubicación del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, Andes del Sur, Chile. <b>b:</b> Imagen de satélite del centro eruptivo. <b>c:</b> Panorama del flujo de lava activo y respiradero NW visto el 10 de enero de 2012. Modificado de Schipper et al., (2013). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 12 |
| Figura 4: Gráfico esquemático, donde un umbral difuso distingue las erupciones efusivas de las explosivas. Los puntos a-d representan diferentes escenarios eruptivos: a = Ascenso controlado (de abajo hacia arriba), b = Viscosidad controlada, c = Acumulación de gas exsolvente y tapón controlado, y d = Onda de descompresión controlada. La posición inicial en el eje de eficiencia de desgasificación depende de la reología (composición y cristalinidad) y la permeabilidad del magma. Las fotografías de la erupción en esta figura provienen de Chaitén en 2008 (Daniel Basualto), Soufrière Hills, 1997, Volcán de Colima (Mike Cassidy) y Mt St. Helens en 1980. Modificado de Cassidy et al., 2018..... | 13 |
| Figura 5: Mapa geológico simplificado de la cuenca central del campo volcánico LdM [adaptado de Hildreth et al. (2010)]. Marcado con un recuadro rojo se encuentra rle (correspondiente al objeto principal de estudio). Modificado de Andersen et al. (2017).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 15 |
| Figura 6: Columna estratigráfica de la riolita Los Espejos (rle). Se tiene las muestras que serán ocupadas para el presente estudio con su respectiva correlación con la columna estratigráfica. Modificado de Contreras-Hidalgo, 2020. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 16 |
| Figura 7: A) Segmentación de imágenes microscópicas (muestra I1 usada de ejemplo) con umbral en escala de grises, B) Imagen binarizada. Software ImageJ (Fiji).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 23 |
| Figura 8: Interfaz de la creación de la imagen semilla (imagen lado derecho) cumpliendo con el parámetro de forma de convexidad $>0.8$ . Software ImageJ (Fiji). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 24 |
| Figura 9: <b>a)</b> Imagen con las burbujas segmentadas, blancos corresponde a las burbujas, negro a la matriz y líneas amarillas a la separación de las burbujas. <b>b)</b> Burbujas segmentadas diferenciadas por colores. Software ImageJ (Fiji).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 24 |
| Figura 10: Imágenes BSEM de las muestras de la secuencia estratigráfica con sus respectivos valores de densidad numérica ( $N_A$ y $N_V$ ). B3 muestra del techo de la secuencia, I2 muestra de la base de la secuencia y C2-D4 muestras intermedias de la secuencia. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 29 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 11: Distribución de tamaño de fracción de volumen simple ( $V$ o $V_f$ ) (VVD), ejemplos de muestras representativas, G2 muestra con una distribución bimodal, H3 muestra con una distribución unimodal amplia y F1 muestra con una distribución unimodal. ....                                                                                                                                                                                                                                             | 31 |
| Figura 12: Distribución de tamaño de fracción de área acumulado (CAAD), a la izquierda post segmentación y a la derecha previa segmentación. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 32 |
| Figura 13: Densidad numérica por área ( $N_A$ ) versus a la secuencia estratigráfica de rle. K2 corresponde a la base y A2 corresponde al techo del depósito. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 33 |
| Figura 14: Densidad numérica por volumen ( $N_v$ ) versus secuencia estratigráfica (K2 base y A2 techo).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 34 |
| Figura 15: Tasa de descompresión de rle. A son los valores considerando temperatura desde 805°C–775°C. B son los valores del contenido de $H_2O$ desde 6.6 – 5.9 wt.%. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 36 |
| Figura 16: Gráfico log–log de la tasa de erupción masiva (MER) versus la densidad del número de vesículas corregido por la masa fundida ( $N_v$ ). El área de color gris corresponde a los valores estimados de $N_v$ para rle y las líneas segmentadas contienen el >50% de los valores de $N_v$ obtenidos para las muestras. Modificado de Alfano et al., 2012. ....                                                                                                                                             | 39 |
| Figura 17: Datos experimentales recopilados del BND decompression rate meter. En la leyenda, ML04 hace referencia a datos de Mourtada Bonnefoi y Laporte (2004): MS00, Mangan y Sisson (2000); Metal104, Mangan et al. (2004), ML02, Mourtada–Bonnefoi y Laporte (2002) y ML99 Mourtada–Bonnefoi y Laporte (1999). En esta parcela, experimentos (Gardner et al., 1999, 2000; Larsen y Gardner, 2004; Gardner y Denis, 2004) y punto de color rojo la erupción de Los Espejos. Modificado de Toramaru (2006). .... | 39 |
| Figura 18: Correlación de la secuencia estratigráfica de Los Espejos (rle) con la densidad del número de burbujas (BND, $N_v$ ) obtenidas en este estudio. Modificado de Contreras–Hidalgo, 2020. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 41 |
| Figura 19: Modelo de las etapas de la erupción de Los Espejos (rle), correspondiente a las 4 etapas, iniciando por la etapa freatomagmática, seguida por un estilo pliniana con la disminución de la intensidad eruptiva y finalmente el flujo de lava correspondiente a la fase más efusiva. .                                                                                                                                                                                                                    | 44 |

## Índice de Tablas.

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Resumen de los principales parámetros físicos y texturales de las 17 muestras del estudio correspondiente a la rle. .... | 28 |
| Tabla 2: Resumen características erupciones riolíticas. ....                                                                      | 37 |

## Resumen.

Los complejos volcánicos silícicos pueden generar desde columnas piroclásticas de diversa altitud hasta el emplazamiento de flujos de lava. En concreto, el complejo volcánico Laguna del Maule (Región del Maule, Chile) se ha convertido en un sector de importancia geológica, debido al gran número de depósitos riolíticos que evidencian un amplio rango de estilos eruptivos. En él, la riolita Los Espejos es el primer evento posterior a la glaciación, se constituye por un depósito de caída de 3–5 km<sup>3</sup> (Fase explosiva) y un flujo de lava de ~1 km<sup>3</sup> (Fase efusiva). Considerando que la dinámica eruptiva se registra en las texturas de burbujas, en este trabajo, se analizan las texturas de los piroclastos juveniles provenientes de diferentes niveles del depósito de caída de Los Espejos (*r/e*), para reconstruir una hipotética transición eruptiva a partir de sus características físicas en función del tiempo. La densidad numérica de burbujas (*bubble number density, BND*) calculada en  $N_v$  promedio es de  $1.5 \pm 1 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ , un valor similar a erupción históricas de características plinianas a subplinianas. Sin embargo, se presenta una tendencia decreciente con el transcurso del tiempo, lo cual sugiere la disminución de la intensidad eruptiva. Por otro lado, la distribución del tamaño de burbujas (*bubble size distribution, BSD*) es predominantemente unimodal, con mayor frecuencia en el rango de 0.04 a 0.09 mm, se observa un aumento del tamaño de burbujas y burbujas coloformes, evidenciando procesos de coalescencia y nucleación. Hacia el techo de la secuencia estratigráfica, aumenta la cantidad de burbujas alargadas y tabulares, lo cual tiende a correlacionarse con una desgasificación eficiente del magma (Okumura et al., 2009; Schipper et al., 2013), promoviendo la disminución de la intensidad eruptiva y sugiriendo una transición explosiva a efusiva. Este fenómeno también fue observado en otras erupciones, como Chaitén en 2008 (Alfano et al., 2012) o Cordon Caulle en 2011 (Schipper et al., 2013).

**Palabras claves:** Complejo volcánico; Sistemas volcánicos silícicos; Transiciones eruptivas silícicas; Dinámica de ascenso de magma; Análisis texturales de vesículas.

## 1. Introducción.

Las erupciones volcánicas silíceas son capaces de generar desde devastadoras depósitos de flujos piroclásticos, que pueden cubrir miles de kilómetros cuadrados, hasta columnas piroclásticas y flujos de lava, los cuales pueden conllevar a la evacuación de las comunidades cercanas. Las erupciones silíceas más recientes en Chile es el caso de la erupción de Chaitén en 2008 y Complejo volcánico Cordón Caulle 2011, las cuales fueron erupciones con una fase inicial explosiva (subpliniana –pliniana), seguidas por una fase efusiva.

El Complejo Volcánico Laguna del Maule (*LdM*) se caracteriza por presentar al menos 24 centros de emisión silíceos, formados en los últimos 25 mil años (etapa post-glacial). En la última década, *LdM* ha experimentado una actividad sísmica episódica y un levantamiento superficial de 20 a 30 cm por año (Cardona et al., 2018; Le Mevel et al., 2021), lo cual se encuentra por encima del nivel base de actividad. Esto ha enfatizado la necesidad de comprender tanto la evolución reciente del sistema magmático como los posibles escenarios futuros de una erupción.

En *LdM* existen diversos depósitos piroclásticos y lavas que surgieron del mismo centro de emisión durante un mismo evento eruptivo. Por ejemplo, la riolita Los Espejos (*r/e*; Hildreth et al., 2010) presenta un depósito de caída de cenizas y piroclásticos relacionados a una fase explosiva con un aumento de la fracción de obsidiana en la altura de la columna estratigráfica preludiando el flujo de lava riolítica (Cáceres et al., 2018, Fierstein, 2018) relacionado a una fase efusiva. Esto sugiere la existencia de una transición eruptiva explosiva – efusiva.

Los piroclastos de los depósitos presentan burbujas de distintas formas derivada de distintos procesos de desgasificación o densificación del magma, por lo cual. los análisis texturales de piroclastos juveniles del depósito de caídas permitirían conocer la dinámica eruptiva de la riolita Los Espejos, que predomina en la transición eruptiva explosiva – efusiva, proporcionando información sobre cómo se desencadenan y evolucionan en un evento eruptivo.

## **Hipótesis.**

- La transición explosiva–efusiva de la riolita Los Espejos (Complejo Laguna del Maule) fue paulatina debido a la gradualidad en la disminución de la tasa de descompresión y al aumento en la tasa de deformación del magma. Erupciones riolíticas similares recientes, tales como Chaitén en 2008 (Alfano et al., 2012) y Cordón Caulle en 2011 (Schipper et al., 2013) evidencian que estas transiciones pueden durar del orden de semanas.

## **Objetivo general.**

- Determinar los factores físicos relacionados con el número y densidad de burbujas, que gobernaron el cambio gradual de Pliniana a efusivo durante la erupción de la riolita Los Espejos en el Complejo Laguna del Maule.

## **Objetivos específicos.**

- Analizar la densidad del número de burbujas (*BND*) y calcular la tasa de descompresión del magma.
- Analizar las formas y la distribución del tamaño de burbujas (*BSD*) para determinar procesos de formación de burbujas.
- Interpretar la evolución de los procesos de dinámica eruptiva relacionados a una transición de una fase Pliniana moderada a una efusiva.

## 2. Antecedentes geológicos.

### 2.1. Erupciones volcánicas silíceas.

Uno de los peligros geológicos con mayor impacto son las erupciones volcánicas silíceas, tanto por su alta peligrosidad como a su carácter intempestivo (Castro and Dingwell, 2009). A grandes rasgos, estas pueden clasificarse como explosivas, formando principalmente columnas eruptivas (Subpliniana – Pliniana) con un rango de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 4–8 y efusivas, capaces de formar flujos de lavas con IEV 0–2. En el [anexo 1](#) describe los distintos tipos de erupciones volcánicas. Las erupciones volcánicas silíceas tienden a tener un  $IEV \geq 4$ , siendo erupciones poco frecuentes (Figura 1), donde se registran al menos tres erupciones explosivas silíceas en el último siglo (Novarupta Katmai 1912, Chaitén 2008, y Cordon Caulle 2011).

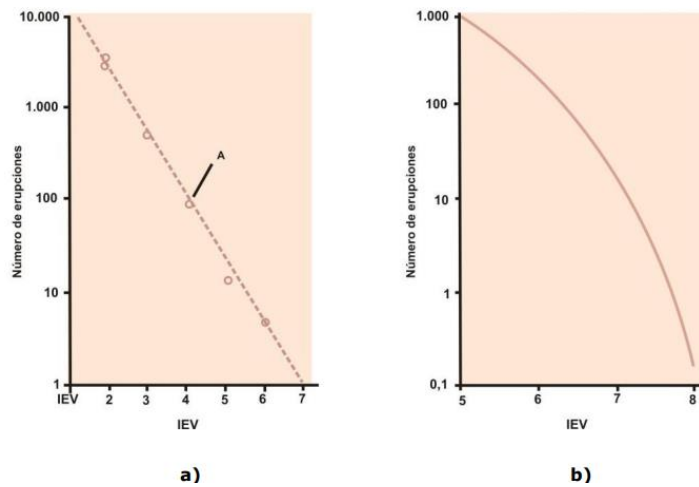


Figura 1: **a)** Correlación entre el IEV y el número de erupciones volcánicas en los últimos 200 años, basado en análisis estadísticos efectuados por el vulcanólogo Robert W. Decker (1990). A significa que algo menos de 100 erupciones volcánicas con  $IEV \geq 4$ , han ocurrido en los últimos 200 años. **b)** Relación entre las mayores erupciones ( $IEV \geq 5$ ), y el número de erupciones, de los últimos 10.000 años (Lockwood, J.; Hazlett, R., 2011).

Debido a la peligrosidad y al alto grado de incertidumbre de los eventos eruptivos, es necesario conocer características de eventos recientes en el territorio chileno que han sido estudiados, como la erupción de Chaitén en 2008 (Alfano et al., 2012) y Cordon Caulle en 2011 (Schipper et al., 2013). Estos eventos permiten mostrar características similares del evento eruptivo, como una fase inicial altamente explosiva, composición riolítica, depósitos piroclásticos y flujos de lavas.

El volcán Chaitén se encuentra ubicado en la provincia de Palena, región de Los Lagos, a diez kilómetros al noreste de la ciudad de Chaitén (Figura 2.a). La erupción de Chaitén comenzó el 6 de mayo del 2008 y se desarrolló desde una fase inicial altamente explosiva, que duró aproximadamente 2 semanas, seguida por una segunda fase menos explosiva. Esta primera fase inicio con una columna eruptiva que alcanzó un máximo de 20 km de altura, produciendo un volumen de 1 km<sup>3</sup> de tefra (aproximadamente 0.3 km<sup>3</sup> de roca densa) como se muestra en la Figura 2.b. Los productos fueron exclusivamente de una riolita pobre en cristales (Figura 2.c), con un contenido de sílice 73–76 wt.%. Luego, se describe un proceso de desgasificación, acompañado por la disminución de la tasa de ascenso del magma, dando inicio a la fase efusiva, caracterizada por la generación de ~0.8 km<sup>3</sup> de lava (Alfano et., 2011; Major y Lara, 2013).

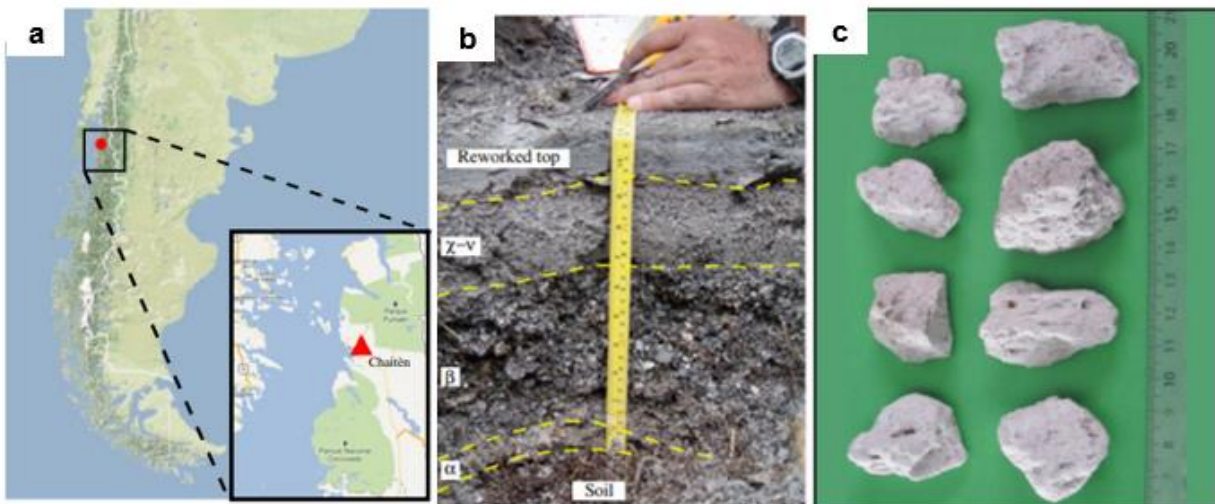
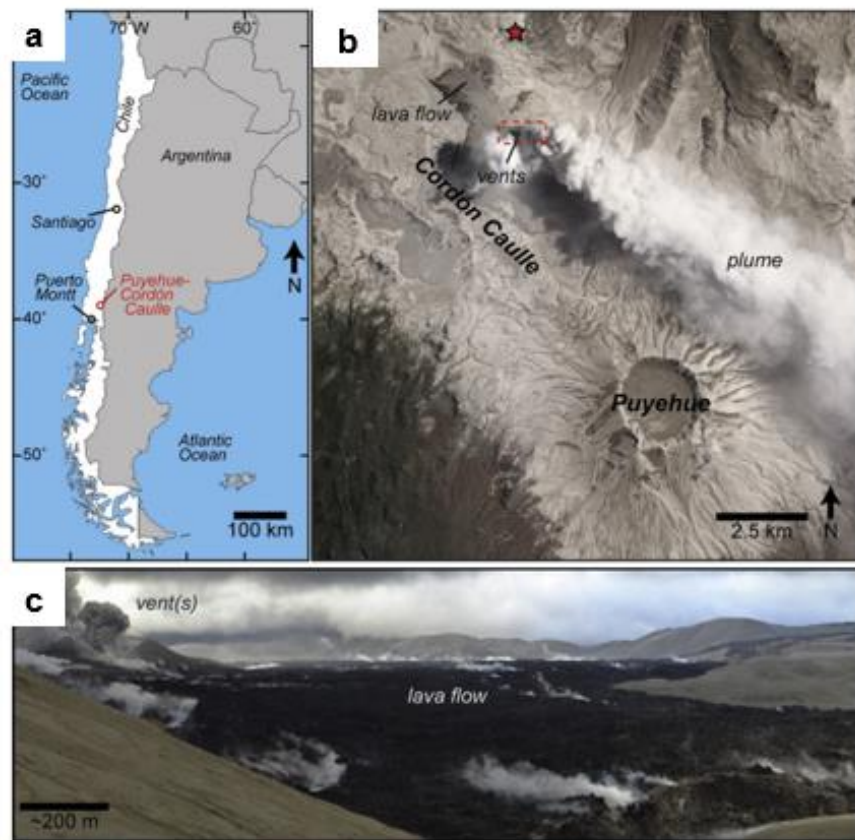


Figura 2: **a:** Ubicación del Volcán Chaitén, Chile. **b:** Deposito de la erupción (Alfano et al.2011). **c:** Imagen mostrando las piedras pómez lapilli. Modificado de Alfano et al., (2012).

Otro ejemplo de erupciones silíceas es el complejo volcánico Cordón Caulle– volcán Puyehue, ubicado en la región de Los Ríos, a ochenta kilómetros al este de Osorno (Figura 3.a). La erupción inició en junio del 2011 con una fase pliniana, evidenciando una columna eruptiva que alcanzo una altura entre 10–12 km (Figura 3.b). En enero del 2012, la actividad explosiva había disminuido desde un estilo pliniano a una mezcla de gases y cenizas con explosiones

vulcanianas. SERNAGEOMIN cuantificó el volumen de la erupción en  $0.8 \text{ km}^3$ , de los cuales Bertín et al. (2012) aseguran que  $0.45 \text{ km}^3$  corresponden al flujo de lava (Figura 3.c).



*Figura 3: Ubicación complejo Cordón-Caulle. a: Ubicación del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, Andes del Sur, Chile. b: Imagen de satélite del centro eruptivo. c: Panorama del flujo de lava activo y respiradero NW visto el 10 de enero de 2012. Modificado de Schipper et al., (2013).*

Existen casos recientes de erupciones volcánicas silíceas con transiciones en sus estilos eruptivos. En este sentido, Eichelberger et al. (1986) sugirieron que los distintos estilos eruptivos pueden provenir de magmas con composiciones y contenido de volátiles similares, pero que experimentan diferentes historias de desgasificación (pérdida de gases). Con la finalidad de comprender este proceso, es necesario conocer las condiciones del magma y sus propiedades físicas. Las erupciones explosivas (Subpliniana y Pliniana) predominan en los grandes complejos volcánicos silíceos (por ejemplo, Complejo Volcánico Laguna del Maule). Estas erupciones tienden a ser alimentadas por magmas riodacíticos (68–72% peso de  $\text{SiO}_2$ ) a riolíticos ( $>72\%$  peso de  $\text{SiO}_2$ ), presentan una baja temperatura ( $<950^\circ \text{C}$ ; Lockwood y Hazlett, 2013) y alta viscosidad ( $>10^4 \text{ Pa s}$ ; Lesher y Spera, 2015).

Los procesos de la dinámica eruptiva de una erupción explosiva comienzan con el proceso de sobresaturación de volátiles, seguido por el proceso de vesiculación (generación de burbujas), que resulta en el crecimiento de las burbujas (Gonnermann y Manga, 2007). Debido al rompimiento de las paredes del fundido silicatado o por cizallamiento, las burbujas coalescen, produciendo grandes burbujas que saturan el conducto, promoviendo la fragmentación del magma (Gonnermann y Manga, 2007; Papale, 1999). La fragmentación del magma lo transforma desde una fase líquida con sólidos y gases en suspensión a una fase gaseosa con sólidos y paquetes de líticos, cumpliendo un rol importante en el evento eruptivo al ser capaz de controlar la intensidad de las erupciones explosivas (e.g. Zimanowski et al., 2003).

Como fue evidente en la erupción de Chaitén en 2008 y Cordón Caulle en 2011, ocurrieron estos procesos de fragmentación y desgasificación del magma (Alfano et al., 2012; Schipper, 2013), las cuales promovieron que desde una fase explosiva inicial se formaran flujos de lavas y domos. Según Cassidy et al. (2018), las transiciones en el estilo de erupción están dictadas principalmente por dos factores que comúnmente se combinan: la tasa de ascenso del magma y la eficiencia de la desgasificación (Cassidy et al., 2018; Figura 4).

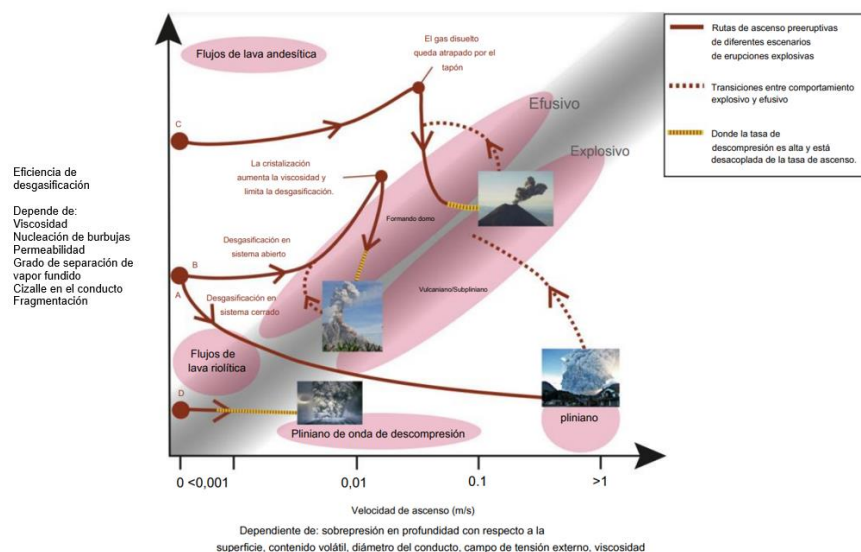


Figura 4: Gráfico esquemático, donde un umbral difuso distingue las erupciones efusivas de las explosivas. Los puntos a-d representan diferentes escenarios eruptivos: a = Ascenso controlado (de abajo hacia arriba), b = Viscosidad controlada, c = Acumulación de gas exsolvente y tapón controlado, y d = Onda de descompresión controlada. La posición inicial en el eje de eficiencia de desgasificación depende de la reología (composición y cristalinidad) y la permeabilidad del magma. Las fotografías de la erupción en esta figura provienen de Chaitén en 2008 (Daniel Basualto), Soufrière Hills, 1997, Volcán de Colima (Mike Cassidy) y Mt St. Helens en 1980. Modificado de Cassidy et al., 2018.

Las propiedades físicas se registran en las texturas de las burbujas, lo que permite establecer la evolución temporal de eventos volcánicos y comprender así los peligros potenciales de erupciones futuras. La generación de una columna piroclásticas hasta derrame de lava se correlaciona con distintos peligros volcánicos durante un mismo evento eruptivo, lo que conlleva a la necesidad de que las diversas entidades encargadas del resguardo de las comunidades tengan conocimiento de la posible dinámica eruptiva. Además, debido a la baja frecuencia de estos eventos, es necesaria la reconstrucción de eventos eruptivos históricos que tengan como evidencia distintos productos eruptivos como, por ejemplo, el Complejo Volcánico Laguna del Maule (LdM).

## **2.2. Complejo Volcánico Laguna del Maule.**

El complejo volcánico Laguna del Maule (LdM) presenta 36 '*coulees*' y domos post-glaciales de composición riolítica a riodacítica que hicieron erupción desde 24 centros de emisión, cubriendo un área de ~100 km<sup>2</sup> (Andersen et al., 2017; Hildreth, 2021; Figura 5). La gran diversidad de productos volcánicos, constituidos por depósitos de caída, flujos piroclásticos y lavas, evidencian una variedad de estilos, magnitudes eruptivas y una serie de transiciones tanto inter-eruptivas (es decir, distintos eventos eruptivos) como intra-eruptivas (es decir, dentro del mismo evento eruptivo; Hildreth, 2021; Contreras et al., 2022).

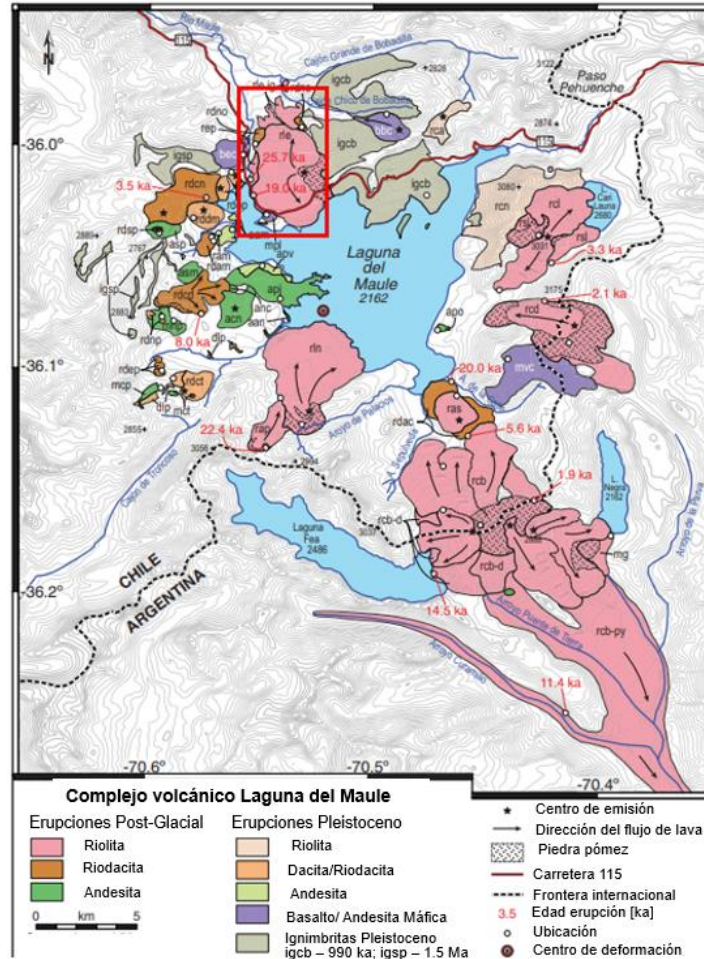


Figura 5: Mapa geológico simplificado de la cuenca central del campo volcánico LdM [adaptado de Hildreth et al. (2010)]. Marcado con un recuadro rojo se encuentra rle (correspondiente al objeto principal de estudio). Modificado de Andersen et al. (2017).

En los últimos 25 Ka (la etapa eruptiva post-glacial; Singer et al., 2000), las riolitas o riodacitas han predominado, presentando 9 unidades riodacíticas (68–72 wt.% SiO<sub>2</sub>) y 11 unidades riolíticas (72–76 wt.% SiO<sub>2</sub>) (Fierstein, 2010; Hildreth et al., 2010). La primera es la riolita Pliniano-ignimbrita de Laguna del Maule (*rdm*), la cual no presenta flujos de lavas ni clastos juveniles de obsidianas, marcando una transición hacia un patrón de erupciones de riolitas más frecuentes, de menor volumen y menos silícicas (Hildreth, 2021). Esto sugeriría que la erupción *rdm* perturbó sustancialmente el sistema magmático, de modo que la posterior diferenciación y almacenamiento de riolita se produjo a menor profundidad sin una interacción evidente entre la riolita y los magmas máficos a intermedios (Annen, 2009; Jackson et al., 2018; Contreras et al.,

2022). Teniendo como evidencia de la producción de riolitas de menores magnitudes y formadores de lavas, se destaca la riolita de Los espejos (*r/e*; Hildreth et al., 2010).

### 2.3. Erupción riolita Los Espejos.

La riolita Los Espejos (*r/e*; Fig. 5; Hildreth et al., 2010) se caracteriza por ser la primera erupción riolítica post-glacial y la más silícica posterior a *rdm* (75.9–77.0 wt. % de SiO<sub>2</sub>). Presenta evidencias estratigráficas del inicio de una etapa explosiva que generó un depósito de caída de ceniza y piroclásticos con un volumen de 3–5 km<sup>3</sup> (Fierstein, 2018), contienen piedras pómez densas y piroclásticos de obsidianas, seguidos del derrame de un flujo de lava riolítica de ~0,82 km<sup>3</sup> (Cáceres et al., 2018), el cual la asocian a una etapa más efusiva. La riolita Los Espejos fue descrita por Contreras-Hidalgo (2020) y se pueden describir en 4 unidades estratigráficas (con sus respectivas muestras consideradas para el estudio), clasificadas de acuerdo al estilo eruptivo y densidad de piroclastos, ordenadas desde la más antigua hasta la más joven (Figura 6). Para ver vistas generales de campo de los depósitos, columnas estratigráficas y muestras de mano de las unidades estratigráficas, consulta el [Anexo 2](#):

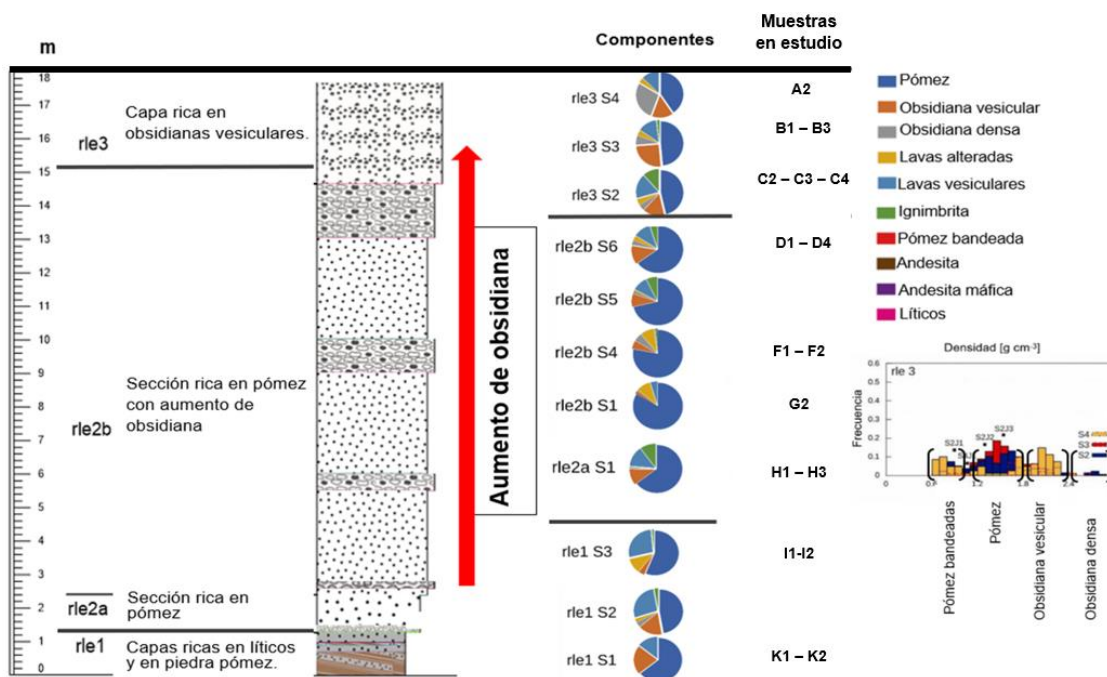


Figura 6: Columna estratigráfica de la riolita Los Espejos (*r/e*). Se tiene las muestras que serán ocupadas para el presente estudio con su respectiva correlación con la columna estratigráfica. Modificado de Contreras-Hidalgo, 2020.

### ***2.3.1. Unidad de r/e 1: Intercalación de capas de color gris y marrón.***

La unidad *r/e 1* solo se encuentra en los depósitos proximales (<2 km del respiradero *r/e*), se superpone a depósitos lacustres de arcilla a limo y está compuesto principalmente por lapilli, piedra pómez, líticos alterados y oxidados. La unidad de *r/e 1* se puede reconocer por la intercalación de dos tipos de capas, una capa marrón de grano fino, rica en lítico, con una matriz compuesta por arcilla y limo (capaz de retener agua) y sin clastos de obsidiana, su muestra representativa es *r/e1 s1* (muestras K1–K2), presenta una distribución de densidad bimodal de 1.2 y 2.1 g cm<sup>-3</sup>. Y una capa gris de grano grueso, rica en piedra pómez (>50%), constituidos por pumitas, líticos alterados y oxidados, su muestra representativa es *r/e1 s3* (muestras I1–I2), distribución de la densidad de juveniles bimodal debido a las piedras pómez y obsidianas. Con la secuencia estratigráfica, aumenta la fracción de piedra pómez gruesa y ocurre un ligero aumento de la fracción de clastos de obsidiana en las capas grises. La densidad de la piedra pómez disminuye proporcionalmente con su tamaño y la distribución de la densidad es más estrecha al aumentar la altura estratigráfica (promedio de  $0.86 \pm 0.07$  g cm<sup>-3</sup>).

### ***2.3.2. Unidad de r/e 2: Un depósito de caída rica en piedra pómez.***

La unidad de *r/e 1* está superpuesta en discordancia angular y erosiva por un depósito de flujo piroclástico con clastos de menor densidad (unidad *r/e 2a*) y un depósito de caída de tamaño de lapilli grueso (unidad *r/e 2b*), que en la parte inferior tiene los mismos componentes y tamaño de grano que las capas grises de la unidad *r/e 1*.

La unidad de *r/e 2a* se reconoce como una secuencia de capas que forman estructuras sedimentarias (estratificación cruzados y capas lenticulares) con piedra pómez gruesa de densidad media a alta que aumenta su fracción con la altura estratigráfica (~70% hasta un ~90%) y presenta clastos de obsidiana (~5%). Su muestra representativa es *r/e2a s1* (muestras H1–H3) y presenta una distribución de densidades de juveniles unimodal amplia de  $1.42 \pm 0.26$  g cm<sup>3</sup>, con una moda notablemente superior a la moda de las piedras pómez de la unidad *r/e1*.

La unidad de *r/e* 2b es una secuencia de varias capas laminares ricas en piedra pómez en concordancia con la unidad *r/e* 2a. Sus muestras representativas son *r/e*2b s1–6, desde *r/e*2b s1–4 (muestras G2–F1–F2), presenta ~70% de piedra pómez densa, ~15% de obsidiana y ~15% de líticos. La fracción de piedra pómez densa y clastos vesiculares de obsidiana aumenta con la altura de la secuencia estratigráfica. Presentan una distribución de densidad de juveniles bimodal con modas de piedra pómez de  $0.85 - 0.895 \text{ g cm}^{-3}$  y modas de clastos de obsidiana de  $1.8 - 2.0 \text{ g cm}^{-3}$ . En la parte superior correspondiente a *r/e*2b s6 (muestras D1–D4), presenta piedras pómez (>70%) subenlongadas con burbujas alargadas y orientadas paralelas a lo largo de su eje, ausencia de líticos máficos y ~15% de obsidiana vesiculares, la distribución de densidad de juveniles es unimodal con un rango amplio de  $1.29 \pm 0.23 \text{ g cm}^{-3}$ .

### ***2.3.3. Unidad de *r/e* 3: Un depósito de caída, rica en obsidiana.***

La unidad *r/e* 3 se superpone a la capa rica en piedra pómez de grano grueso (*r/e* 2b) y se reconoce por un mayor contenido de obsidiana vesicular que las capas de la unidad *r/e* 2. La zona inferior correspondiente a las muestras *r/e*3 s2–s3 (muestras C2–C3–C4–B1–B3) está definida por cambios de tamaño de grano y presenta componentes similares de la parte superior de la unidad *r/e* 2, pero con piedras pómez más pequeñas (<3 cm) y más densas, con distribución de densidad de juveniles unimodal con un rango amplio de  $\sim 1.55 \pm 0.5 \text{ g cm}^{-3}$ .

La zona superior correspondiente a la muestra *r/e*3 s4 (muestra A2) se caracteriza por una fracción creciente de obsidiana densa (~25%) y ~40% de piedra pómez. Presenta una distribución de densidad de juveniles bimodal con piedras pómez menos densa (promedio  $0.91 \text{ g cm}^{-3}$ ) y baja densidad de los clastos de obsidiana (promedio de  $1.99 \text{ g cm}^{-3}$ ). Las obsidiana piroclásticas pueden ser vesiculares o densas (sin burbujas). Las obsidiana vesiculares tienen burbujas esféricas distribuidas homogénea o ligeramente alargadas y orientadas.

#### ***2.3.4. Unidad de r/e 4: Un flujo de lava.***

La secuencia eruptiva finaliza con una extensión de ~0,82 km<sup>3</sup> de flujo de lava proveniente del mismo respiradero que los depósitos piroclásticos. El flujo es pobre en cristales, con fenocristales de plagioclasa y biotita, similar a las obsidiana piroclásticas. Las lavas de obsidiana muestran una amplia variedad de texturas, como masa amigdaloides masiva llena de minerales secundarios y bandas pumíceas.

#### ***2.3.5. Interpretación de la dinámica eruptiva a partir de la tefroestratigrafía.***

Las capas marrones de *r/e* 1 presentan una gran abundancia de líticos, oxidación en la parte superior y contactos bruscos con las capas ricas en piedra pómez. Estas características son consistentes con pulsos de actividad freatomagmática (Barberi et al., 1989; Yang et al., 2019). En las capas superiores de *r/e* 1, el tamaño de grano medio más grande y el rango de densidad más estrecho sugieren un aumento en la intensidad de la erupción con el tiempo (Carey y Sparks, 1986; Houghton et al., 2010).

Las fluctuaciones en el tamaño medio de grano, el contenido de piedra pómez y el contenido de líticos máficos en la parte inferior de la unidad de grano grueso *r/e* 2b sugiere una fase explosiva de la erupción de Los Espejos (por ejemplo, Pistolesi et al., 2015). Además, el estrecho rango de densidades de juveniles y el alto contenido de líticos máficos sugieren que la erupción fue intensa y alimentada por magmas que se fragmentaron en profundidad. Por otro lado, en las capas superiores de *r/e* 2, la densidad de juveniles promedio alta, un amplio rango de densidad y una fracción más alta de obsidiana vesicular se asocia a una parcial densificación del magma silíceo.

En la unidad *r/e* 3, los granos más finos y la mayor abundancia de clastos de obsidiana densa sugieren una tasa de ascenso de magma lenta, lo que permitió suficiente tiempo para la desgasificación y una densificación más eficiente del magma.

Aunque el rol de la desgasificación del magma ha sido propuesto como uno de los factores principales que gobernaron la dinámica eruptiva de la erupción de Los Espejos (Contreras-Hidalgo, 2020; Contreras et al., 2022), aún es incierto qué procesos fomentaron una desgasificación más eficiente, cuáles fueron los procesos que propiciaron la fracción creciente de clastos de obsidianas, que suele asociarse a erupciones más efusivas, y si existe una transición gradual de explosiva a efusiva. Las texturas de burbujas en piroclastos juveniles permiten reconstruir los procesos que las formaron, deformaron o colapsaron (Shea et al., 2010; Wright and Weinberg, 2009; Okumura et al., 2008). Por lo tanto, en este trabajo se realizarán análisis de texturas de clastos juveniles provenientes de las distintas unidades estratigráficas del depósito *r/e* para la reconstrucción de transición de la erupción de Los Espejos.

### 3. Marco teórico.

Las mediciones de la distribución del tamaño de burbujas (*BSD*) y la densidad del número de burbujas (*BND*) se han convertido en una herramienta para la interpretación de los procesos eruptivos (Toramaru 1990; Klug y Cashman 1994; Carey y Cols. 2009; Giachetti et al. 2010; Houghton y Cols. 2010; Alfano et al. 2012). Para la determinación del *BSD* y *BND*, Shea et al., (2010) propusieron una metodología que abarca todos los procesos de adquisición de datos, desde la recolección de muestra hasta el análisis cuantitativo del tamaño y número de burbujas. Diseñaron un nuevo programa (*FOAMS*) que utiliza imágenes de microscopía electrónica de barrido (*SEM*) e imágenes de electrones dispersos (*BSE*). Sin embargo, la metodología propuesta por Shea et al. (2010) necesita ser complementada por parámetros texturales de las burbujas, esencialmente la elongación, que permite interpretar el rol de la deformación en la formación de burbujas. Además, la obtención de imágenes y su procesamiento depende fuertemente de la representatividad de las burbujas más pequeñas, siendo crucial para la estimación del número de vesículas. Un ejemplo del uso de estos análisis de *BND* y *BSD* se expone en el trabajo de Rotella (2014), donde se menciona que el aumento del *BND* se debe al incremento de la tasa de descompresión del magma, la temperatura, el contenido de agua pre-eruptiva, la viscosidad y la tensión superficial.

Según Toramaru (1990), el análisis textural de burbujas de piroclastos permite describir la dinámica eruptiva, ya que las burbujas en los piroclastos preservan información sobre la exsolución volátil, la nucleación, el crecimiento, la coalescencia de las burbujas y la eventual fragmentación del magma. Tanto la tasa de nucleación y el crecimiento de burbujas están condicionados por las propiedades intensivas del magma (por ejemplo, contenido de volátiles y la viscosidad de la masa fundida) y las propiedades extensivas (por ejemplo, tasa de ascenso y fragmentación del magma), las cuales pueden ser afectados por la deformación o coalescencia de las burbujas (Klug and Cashman, 1994; Toramaru, 1995; Klug et al., 2002; Piochi et al., 2005; Adams et al., 2006; Noguchi et al., 2006; Lautze and Houghton 2007; Cigolini et al., 2008).

Toramaru (1990) menciona que la nucleación de burbujas requiere un valor de sobresaturación o sobrepresión distinto de cero, lo cual tiene una influencia significativa en la historia del cambio de volumen en los magmas vesiculares, controlando así el comportamiento del magma como fluido compresible. Aunque, si la nucleación de la burbuja se propaga dentro del conducto, la tasa de descompresión estaría controlada por la diferencia de presión, el espesor del choque y la velocidad de propagación. Además, se debe tener en cuenta el efecto del contenido de  $H_2O$ , para el caso de la nucleación de burbujas, ocurre como un evento único, considerando el contenido inicial de  $H_2O$ , ya que supone una condición sin burbujas preexistentes y sin liberación de gas. Esto puede ser cuestionable dada la evidencia que muestra desgasificación durante el evento eruptivo, como se observa en los casos de Chaitén (2008) y Cerdón Caulle (2011).

Toramaru (2006) propone un medidor de tasa de descompresión del magma utilizando valores de *BND* de erupciones volcánicas. Este método considera que las burbujas de los piroclastos son fósiles de la vesiculación de magma y que son la fuerza impulsora de las erupciones explosivas. Uno de los factores a considerar para el uso de este método es que las piedras pómez o escorias preservan la historia de la nucleación homogénea. Un posible criterio una distribución de tamaño de burbujas con un rango de tamaño estrecho similar a una

distribución exponencial, ya que una distribución tipo ley de potencia con un amplio espectro muestra una alta posibilidad de que ocurran núcleos heterogéneos (Toramaru 2006).

El método de Toramaru (2006) y Shea et al. (2010) se aplicaron al caso de la erupción de Chaitén 2008 (Alfano et al., 2012), con el objetivo de realizar un estudio de las características texturales y físicas de los clastos juveniles. Mediante *BSD* unimodal y su tendencia de la ley de potencia, se indicó que el magma no estaba en equilibrio con la fracción volátil, lo que resultó en una nucleación homogénea rápida y continua que ocurrió en las últimas fases del ascenso del magma a través del conducto. Esto llevó a que la fragmentación fuera provocada por la nucleación de burbujas debido a una disminución repentina de la presión (Alfano et al., 2012), desencadenando la transición eruptiva de una fase altamente explosiva a una fase más efusiva.

#### 4. Marco metodológico.

Se analizan 17 muestras de piroclastos juveniles correspondientes a los diferentes niveles de la secuencia estratigráfica de la erupción de Los Espejos. Desde la unidad *r/e1*, se considera las muestras K1–K2–I1–I2; de la unidad *r/e2*, se considera las muestras H1–H3–G2–F1–F2–D1–D4; y de la unidad *r/e3*, se considera las muestras C2–C3–C4–B1–B3–A2 (Figura 6, contiene la correlación de las muestras seleccionadas con la columna estratigráfica), las cuales fueron seleccionadas al presentar las densidades numéricas modales de cada componente existente en las respectivas unidades estratigráficas. Mediante la utilización de imágenes de microscopía óptica y microscopía de electrones retrodispersados (*BSEM*) con un aumento de 100X – 500X (1 píxel  $\sim 1 - 0.17 \mu\text{m}$ ) proporcionadas por *SEM* de la Universidad de Bristol, tomadas para la tesis de doctorado Contreras–Hidalgo, 2020. Se analiza las texturas de burbujas, considerando técnicas de tratamiento de imágenes como inspección visual, *distance maps*, *Watershed* y *marker–Watershed* del software ImageJ. Estas técnicas se utilizan para la segmentación de las burbujas, cálculos de densidad numérica de burbujas (*BND*) y la distribución del tamaño de burbujas (*BSD*).

#### 4.1. Segmentación de imágenes.

Para el análisis textural *BND* y *BSD*, es necesario segmentar las imágenes microscópicas *BSEM* debido a la posibilidad de burbujas coalescidas o colapsadas, lo que podría aumentar el tamaño de las burbujas. Por lo tanto, se utilizará el software ImageJ (Fiji). Se considerará un umbral de la imagen en escala de grises (8 bits), con valores de: 1 para vesículas y 255 para vidrio (matriz), como se muestra en la Figura 7. Esto permitirá obtener una imagen binaria estandarizada.

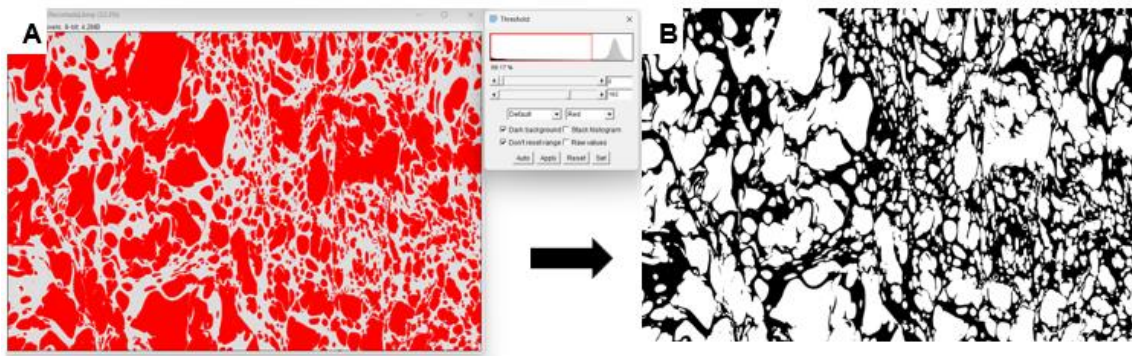


Figura 7: A) Segmentación de imágenes microscópicas (muestra 11 usada de ejemplo) con umbral en escala de grises, B) Imagen binarizada. Software ImageJ (Fiji).

Luego se procede con la extracción del *Distance Map*, que proporciona información sobre la distancia desde el borde de la pared de cada burbuja. Esta imagen se utiliza para generar una imagen semilla (*Marker*) que contiene los centros de las burbujas. Para evitar sesgos debido a diferencias de tamaño entre el centro de los píxeles máximos y las burbujas, se ajusta el tamaño del centro de la burbuja para que se aproxime al tamaño de la burbuja original, cumpliendo con el parámetro de forma de convexidad 1 a 0.8. La consideración de formas con convexidad entre 0.8 y 1 se debe a la simplificación de las burbujas al eliminar artefactos que puedan contener su contorno, obteniendo formas circulares a elipsoidales. Esto mejora la precisión al identificar límites de las burbujas, resultando en un proceso de segmentación más robusto y eficaz.

Se obtiene la imagen *marker* (o semilla, Figura 8), necesaria para el procedimiento de *marker controlled watershed* del *plugin MorphoLibJ*. Este *plugin* permite que el usuario tenga control sobre la segmentación mediante la imagen semilla. Al no tener este control, se ejecutaría

una segmentación sin considerar las formas de las burbujas, lo que resultaría en una separación aleatoria de las burbujas.

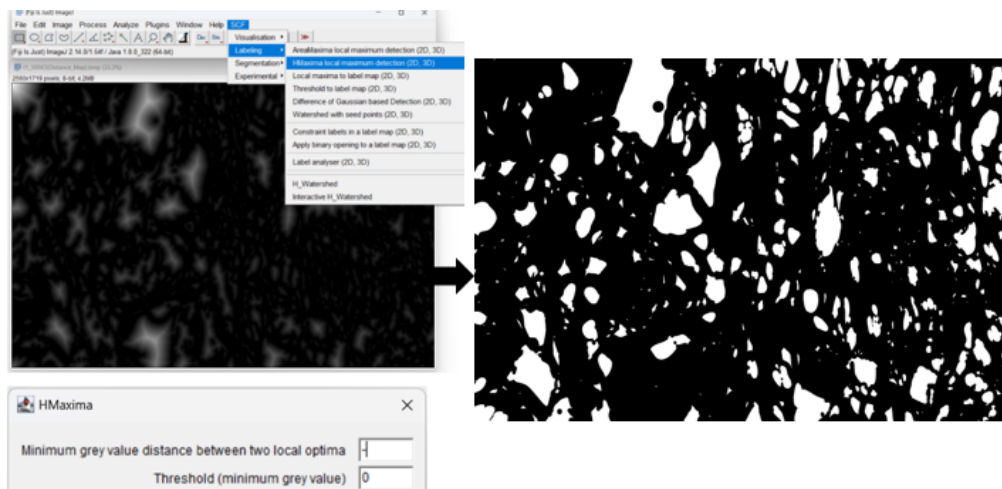


Figura 8: Interfaz de la creación de la imagen semilla (imagen lado derecho) cumpliendo con el parámetro de forma de convexidad  $>0.8$ . Software ImageJ (Fiji).

En la herramienta *marker controlled watershed*, se ingresan la imagen del gradiente (bordes de las burbujas), *marker* (imagen semilla) y *mask* (imagen binaria). Esto resulta una imagen que muestra la separación de las burbujas que presentaban coalescencia, como se ilustra en el ejemplo de la Figura 9.

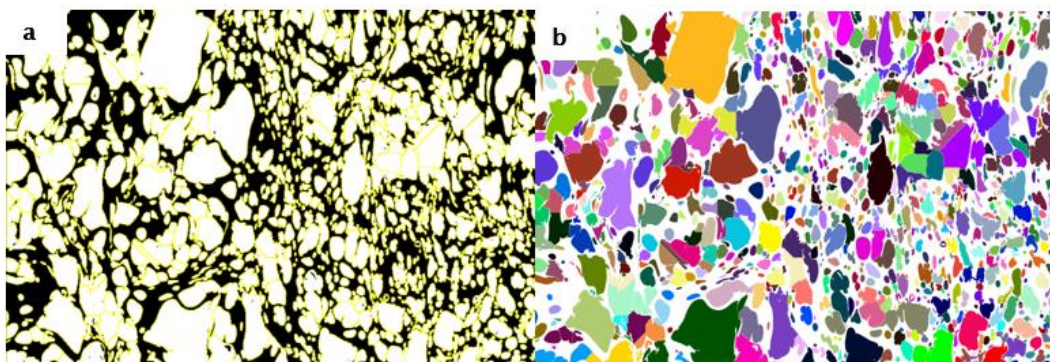


Figura 9: **a)** Imagen con las burbujas segmentadas, blancos corresponde a las burbujas, negro a la matriz y líneas amarillas a la separación de las burbujas. **b)** Burbujas segmentadas diferenciadas por colores. Software ImageJ (Fiji).

#### 4.2. Método análisis de texturas.

Con las imágenes obtenidas a partir de la segmentación, se realiza el cálculo de densidad del número de burbujas (*BND*), la cual corresponde a la cantidad de burbujas por unidad de área de la masa fundamental ( $N_A$ ,  $\text{mm}^{-2}$ ) y por unidad de volumen ( $N_V$ ,  $\text{mm}^{-3}$ ), por lo tanto, el área de

los cristales y burbujas no son consideradas para el cálculo de la densidad numérica. La distribución de tamaño de burbujas (*BSD*) se representa como la densidad acumulativa del número de burbujas en función del diámetro equivalente ( $N_A$ ,  $\text{mm}^{-2}$ ). Este análisis permite interpretar los procesos de nucleación y crecimiento de las burbujas durante la erupción, tanto para las muestras con como sin el proceso de segmentación de burbujas previamente descrito. Estos cálculos e interpretaciones permiten inferir la existencia de coalescencia de burbujas (Shea et al., 2010). Además de ser respaldado por descripciones visuales de las imágenes *BSEM* 2D.

### 4.3. Cálculos texturales.

Una vez integradas todas las partículas de manera continua, a continuación, se procede a mostrar las características texturales a través de diagramas de tamaño y densidad numérica (Shea et al., 2010):

- Distribuciones de tamaño de burbujas (*BSD*) en términos de densidad numérica.
- Gráficos de registros de densidad numérica (*BND*) con respecto al área ( $N_A$ ,  $\text{mm}^{-2}$ ) y al volumen ( $N_V$ ,  $\text{mm}^{-3}$ ).
- Distribución de tamaño de fracción de volumen simple ( $V$  o  $V_f$ ) (*VVD*).
- Distribución de tamaño de fracción de área acumulado (*CAAD*).

Una vez graficada la distribución de tamaño de la fracción de volumen simple (*VVD*), se compara su representatividad con los gráficos expuestos por Shea et al., 2010 ([Anexo 3](#)), los cuales describen la naturaleza de los eventos de nucleación y/o coalescencia durante la historia de vesiculación de los piroclastos (por ejemplo, Klug y Cashman, 1994).

Se tienen muestras con aumentos desde 100X hasta 500X, de los cuales se calcula su densidad numérica ( $N_A$  y  $N_V$ ). Se eliminan las partículas  $<4$  píxeles, disminuyendo el ruido que pueden producir y procurando la representatividad de las burbujas.

Densidad numérica por unidad de área: 
$$N_A = \frac{\text{Count}}{A} [\text{mm}^{-2}]$$

Volumen de burbujas:

$$V = A \times L [mm^3]$$

Densidad numérica por unidad de volumen:

$$N_V = \frac{N_A}{L} [mm^{-3}]$$

Donde:

- Tamaño de burbuja – diámetro equivalente (L) [mm]
- Cantidad de burbujas (Count)
- Área de burbuja (A) [mm<sup>2</sup>]
- Densidad numérica por área (N<sub>A</sub>) [mm<sup>-2</sup>]
- Densidad numérica por volumen (N<sub>V</sub>) [mm<sup>-3</sup>]

#### 4.4. Cálculo de estimación de la tasa de descompresión

La estimación de la tasa de descompresión se realiza mediante los datos de *BND* con el modelo de *BND decompression rate meter* propuesto por Toramaru (2006). La ecuación propuesta es definida por  $|dP/dt|$  en función de los parámetros de BND (N<sub>V</sub> o N), contenido de SiO<sub>2</sub> (C<sub>SiO2</sub> wt.%), contenido de H<sub>2</sub>O (C<sub>W</sub>, wt.%) y temperatura (°K).

$$\left| \frac{dP}{dt} \right| = a \times D \times \sigma \times P_W \times T^{-1/3} \times N^{2/3}$$

$$= f(C_W, C_{SiO_2}, N)$$

- D se define como la difusividad (m<sup>2</sup>/s), cuya expresión está en función de la temperatura, C<sub>S</sub> definida como el contenido de SiO<sub>2</sub> (o C<sub>SiO2</sub>), C<sub>W</sub> (Contenido de H<sub>2</sub>O) y la presión en función de C<sub>W</sub>.

$$D(P(C_W), T, C_S) = D_{BZX2004}(P(C_W), T, C_S) \times \frac{D_{ZB2000}(C_W, T, P(C_W))}{D_{ZB2000}(1 \text{ wt. } \%, T, P(C_W))}$$

- La cual se define por las siguientes dos fórmulas:

D<sub>ZB2000</sub> en función de la temperatura, la presión y el contenido de H<sub>2</sub>O.

$$D_{ZB2000}(C_W, T, P) = X \times \exp(m) \times \left\{ 1 + \exp[56 + m + X \times (-34.1 + \frac{44620}{T} + \frac{57.3(P \times 10^{-6})}{T})] - \sqrt{X} \times (0.091 + \frac{4.77 \times 10^6}{T^2}) \right\}$$

La expresión de  $D_{BZX2004}$  se realiza para tener una mayor precisión la difusividad del  $H_2O$  en la masa fundida, en función de la temperatura, la presión de saturación (P), el contenido de  $SiO_2$  y el contenido de  $H_2O$  del 1 wt. % (Behrens et al., 2004; Toramaru, 2006).

$$D_{BZX2004}(P, T, C_S) = 10^{(-0.757 - 0.0868C_S)} + \frac{-14785 + 131.7C_S}{T} + \frac{(3.079 - 0.048C_S)(P \times 10^{-6})}{T}$$

Donde se define como:

$$m = -20.79 - \frac{5030}{T} - \frac{1.4(P \times 10^{-6})}{T}$$

- P denota la presión (Pa) que es igual a la presión inicial de saturación ( $P_w$ ), lo cual se puede suponer, ya que los efectos de la presión sobre la difusividad son insignificantes.

$$P = 20000 \times 10^6 X^2$$

- El factor de  $20000 \times 10^6$  se obtiene a partir de  $200 \times 10^6 / (0.5/5)^2$ , ya que la solubilidad en agua a 200 MPa es 0.5 fracción molar de  $H_2O$  (Burnham, 1975; Toramaru, 2006).
- X se define como la fracción molar del agua en la masa fundida basándose en un único oxígeno, teniendo la siguiente relación.

$$X = 0.0167C_W$$

- $\sigma$  se definido como la tensión interfacial (N/m) y fue expresado por Bagdassarov et al. (2000) como:

$$\sigma = 0.2366 \exp \left( -0.35 \times 10^{-6} \times P_w - 11 \times 10^3 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{1273} \right) / R \right)$$

Donde R es la constante de los gases ideales (8.3 J/K).

Finalmente, a es una constante previamente definida igual a  $1 \times 10^{15}$ , la cual se considera debido a que la estimación de la tasa de descompresión  $|dP/dt|$  proporciona valores que son tres veces más pequeños que los valores reales obtenidos en los experimentos de laboratorio (Mourtada-Bonnefoi y Laporte, 2002, 2004; Mastin et al., 2004).

## 5. Resultados.

### 5.1. Análisis textural de burbujas.

Se seleccionan 17 muestras de piedras pómez con densidades representativas de cada unidad estratigráfica de *r/e* (Tabla 1). Mediante sus imágenes en microscopio *BSEM*, se realiza un análisis de texturas de burbujas, describiendo de manera cualitativa los tamaños, formas y elongación de las burbujas. De forma cuantitativa, se aborda la distribución de tamaño de burbuja (*BSD*) y la densidad numérica de burbujas (*BND*). Los análisis texturales se presentan considerando su orden estratigráfico para su correlación con la evolución temporal durante la erupción de Los Espejos (K2 corresponde a la base y A2 al techo de la secuencia). Los valores de  $N_A$  están presentados en  $\times 10^3 \text{ mm}^{-2}$  y los valores de  $N_V$  están en  $\times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ . La tabla 1 integra el resumen de los parámetros obtenidos.

Tabla 1: Resumen de los principales parámetros físicos y texturales de las 17 muestras del estudio correspondiente a la *r/e*.

| Unidad estratigráfica (a) | Etiqueta estratigráfica (a) | Muestra | Porosidad | Número de burbujas | Área de roca  | Área matriz   | $N_A$                         | $N_V$                         | Tamaño promedio<br>mm | Max. Tamaño burbuja -<br>diámetro equivalente<br>mm | Elongación promedio |
|---------------------------|-----------------------------|---------|-----------|--------------------|---------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|
|                           |                             |         |           |                    | $\text{mm}^2$ | $\text{mm}^2$ | $\times 10^3 \text{ mm}^{-2}$ | $\times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ |                       |                                                     |                     |
| rle3                      | rle3 s4                     | A2      | 62%       | 211                | 1.107         | 0.421         | 0.502                         | 0.629                         | 0.080                 | 0.390                                               | 1.98                |
|                           | rle3 s3                     | B1      | 64%       | 676                | 1.106         | 0.397         | 1.702                         | 8.298                         | 0.021                 | 0.207                                               | 2.27                |
|                           | rle3 s3                     | B3      | 71%       | 382                | 1.653         | 0.474         | 0.806                         | 1.778                         | 0.045                 | 0.236                                               | 2.04                |
|                           | rle3 s2                     | C2      | 48%       | 313                | 0.736         | 0.380         | 0.823                         | 3.821                         | 0.022                 | 0.111                                               | 3.11                |
|                           | rle3 s2                     | C3      | 59%       | 446                | 1.104         | 0.458         | 0.974                         | 3.841                         | 0.025                 | 0.206                                               | 2.38                |
|                           | rle3 s2                     | C4      | 52%       | 269                | 1.104         | 0.535         | 0.502                         | 1.810                         | 0.028                 | 0.184                                               | 2.49                |
| rle2                      | rle2b s6                    | D1      | 29%       | 1006               | 2.190         | 1.563         | 0.644                         | 2.315                         | 0.028                 | 0.191                                               | 3.21                |
|                           | rle2b s6                    | D4      | 47%       | 751                | 1.102         | 0.586         | 1.281                         | 6.488                         | 0.020                 | 0.119                                               | 2.63                |
|                           | rle2b s4                    | F1      | 41%       | 823                | 0.734         | 0.434         | 1.896                         | 16.274                        | 0.012                 | 0.065                                               | 2.74                |
|                           | rle2b s4                    | F2      | 37%       | 347                | 1.094         | 0.686         | 0.506                         | 3.186                         | 0.016                 | 0.362                                               | 2.18                |
|                           | rle2b s1                    | G2      | 50%       | 913                | 2.212         | 1.100         | 0.830                         | 2.254                         | 0.037                 | 0.310                                               | 3.13                |
|                           | rle2a s1                    | H1      | 44%       | 601                | 1.109         | 0.616         | 0.975                         | 3.192                         | 0.031                 | 0.241                                               | 6.43                |
|                           | rle2a s1                    | H3      | 56%       | 547                | 1.141         | 0.503         | 1.087                         | 4.700                         | 0.023                 | 0.160                                               | 2.45                |
|                           | rle1 s3                     | I1      | 60%       | 983                | 0.734         | 0.293         | 3.353                         | 29.325                        | 0.011                 | 0.082                                               | 2.2                 |
| rle1                      | rle1 s3                     | I2      | 40%       | 758                | 0.736         | 0.439         | 1.726                         | 15.829                        | 0.011                 | 0.063                                               | 2.17                |
|                           | rle1 s1                     | K1      | 58%       | 393                | 0.736         | 0.311         | 1.265                         | 7.324                         | 0.017                 | 0.099                                               | 2.05                |
|                           | rle1 s1                     | K2      | 58%       | 894                | 0.733         | 0.307         | 2.917                         | 25.091                        | 0.012                 | 0.102                                               | 2.24                |

(a) Contreras-Hidalgo, 2020.

#### 5.1.1. Cualidades texturales de las burbujas.

En la base de la secuencia estratigráfica correspondiente a la unidad *r/e* 1, se observan burbujas de formas irregulares y circulares, siendo las de menor tamaño de la secuencia estratigráfica (Sección K). Posteriormente (muestra I2, Figura 10), aumenta la presencia de burbujas circulares a elipsoidales de tamaños uniformes, con mayor predominancia de burbujas pequeñas ( $<20 \mu\text{m}$ ).

En la base de la unidad *r/e2*, la sección H, se diferencian burbujas de formas elipsoidales muy alargadas con una clara dirección preferencial. Estas son seguidas por la sección G, con burbujas de formas tabulares e irregulares. Con el aumento de la secuencia estratigráfica (Sección F–D), aumenta la cantidad de burbujas de formas angulosas y muy alargadas con una dirección preferencial (muestra D4 y C2, Figura 10), lo cual sugiere una alta tensión en el evento eruptivo (Rust y Cashman, 2007).

En la unidad *r/e 3*, comienzan a distinguirse burbujas coloformes, hay un aumento del tamaño y una disminución de burbujas alargadas (Muestra B3, Figura 10), lo cual se puede asociar a la coalescencia de las burbujas. Finalmente, en las secciones superiores de la estratigrafía, se nota un crecimiento del tamaño de las burbujas con formas predominantemente tabulares e irregulares (Sección B–A).

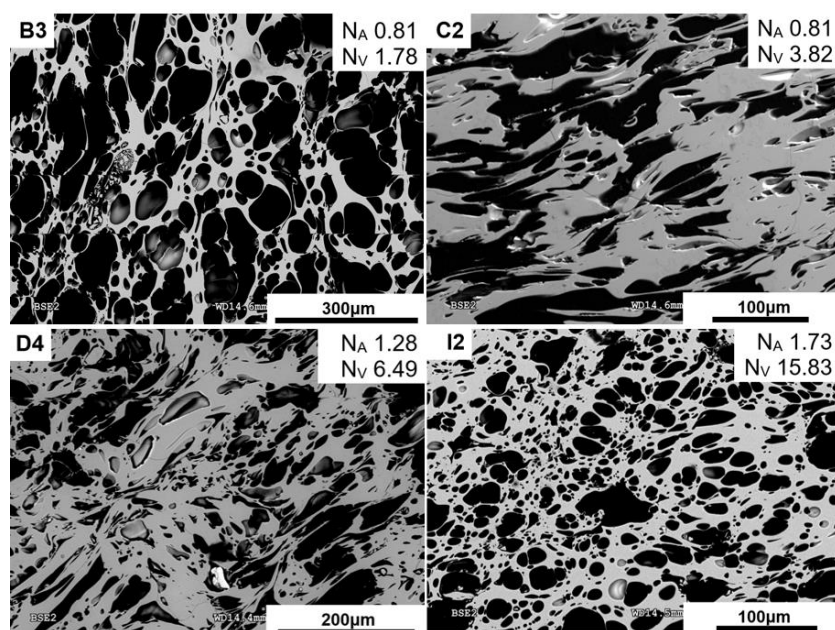


Figura 10: Imágenes BSEM de las muestras de la secuencia estratigráfica con sus respectivos valores de densidad numérica ( $N_A$  y  $N_V$ ). B3 muestra del techo de la secuencia, I2 muestra de la base de la secuencia y C2–D4 muestras intermedias de la secuencia.

### 5.1.2. Variaciones de la distribución de tamaño de burbujas (BSD).

La figura 11 presenta tres muestras representativas de las tendencias obtenidas para las distribuciones de tamaño de burbujas (BSD). A continuación, se describe la tendencia observada

en cada sección, para el detalle de las distribuciones de tamaño de burbujas para cada muestra ver Anexo 4.

Desde la base de la secuencia estratigráfica (*r/e* 1), la sección K, inicia con la muestra K2 se tiene una distribución unimodal en 0.02–0.04 mm, para la muestra K1 presenta una distribución unimodal de 0.04–0.06 mm, evidenciando un leve aumento del tamaño de burbujas. En la sección I, tanto para la muestra I1 (Figura 11) e I2 se tiene una distribución unimodal en 0.02–0.04 mm, manteniendo una tendencia de tamaño de burbujas similar para la unidad *r/e* 1, siendo las de menor tamaño de la secuencia estratigráfica.

En la unidad *r/e* 2, la sección H, se inicia con la muestra H3 (Figura 11), se tiene una distribución amplia unimodal en 0.05–0.09 mm, gran parte del tamaño de burbujas es uniforme, mientras que, para la muestra H1 con una distribución unimodal en 0.08–0.1 mm, con un claro aumento del tamaño de burbujas. La muestra G2 (Figura 11), tiene una distribución bimodal en 0.12–0.14 mm y en 0.28–0.3 mm. La sección F, inicia con la muestra F2, se tiene una gran cantidad de burbujas de tamaño 0.01–0.07 mm, pero muestra una burbuja de gran tamaño de 0.362 mm, que cubre la gran parte de la muestra, por otro lado, la muestra F1, tiene una distribución unimodal en 0.02–0.04 mm, con lo que se tiene una abrupta disminución del tamaño de las burbujas. Para la sección D, iniciando con la muestra D4, tiene una distribución unimodal amplia de 0.04–0.06 mm, mientras que la muestra D1 se tiene una distribución unimodal de 0.06–0.08 mm que contiene el ~85% del volumen de las burbujas.

En la unidad *r/e* 3, la sección C, se inicia con la muestra C4, que presenta una distribución unimodal en 0.06–0.08 mm, aunque presenta una gran fracción de burbujas de tamaño 0.18–0.2 mm (25%), la muestra C3 presenta una distribución unimodal amplia de 0.09–0.13 mm y la muestra C2 presenta una distribución unimodal en 0.04–0.06 mm, evidenciando una disminución en el tamaño de burbujas. La sección B, inicia con la muestra B3, se diferencia una distribución unimodal de 0.1–0.12 mm, la muestra B1 tiene una distribución unimodal en 0.05–0.09 mm con una leve disminución del tamaño, aunque la gran parte del volumen la cubre las burbujas de

tamaño 0.2–0.22 mm. Finalmente, la muestra A2, presenta una distribución de tamaño bimodal en 0.14– 0.16 mm y en 0.38–0.4 mm, siendo la muestra que presenta burbujas de mayor tamaño de la secuencia estratigráfica.

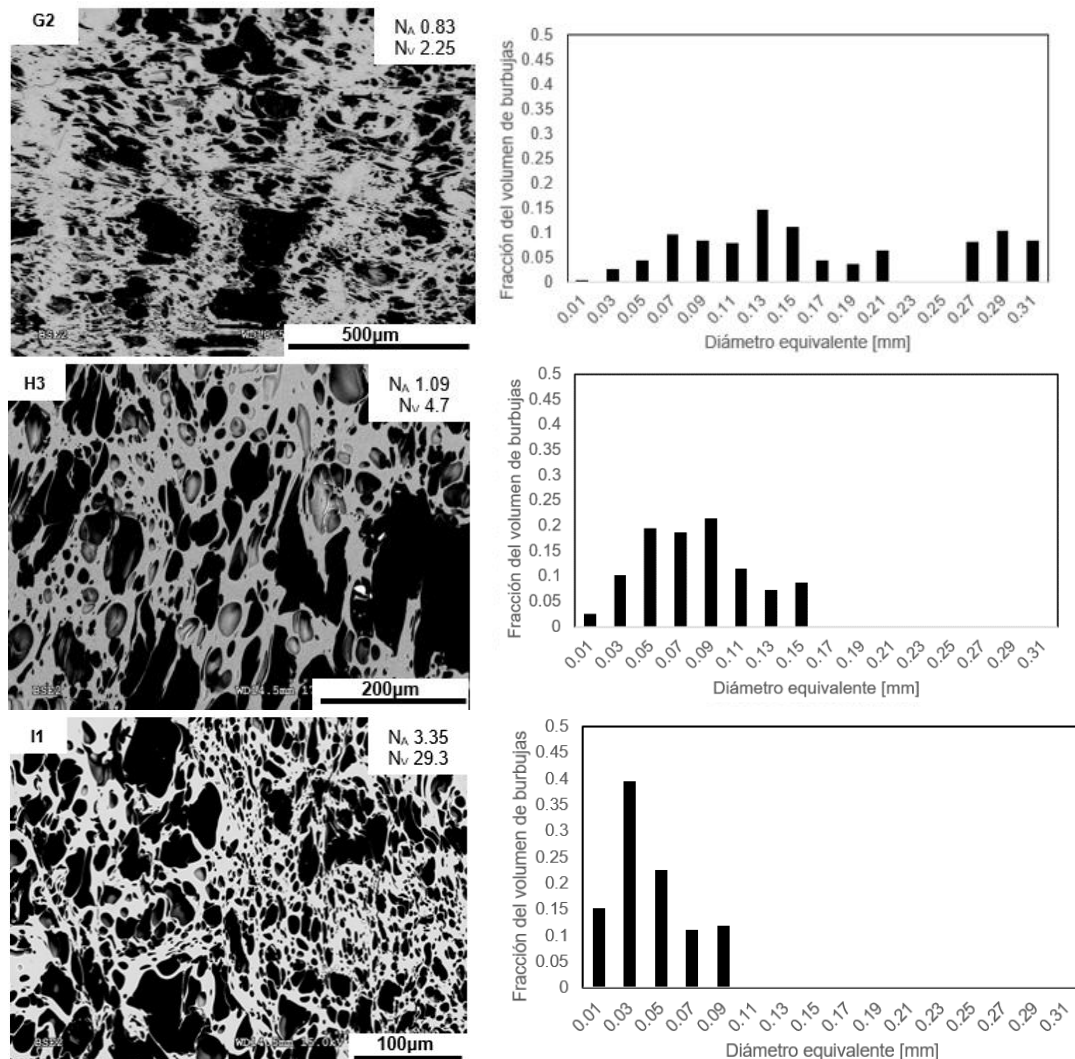


Figura 11: Distribución de tamaño de fracción de volumen simple (V o Vf) (VVD), ejemplos de muestras representativas, G2 muestra con una distribución bimodal, H3 muestra con una distribución unimodal amplia y I1 muestra con una distribución unimodal.

Según lo obtenido en la Figura 12 correspondiente a la Distribución de tamaño de fracción de área acumulado (CAAD; se presenta 4 muestras representativas, el detalle de cada una de las muestras en el [Anexo 5](#)), en todas las muestras se aprecia una disminución del tamaño de burbujas, especialmente en aquellas con tamaño  $> \sim 50 \mu\text{m}$ , influenciado por el proceso de segmentación, lo que provoca un aumento en la cantidad de burbujas. Considerando las formas

de la Figura 11 y los histogramas de distribución de tamaño, se tiene que, desde la base de la secuencia estratigráfica, desde la muestra K2 hasta la muestra I2, se caracteriza una única etapa de nucleación, lo cual se correlaciona con el análisis cualitativo al no tener formas coloformes ni irregulares. Para la muestra I1 se presenta una mayor nucleación y crecimiento de burbujas, seguida por la muestra H3 que presenta el colapso de las burbujas. Posteriormente, sigue una etapa de coalescencia de las burbujas con las muestras H1–G2–F2. Esta etapa es interrumpida por la muestra F1, la cual no presenta ni coalescencia ni colapso de las burbujas. Luego, se observa una etapa que progresivamente aumenta la coalescencia de las burbujas, promoviendo el colapso y múltiples etapas de nucleación y crecimiento.

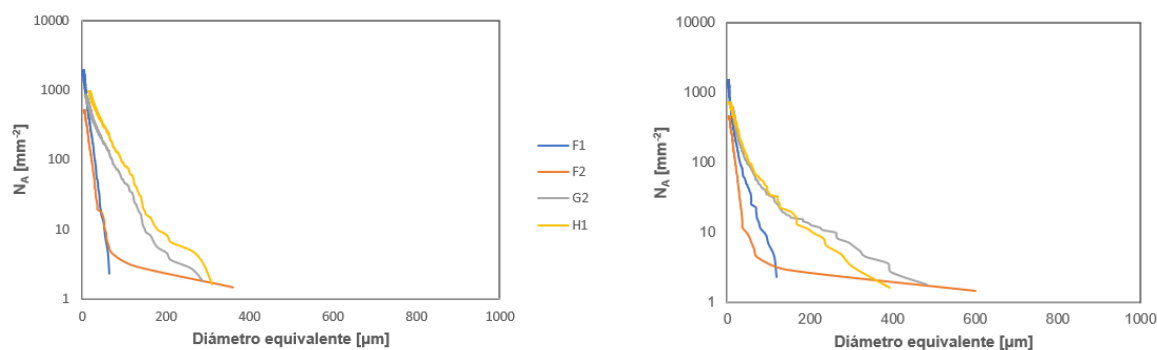


Figura 12: Distribución de tamaño de fracción de área acumulado (CAAD), a la izquierda post segmentación y a la derecha previa segmentación.

### 5.1.3. Análisis de elongación.

Mediante la elongación promedio, calculada eliminando las burbujas de tamaño  $<20 \mu\text{m}$  para disminuir el ruido y conservar la representatividad de las burbujas (la distribución grafica de la elongación promedio se encuentra en el [Anexo 6](#)), se tiende a tener valores medianamente similares entre las muestras. Sin embargo, se destaca la muestra H1, presenta la elongación promedio más alta (6.219), seguida por un drástico decrecimiento que posteriormente presenta una leve tendencia creciente en la muestra F1, evidenciando la existencia de burbujas alargadas que sugiere una alta tensión (Rust y Cashman, 2007). Además, esto proporciona información

sobre el grado de deformación. Finalmente, disminuye drásticamente la elongación promedio a valores entre el rango 2–3.

#### 5.1.4. Densidad numérica de burbujas (BND).

Se calcula la densidad numérica de burbujas (*BND*) respecto al área ( $N_A$ ) (Figura 13), la cual evidencia una tendencia decreciente con algunos aumentos anómalos. Aun así, por motivos de representatividad, considerando la modelación 3D y la aplicabilidad para el modelo numérico de Toramaru (2006), se normalizan los valores de *BND* para obtener la densidad numérica de burbujas respecto al volumen ( $N_V$ ) promedio de cada muestra, esto mediante el cálculo de la cantidad de burbujas contenido en el volumen, la cual se obtiene multiplicando el área por el diámetro equivalente.

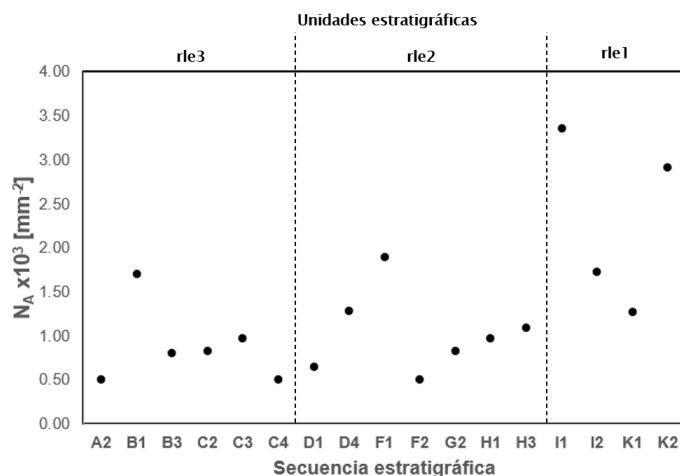


Figura 13: Densidad numérica por área ( $N_A$ ) versus a la secuencia estratigráfica de *rle*. K2 corresponde a la base y A2 corresponde al techo del depósito.

El valor promedio de  $N_V$  para la secuencia estratigráfica de *rle* es de  $1.5 \pm 1 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ . A continuación, se describen los valores específicos de  $N_V$  para cada muestra en la secuencia estratigráfica de *rle*. La tendencia general muestra una disminución (Figura 14), comenzando con un  $N_V$  de  $25.09 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$  y llegando a un mínimo de  $N_V$  de  $0.63 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ , el máximo valor fue de  $29.32 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$  (muestras I1), desde la muestra K2 hasta la I1 (Figura 14) correspondiente a la unidad *rle* 1, presenta valores altos ( $29.325 - 15.829 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ) sin una variación significativa. Para la unidad *rle* 2, ocurre una abrupta disminución desde la muestra H3

( $4.7 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ) hasta la muestra G2 ( $2.254 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ) (Figura 14), la cual se correlaciona con las muestras que presentan una etapa de colapso seguida por la nucleación de las burbujas, posteriormente, hubo un aumento de  $N_v$  (muestras F1,  $16.274 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ). Desde la muestra D4 (techo de la unidad *r/e* 2,  $6.488 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ) hasta la muestra A2 (unidad *r/e* 3,  $0.629 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ) predomina la tendencia decreciente de  $N_v$ . Esta tendencia decreciente se correlaciona con el análisis cualitativo y cuantitativo que muestran aumento de la nucleación y crecimiento de las burbujas.

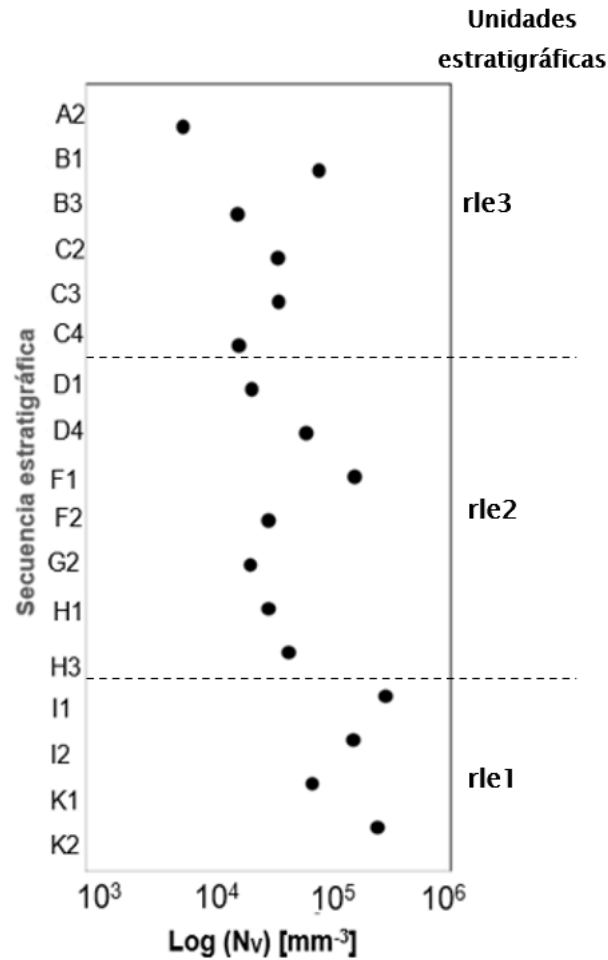


Figura 14: Densidad numérica por volumen ( $N_v$ ) versus secuencia estratigráfica (K2 base y A2 techo).

#### 5.1.5. Tasa de descompresión del magma.

La tasa de descompresión que caracterizó la erupción de Los Espejos se calculó utilizando el modelo propuesto por Toramaru (2006). Se consideraron parámetros correspondientes a un

magma riolítico (75.9 SiO<sub>2</sub> wt.%; Hildreth, 2010), con 5.9 – 6.6 H<sub>2</sub>O wt.% (Contreras et al., 2022), y un intervalo de temperatura entre 775 – 805 °C (Contreras et al., 2022).

La tasa de descompresión teniendo en cuenta la variación de temperatura desde 775°C hasta 805°C (Figura 15.A), comenzando con la unidad *r/e* 1, desde la base con la muestra K2 es de  $23.41 \pm 10.42$  MPa/s, seguidas por la muestra K1 de  $10.3 \pm 4.59$  MPa/s. Para la sección I, se inicia con la muestra I2 de  $17.22 \pm 7.67$  MPa/s y la muestra I1 de  $25.97 \pm 11.56$  MPa/s, siendo estos los valores de la tasa de descompresión más alto. Para la unidad *r/e* 2, se denota una clara tendencia decreciente, con la muestra H3 se obtiene una tasa de descompresión de  $7.66 \pm 3.41$  MPa/s y la muestra H1 es de  $6.25 \pm 2.31$  MPa/s. Para la muestra G2 es de  $4.7 \pm 2.09$  MPa/s. En la sección F, iniciando con F2 se tiene una tasa de  $5.92 \pm 2.64$  MPa/s, mientras que para F1 se tiene  $17.54 \pm 7.81$  MPa/s, la cual muestra un aumento abrupto de la tasa de descompresión. Aun así, para la muestra D4 se tiene  $9.5 \pm 4.23$  MPa/s y la muestra D1 se tiene  $4.78 \pm 2.13$  MPa/s, los que describen una disminución de la tasa de descompresión. Seguida por la unidad *r/e* 3, la sección C, la muestra C4 de  $4.01 \pm 1.81$  MPa/s, muestra C3 de  $6.7 \pm 2.98$  MPa/s y la muestra C2 de  $6.68 \pm 2.98$  MPa/s, siendo relativamente similares en estas últimas dos muestras mencionadas. Para B3 se tiene  $4.01 \pm 1.79$  MPa/s y B1 se tiene  $11.19 \pm 4.99$  MPa/s, se denota un aumento abrupto de la tasa de descompresión. Y finalmente, la muestra A2 se tiene  $2.01 \pm 0.89$  MPa/s, siendo este el valor más bajo de las tasas de descompresión obtenidas. De las cuales en resumen se evidencia una clara tendencia decreciente con el aumento de la altura de la secuencia estratigráfica.

La tasa de descompresión, teniendo en cuenta la variación de H<sub>2</sub>O wt. % desde 5.9 wt.% hasta 6.6 wt.% (Figura 15.B), presenta una tendencia predominantemente decreciente, similar a la obtenida con la variación de temperatura. Desde la base con la muestra K2 es de  $21.39 \pm 0.29$  MPa/s, seguida por la muestra K1 de  $9.42 \pm 0.13$  MPa/s. Para la sección I, se inicia con la muestra I2 de  $15.74 \pm 0.22$  MPa/s y la muestra I1 de  $23.74 \pm 0.32$  MPa/s, siendo estos los valores de la tasa de descompresión más alto. Para la muestra H3, se obtiene una tasa de descompresión de  $7 \pm 0.1$  MPa/s y la muestra H1 es de  $5.42 \pm 0.08$  MPa/s. Para la muestra G2, es de  $4.29 \pm 0.06$

MPa/s. En la sección F, iniciando con F2 se tiene una tasa de  $5.4 \pm 0.08$  MPa/s, mientras que para F1 se tiene  $16.04 \pm 0.22$  MPa/s, la cual muestra un aumento abrupto de la tasa de descompresión. Aun así, para la muestra D4 se tiene  $8.69 \pm 0.12$  MPa/s y la muestra D1 se tiene  $4.37 \pm 0.06$  MPa/s, los que describen una disminución de la tasa de descompresión. Seguida por la sección C, la muestra C4 de  $3.71 \pm 0.05$  MPa/s, muestra C3 de  $6.13 \pm 0.08$  MPa/s y la muestra C2 de  $6.1 \pm 0.08$  MPa/s, siendo relativamente similares en estas últimas dos muestras mencionadas. Para B3 se tiene  $3.66 \pm 0.05$  MPa/s y B1 se tiene  $10.23 \pm 0.14$  MPa/s el que denota un aumento de la tasa de descompresión. Y finalmente, la muestra A2 se tiene  $1.84 \pm 0.03$  MPa/s, siendo este el valor más bajo de las tasas de descompresión obtenidas.

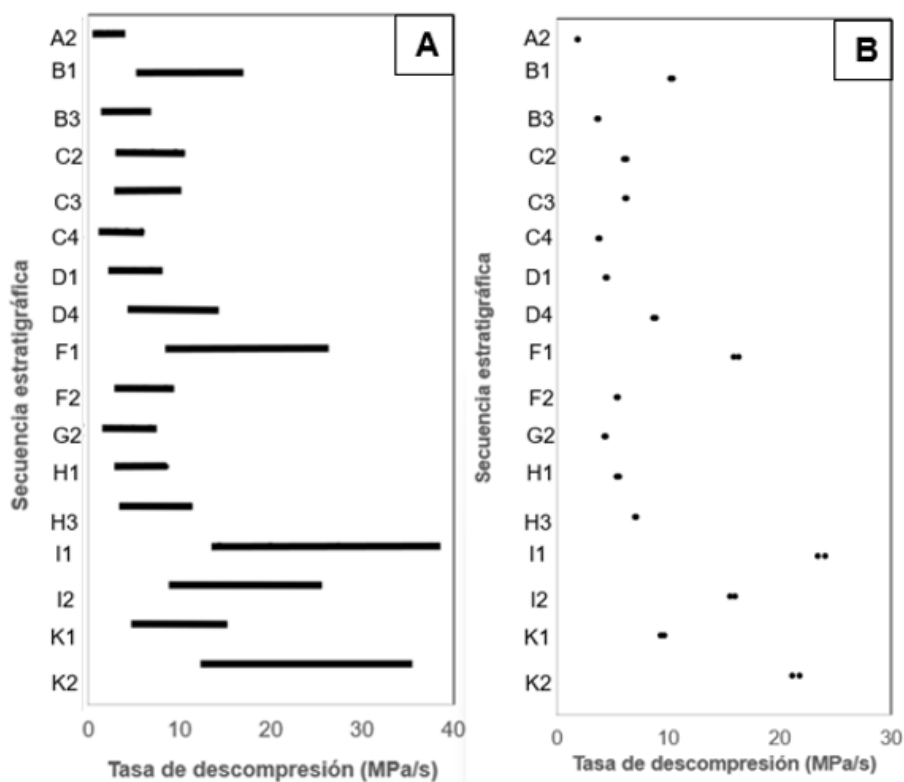


Figura 15: Tasa de descompresión de rle. A son los valores considerando temperatura desde  $805^{\circ}\text{C}$ – $775^{\circ}\text{C}$ . B son los valores del contenido de  $\text{H}_2\text{O}$  desde 6.6 – 5.9 wt.%.

## 6. Discusión.

Se discutirá la comparación de la erupción de Los Espejos con otras erupciones riolíticas históricas (principalmente Chaitén en 2008 y Cerdón Caulle en 2011). El objetivo es encontrar

similitudes entre erupciones riolíticas de distintas edades y, finalmente, a partir de los análisis cualitativo y cuantitativo (*BND* y *BSD*), comprender la dinámica eruptiva que gobierna estos eventos. Los Espejos consiste en una erupción de características explosiva, constituidas por depósitos piroclastos y seguida por una etapa efusiva que desencadenó un flujo de lava.

Considerando los antecedentes de Los Espejos y de las erupciones riolíticas históricas presentadas (resumen en Tabla 2), el volumen de la etapa explosiva no es comparable, debido al mayor volumen que presenta Los Espejos; sin embargo, los volúmenes de la fase efusiva entre las 3 erupciones son similares. Lo que es destacable de estas erupciones (Los Espejos, Chaitén y Cordón Caulle) es que en todas hubo una transición eruptiva de una fase explosiva inicial a una fase más efusiva, de mayor o menor duración y volumen. A continuación, se presenta un resumen de las características principales de las tres erupciones riolíticas mencionadas.

Tabla 2: Resumen características erupciones riolíticas.

|                                  | Los Espejos                                                                 | Chaitén                                                                             | Cordón Caulle                                                                  |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Año</b>                       | Datada en 19 ka <sup>(a)</sup>                                              | 2008–2009                                                                           | 2011 –2012                                                                     |
| <b>Duración</b>                  | Sin información (fase explosiva)<br>3–7 meses (fase efusiva) <sup>(b)</sup> | 2 semanas (fase explosiva) <sup>(d)</sup><br>20 meses (fase efusiva) <sup>(d)</sup> | 27 h (fase explosiva) <sup>(f)</sup><br>10 meses (fase efusiva) <sup>(f)</sup> |
| <b>Altura columna</b>            | No registrada                                                               | 20 km <sup>(d)</sup>                                                                | 10 – 12 km                                                                     |
| <b>Composición</b>               | Riolita (75.5 – 77.5% SiO <sub>2</sub> ) <sup>(a)</sup>                     | Riolita (73–76% SiO <sub>2</sub> ) <sup>(d)</sup>                                   | Riolita (69 – 72% SiO <sub>2</sub> ) <sup>(f)</sup>                            |
| <b>Tipo</b>                      | Pliniana                                                                    | Subpliniana                                                                         | Pliniana                                                                       |
| <b>Fase efusiva</b>              | Flujo de lava                                                               | Complejo de domos                                                                   | Flujo de lava                                                                  |
| <b>Volumen (Etapa explosiva)</b> | 3–5 km <sup>3(a)</sup>                                                      | 0.5 km <sup>3(d)</sup>                                                              | 0.35 km <sup>3(f)</sup>                                                        |
| <b>Volumen (Etapa Efusiva)</b>   | 0.82 km <sup>2(a)</sup>                                                     | 0.8 km <sup>3(d)</sup>                                                              | 0.45 km <sup>3(f)</sup>                                                        |
| <b>Temperatura</b>               | 775 – 805°C <sup>(c)</sup>                                                  | 810 – 860 °C <sup>(e)</sup>                                                         | 870 – 920 °C <sup>(g)</sup>                                                    |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>            | 5.9 – 6.6 (wt.%) <sup>(c)</sup>                                             | 4.0 (wt.%) <sup>(e)</sup>                                                           | 2.5 – 4.5 (wt. %) <sup>(g)</sup>                                               |
| <b>Densidad numérica</b>         | 1.5 ± 1.4 x 10 <sup>5</sup> mm <sup>-3</sup>                                | 1.3 ± 0.5 x 10 <sup>5</sup> mm <sup>-3</sup>                                        | Sin información                                                                |
| <b>Tasa de descompresión</b>     | 13.9 ± 12 MPas <sup>-1</sup>                                                | 12.1 ± 4.3 MPas <sup>-1</sup>                                                       | Sin información                                                                |

<sup>(a)</sup>Hildreth et al., 2010; <sup>(b)</sup>Cáceres et al., 2018; <sup>(c)</sup>Contreras et al., 2022; <sup>(d)</sup>Alfano et al., 2012; <sup>(e)</sup>Castro y Dingwell, 2009;

<sup>(f)</sup>Schipper et al., 2013; <sup>(g)</sup>Castro et al., 2013.

Como se aprecia en la tabla 2, las erupciones de Los Espejos, Chaitén y Cordon Caulle, son relativamente similares, ya que presentan una etapa efusiva y volúmenes de lavas parecidos. Sin embargo, el bajo volumen de la etapa explosiva para Chaitén y Cordon Caulle posiblemente describe un reservorio magmático de menor tamaño, una morfología de conducto estable y sin colapso que puede desencadenar una erupción breve en su etapa inicial. Debido a la presión ejercida por los volátiles atrapados en el magma, esto podría iniciar el evento con un estilo explosivo, seguido por una abrupta transición eruptiva abrupta producto de una desgasificación eficiente en el conducto volcánico.

Por otro lado, Los Espejos se caracteriza por un contenido de agua mayor, lo que provoca que, en un evento eruptivo, aumente la presión debido a la rápida expansión del vapor. Esto resulta en erupciones altamente explosivas donde se expulsan grandes cantidades de cenizas, gases y fragmentos de rocas. Esta gran diferencia en el volumen del depósito de la etapa explosiva podría deberse a estas condiciones particulares de Los Espejos.

Respecto a la Densidad numérica de burbujas ( $BND$ ) en  $N_v$  de Los Espejos y Chaitén, son similares, siendo para Los Espejos  $1.5 \pm 1.4 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$  y para Chaitén  $1.3 \pm 0.5 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ . Es destacable que para Los Espejos presenta una mayor variabilidad, alcanzando valores más altos. Lo que sugiere una mayor intensidad eruptiva y, por lo tanto, una erupción más explosiva. El valor obtenido de  $N_v$  para Los Espejos presenta una tendencia similar a otras erupciones riolíticas de estilo Subpliniano, como es evidenciado en la Figura 16. Aunque no se establece un límite claro que permita correlacionar valores de  $N_v$  y los estilos eruptivos, se menciona que las erupciones riolíticas subplinianas–plinianas tienden a presentar valores de  $N_v$  mayores en comparación a erupciones Estrombolianas o Hawaianas.

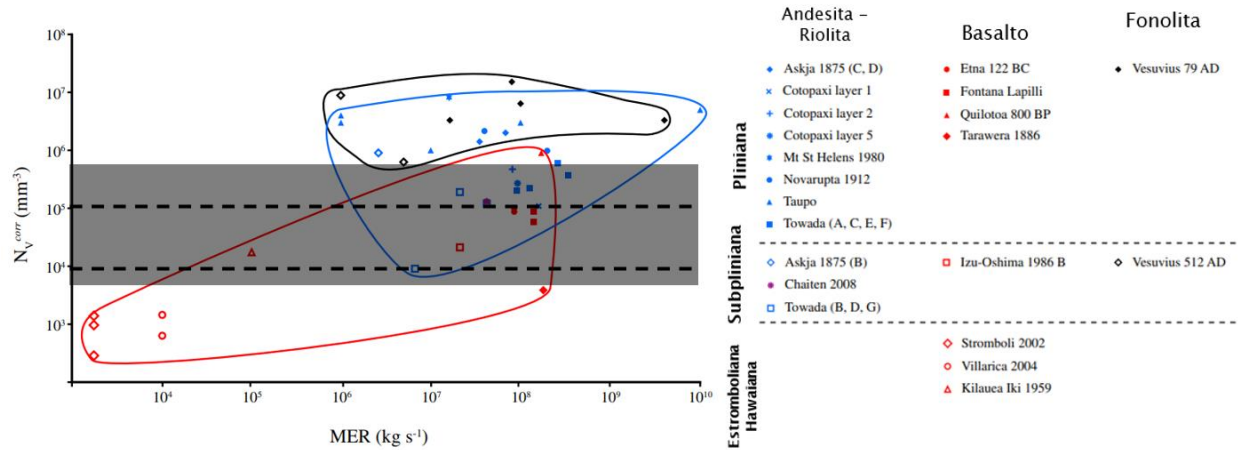


Figura 16: Gráfico log-log de la tasa de erupción masiva (MER) versus la densidad del número de vesículas corregido por la masa fundida ( $N_v$ ). El área de color gris corresponde a los valores estimados de  $N_v$  para rle y las líneas segmentadas contienen el >50% de los valores de  $N_v$  obtenidos para las muestras. Modificado de Alfano et al., 2012.

### 6.1. Densidad del número de burbujas ( $BND$ , $N_v$ ) y Tasa de descompresión.

Según el  $N_v$ , para una temperatura con un intervalo de 775–805°C y un contenido de agua de 5.9 a 6.6 wt.%, se estima que la tasa de descompresión que produjo la erupción de Los Espejos es de ~15 MPa/s (~1.5 x 10<sup>7</sup> Pa/s; Toramaru, 2006). Este valor de la tasa de descompresión concuerda con los valores calculados del el *BND decompression rate meter* para erupciones plinianas pasadas presentadas por Toramaru (2006) en la Figura 17. Estos son similares a los valores obtenidos por Alfano et al.(2012) para la erupción de Chaitén (2008) con un valor de la tasa de descompresión de ~10 MPa/s. Estos resultados están relacionados con los diferentes mecanismos que controlan la vesiculación, la cual está controlada por la alta viscosidad (Toramaru, 1995; Klug y Cashman, 1996).

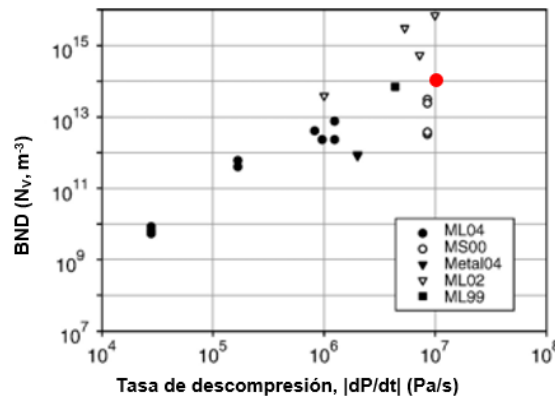


Figura 17: Datos experimentales recopilados del BND decompression rate meter. En la leyenda, ML04 hace referencia a datos de Mourtada Bonnefoi y Laporte (2004); MS00, Mangan y Sisson (2000); Metal104, Mangan et al. (2004), ML02,

*Mourtada-Bonnefoi y Laporte (2002) y ML99 Mourtada-Bonnefoi y Laporte (1999). En esta parcela, experimentos (Gardner et al., 1999, 2000; Larsen y Gardner, 2004; Gardner y Denis, 2004) y punto de color rojo la erupción de Los Espejos. Modificado de Toramaru (2006).*

La densidad del número de burbujas (*BND*) considerando el modelo número de Toramaru (2006) es capaz de entregar una estimación de la tasa de descompresión del magma; sin embargo, los resultados entregados por este modelo deben ser manejados con cautela. Muestra una gran sensibilidad a la temperatura, la cual puede variar durante el evento eruptivo. Los valores de 775°C tienden a estar asociados más a la fase explosiva (pliniana), mientras que los 805°C a la fase más efusiva. Además, es importante tener en cuenta que el modelo de Toramaru (2006) no fue comprobado para tasas de descompresión superior a 10 MPa/s. Según Toramaru (2006), la estimación de la tasa de descompresión en rangos de  $10^6$ – $10^8$  Pa/s es muy alta, lo que introduce un cierto grado de incertidumbre la aplicación de este modelo para erupciones plinianas.

## **6.2. Densidad del número de burbujas (*BND*, $N_v$ ) y clastos de obsidiana.**

Desde la muestra D1 (techo de la unidad *r/e2* ) hasta la muestra A2 (unidad *r/e 3*) se caracteriza por la fracción creciente de obsidiana y la tendencia decreciente de  $N_v$ , con lo que se infiere una relación directa. Esta relación tendría estar vinculada al aumento de la densidad y el desarrollo de burbujas uniformes y tabulares, indicando la predominancia de procesos de coalescencia y cizallamiento. El cizallamiento está asociado con la alta tensión localizada en los márgenes del conducto, lo que formaría los clastos de obsidiana (Rust y Cashman, 2007).

En la parte superior de la secuencia estratigráfica, predominan las burbujas alargadas y orientadas, lo que favorece la coalescencia de las burbujas. La coalescencia aumenta la conectividad de las burbujas dentro del magma, lo que permite su desgasificación (Stasiuk, 1996). La desgasificación tiene la capacidad de reducir la presurización de los volátiles, facilitando así el colapso de las burbujas y la densificación del magma.

En consecuencia, el aumento de los clastos de obsidiana y el subsiguiente flujo de lava se originaron debido al colapso de las burbujas y la densificación del magma dentro del conducto, como resultado del aumento de la tensión, la deformación y la desgasificación.

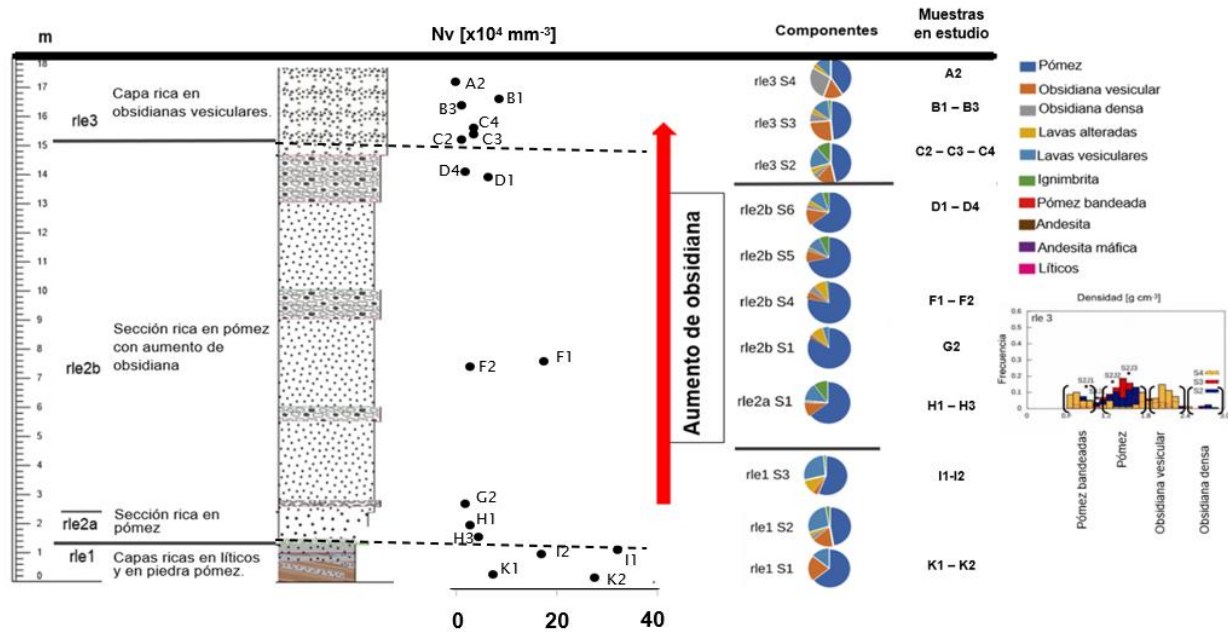


Figura 18: Correlación de la secuencia estratigráfica de Los Espejos (rle) con la densidad del número de burbujas (BND,  $N_v$ ) obtenidas en este estudio. Modificado de Contreras-Hidalgo, 2020.

### 6.3. Reconstrucción de la dinámica eruptiva de Los Espejos.

Inicialmente, se determina una etapa 1 (Freatomagmática) del evento eruptivo, correspondiente a la capa *rle1*, especialmente las muestras K1-K2, correspondiente a capas marrones con una abundante fracción de líticos y contactos abruptos con las capas ricas en piedra pómez. Debido a estas características suele ser consistente con pulsos de actividad freatomagmática (Barberi et al., 1989), lo cual sería válido al considerar que la tendencia de densidad de número de burbujas (BND;  $N_v$ ) es presentar valores muy altos ( $>1.5 \pm 1 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ ) y con mayor predominancia de burbujas pequeñas (BSD), en donde predomina la nucleación de las burbujas con una leve coalescencia. Esto es consistente con una alta intensidad eruptiva asociadas a erupciones altamente explosivas (Alfano et al., 2012, Houghton et al., 2010, Rotella et al., 2013).

Posteriormente, para la etapa 2 (Pliniana), considerando las muestras I1-I2 (unidad *rle1*), correspondiente a capas ricas en piedra pómez que representan un pulso de mayor contenido magmático (Barberi et al., 1989; Contreras-Hidalgo, 2020), las densidades del número de burbujas ( $N_v$ ) son comparablemente mayores a la erupción subpliniana de Chaitén (2008), pero

son inferiores a las erupciones plinianas de Pinatubo, Filipinas, en 1991 (Alfano et al., 2012; Polacci et al., 2001). Evidenciado los valores máximos de  $N_v$  ( $29.32 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ), por las tendencias de las burbujas de no mostrar ni coalescencia ni colapso, sugiere un aumento de la intensidad eruptiva con el tiempo (Houghton et al., 2010). Además, se debe incluir que los mayores contenidos de líticos de lava máfica y piedra pómez en las muestras sugiere que el aumento de la intensidad de la erupción fue acompañado por una propagación descendente del nivel de fragmentación (Macedonio et al., 1994; Contreras-Hidalgo, 2020).

Seguida por las muestras H1-H3 (base de la capa *r/e2*), presenta una abrupta disminución de  $N_v$  ( $2-4 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ) y la presencia de burbujas de mayor tamaño con formas coloformes e irregulares, con lo que se infiere que las burbujas más pequeñas se fusionan con las burbujas de mayor tamaño, produciendo que la vesiculación y coalescencia de las burbujas sean controladas por el aumento de la nucleación y su crecimiento (Rotella et al., 2014). La coalescencia de las burbujas promueve una desgasificación más eficiente, generando la disminución de la intensidad eruptiva.

La abundancia de líticos previamente mencionada (base capa *r/e1*, muestra K1-K2), sugieren una ampliación del conducto de erupción mediante la excavación de la roca huésped (Rust y Cashman, 2007; Stasiuk et al., 1996). Siendo así, la formación creciente de la obsidiana se deba a la alta tensión de los márgenes del conducto (Rust y Cashman, 2007; Contreras-Hidalgo, 2020), que se infiere por el alargamiento de las burbujas en la muestra H1, evidenciando la existencia de cizalle.

Para la etapa 3 (Pliniana de menor intensidad), considerando la muestra G2 como su inicio, se diferencian un aumento de burbujas alargadas con bordes rectos que muestran burbujas colapsadas y la fracción creciente de obsidiana vesicular. Esto sugiere una parcial densificación del magma silíceo (Contreras-Hidalgo, 2020), lo cual está relacionado a la desgasificación del magma más eficiente, asociada a la alta tasa de deformación (Okumura et al., 2009; Schipper et al., 2013), mencionada anteriormente a partir de las burbujas alargadas.

En la muestra F1 (*r/e2b s4*), ocurre un aumento de  $N_v$  ( $16.274 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ) y la inexistencia de evidencias de coalescencia de burbujas, con lo que se infiere un aumento local de la intensidad eruptiva. Esta muestra presenta características similares a la erupción pliniana, con predominancia de piedra pómez con burbujas circulares a elipsoidales, y una disminución del tamaño con una distribución unimodal. Por lo cual, se infiere la ocurrencia de un nuevo pulso explosivo. Posterior a este evento, se retoma la tendencia decreciente de  $N_v$  con burbujas de forma coloformes e irregulares, como se evidencia en las muestras D1–D4–C2–C3–C4–B3 (techo capa *r/e2* y base capa *r/e3*). Esto se asocia a la coalescencia, que promueve una desgasificación más eficiente y, por ende, la disminución de la intensidad eruptiva.

En la etapa 4 (Flujo de lava), la muestra A2 (techo de la capa *r/e3*), denota los valores más bajo de la densidad numérica de burbujas ( $N_v$ ,  $0.629 \times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ ), un aumento abrupto de clastos de obsidianas densas y una densificación del magma, lo cual se denota el colapso de las burbujas. Estos cambios se asocian a una mayor deformación, interpretada por las direcciones preferenciales de las burbujas alargadas que indican un alto grado de cizallamiento, facilitando la desgasificación del magma (Papale, 1999). Este proceso favorece la disminución de la tasa de descompresión del magma, promoviendo la formación de clastos de obsidiana y preludiaron la transición a la etapa efusiva.

Por lo tanto, se propone que la tendencia decreciente de  $N_v$  y la disminución de la tasa de descompresión del magma fueron ocasionadas por la nucleación de las burbujas, provocando la fragmentación y desgasificación más eficiente del magma. Esto promovió la disminución de la intensidad eruptiva, preludiando la transición eruptiva gradual pliniana a efusiva, siendo capaz de producir una columna eruptiva (asociadas a la piedra pómez y a la etapa pliniana) y un flujo de lava (obsidiana densa asociada a la fase efusiva) en el mismo evento eruptivo. Las etapas identificadas se presentan de manera visual en la figura 19.

## Etapa 4: Flujo de lava.



## Etapa 3: Fase Pliniana

Disminución abrupta y temprana de la tasa de descompresión resulta en una generación creciente de obsidiana.



## Etapa 2: Fase Pliniana

Peak de la tasa de descompresión asociada a paroxismo.



## Etapa 1: Freatomagmática (rle1)

Pulsos eruptivos asociados a alta variabilidad de la tasa de descompresión.

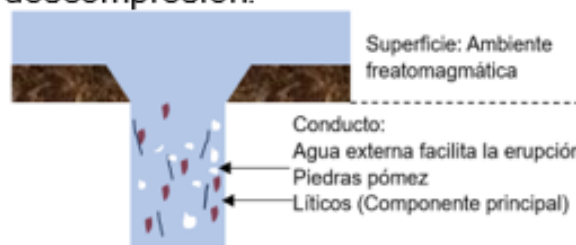


Figura 19: Modelo de las etapas de la erupción de Los Espejos (rle), correspondiente a las 4 etapas, iniciando por la etapa freatomagmática, seguida por un estilo pliniano con la disminución de la intensidad eruptiva y finalmente el flujo de lava correspondiente a la fase más efusiva.

#### **6.4. Consideraciones para futuras erupciones.**

A partir de los resultados obtenidos y las similitudes de los depósitos entre Los Espejos, Chaitén (2008–2009) y Cordón Caulle (2011–2012), junto con la actividad sísmica episódica y un levantamiento superficial de 20 – 30 cm por año (Cardona et al., 2018; Le Mevel et al., 2021) en el Complejo volcánico Laguna del Maule (LdM), se confirma la posibilidad de una erupción volcánica. Esta erupción estaría caracterizada por una fase explosiva inicial de tipo Pliniana, seguida por un flujo de lava, con una transición gradual entre las fases. Además, la actividad eruptiva de LdM ha aumentado en frecuencia durante el Holoceno (Andersen et al., 2017, 2018), lo que hace necesario realizar evaluaciones del peligro volcánico y desarrollar planes de contingencia. Estos deben tener en cuenta las características de una futura erupción con transición gradual de fase explosiva a efusiva, que pueda aplicarse a otras erupciones riolíticas. Sin embargo, considerando la ubicación geográfica de LdM, el principal peligro radica en la dispersión de tefra hacia el este, lo que podría afectar la carretera internacional y áreas de Argentina.

### **7. Conclusión.**

La erupción de Los espejos se caracteriza como pliniana a efusiva, se sustenta por la fracción creciente de piroclastos de obsidianas y las texturas de las burbujas que indican cizallamiento y coalescencia, con lo cual se infiere una densificación y desgasificación más eficiente del magma, promoviendo la transición gradual. Estas características indican que tanto el cizalle como la tasa de descompresión del magma fueron los factores que gobernaron la dinámica eruptiva de Los Espejos. Aunque se utilizó el modelo de Toramaru (2006) para estimar la tasa de descompresión del magma y obtuvieron valores que concuerdan con otras erupciones plinianas, se destaca que estos valores deben ser manejados con cautela debido a la sensibilidad del modelo a las variaciones de temperatura y la falta de validación para tasas de descompresión superiores a 10 MPa/s en eventos eruptivos plinianos.

El análisis textural, tanto cualitativo como cuantitativo (*BND* y *BSD*), de las burbujas en los piroclastos juveniles de *r/e* permite la reconstrucción temporal de la dinámica eruptiva, siendo un complemento de la tefroestratigrafía y respaldando la hipótesis de una transición gradual en la erupción de Los Espejos. Esta metodología podría ser aplicable a otras erupciones volcánicas silícicas, proporcionando información valiosa sobre la dinámica eruptiva.

En conclusión, la combinación de técnicas como tefroestratigrafía y análisis textural de piroclastos ofrece una comprensión más completa de la evolución de eventos eruptivos, permitiendo la identificación de transiciones graduales en la dinámica eruptiva. Este conocimiento es esencial para evaluar riesgos volcánicos y desarrollar estrategias de mitigación adaptadas a las características específicas de cada erupción, contribuyendo así a una gestión más efectiva de los eventos volcánicos y a la seguridad de las comunidades.

## 8. Referencias

- Alfano, F.; Bonadonna, C; Gurioli, L. Insights into eruption dynamics from textural analysis: the case of the May 2008, Chaitén eruption. *Bull Volcanol* **74**, 2095–2108 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0648-3>
- Andersen, N., Singer, B. S., Jicha, B. R., Beard, B. L., Johnson, C. M., & Licciardi, J. M. (2017). Pleistocene to holocene growth of a large upper crustal rhyolitic magma reservoir beneath the active Laguna del Maule Volcanic Field, central Chile. *Journal of Petrology*, *58*(1), 85–114. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx006>
- Cáceres Acevedo, F. (2016). Magma storage conditions and eruptive dynamics of post-glacial effusive volcanism at Laguna del Maule Volcanic field. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140208>
- Cáceres, F., Castruccio, Á., & Parada, M. A. (2018). Morphology, effusion rates, and petrology of postglacial lavas of Laguna del Maule Volcanic Field, Chilean Andes, and implications for their plumbing system. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, *19*(12), 4925–4944. <https://doi.org/10.1029/2018gc007817>.
- Cassidy, M.; Manga, M.; Cashman, K. et al. Controls on explosive–effusive volcanic eruption styles. *Nat Commun* **9**, 2839 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05293-3>.
- Contreras-Hidalgo, C. (24 Mar 2020) Silicic Eruptive Transitions of Laguna del Maule. University of Bristol, School of Earth Sciences, Bristol Doctoral College.
- Contreras, C.; Cashman, K.; Rust, A.; Cortés, M. The Influence of Magma Storage and Ascent Conditions on Laguna del Maule Rhyolite Eruptions, *Journal of Petrology*, Volume 63, Issue 12, December 2022, egac121, <https://doi.org/10.1093/petrology/egac121>

- Cortés Navarrete, M. (2019). Transiciones eruptivas en Riolita las Nieblas, complejo volcánico Laguna del Maule, VII Región. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170208>
- Hildreth, W. (2021). Comparative rhyolite systems: Inferences from vent patterns and eruptive episodicities: Eastern California and Laguna del Maule. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020879. <https://doi.org/10.1029/2020JB020879>
- Hildreth, W.; Godoy, E.; Fierstein, J.; Singer, B.S. (2010). Laguna del Maule Volcanic Field: Eruptive history of a Quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the Andean rangecrest in central Chile.
- Houghton, B.; Carey, R.; Cashman, K.; Wilson, C.; Hobden, B.; Hammer, J. Diverse patterns of ascent, degassing, and eruption of rhyolite magma during the 1.8ka Taupo eruption, New Zealand: Evidence from clast vesicularity, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 195, Issue 1, 2010, Pages 31–47, ISSN 0377–0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.06.002>.
- Lockwood, J.; Hazlett, R. (2011). Volcanoes—Global Perspectives. *Bulletin of Volcanology*. 73. 631–632. 10.1007/s00445–011–0479–7.
- Rotella, M.; Wilson, C.; Barker, S. *et al.* Highly vesicular pumice generated by buoyant detachment of magma in subaqueous volcanism. *Nature Geosci* 6, 129–132 (2013). <https://doi.org/10.1038/ngeo1709>
- Rotella, M.; Wilson, C.; Barker, S.; Schipper, I.; Wright, I.; Wysoczanski, R. (2015). Dynamics of deep submarine silicic explosive eruptions in the Kermadec arc, as reflected in pumice vesicularity textures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 301. 314–332. 10.1016/j.jvolgeores.2015.05.021.

- Rotella, M.D.; Wilson, C.J.N.; Barker, S.J. *et al.* Bubble development in explosive silicic eruptions: insights from pyroclast vesicularity textures from Raoul volcano (Kermadec arc). *Bull Volcanol* **76**, 826 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0826-6>
- Rust, A.C.; Cashman, K.V. Multiple origins of obsidian pyroclasts and implications for changes in the dynamics of the 1300 B.P. eruption of Newberry Volcano, USA. *Bull Volcanol* **69**, 825–845 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0111-4>
- Schipper, C. I.; Castro, J. M.; Tuffen, H.; James, M. R.; How, P. “Shallow vent architecture during hybrid explosive–effusive activity at Cordón Caulle (Chile, 2011–12): Evidence from direct observations and pyroclast textures”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 262, pp. 25–37, 2013. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.06.005.
- Schipper, C. Ian; Castro, J.; Tuffen, H.; James M.; How P. Shallow vent architecture during hybrid explosive–effusive activity at Cordón Caulle (Chile, 2011–12): Evidence from direct observations and pyroclast textures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Elsevier, 2013, 262, pp.25–37.
- Shea, T.; Houghton, B.; Gurioli, L.; Cashman, K.; Hammer, J.; Hobden, B. (2010). Textural studies of vesicles in volcanic rocks: An integrated methodology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 190. 271–289. 10.1016/j.jvolgeores.2009.12.003.
- Stasiuk, M.; Barclay, J.; Carroll, M. *et al.* Degassing during magma ascent in the Mule Creek vent (USA). *Bull Volcanol* **58**, 117–130 (1996). <https://doi.org/10.1007/s004450050130>
- Toramaru, A. (2006). *BND* (bubble number density) decompression rate meter for explosive volcanic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 154. 303–316. 10.1016/j.jvolgeores.2006.03.027.
- Wright, H.; Weinberg, R. (2009). Strain localization in vesicular magma: Implications for rheology and fragmentation. *Geology*. 37. 1023–1026. 10.1130/G30199A.1.

## Anexos

### Anexo 1

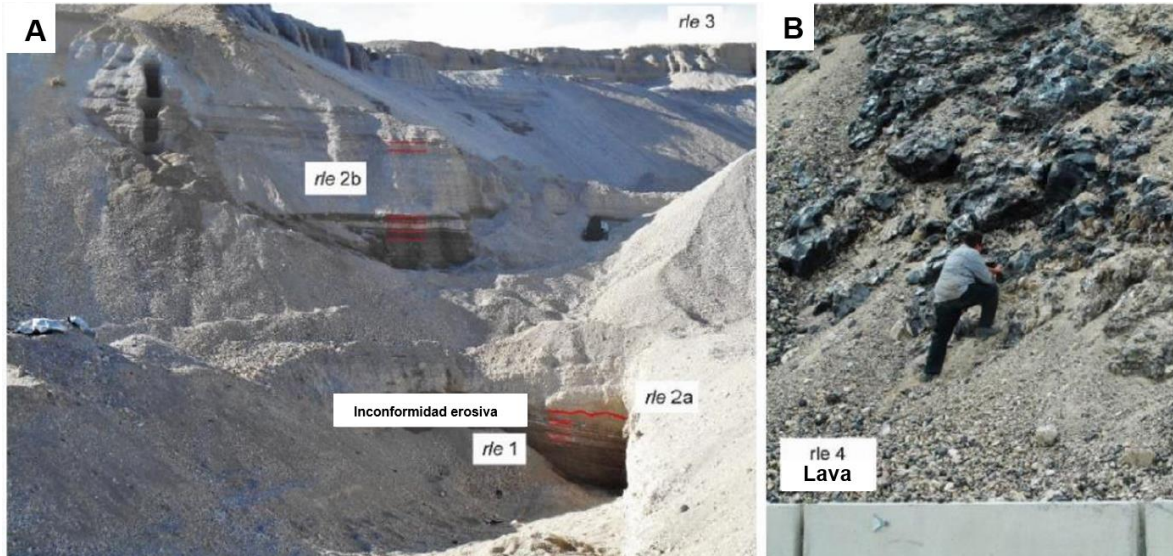
Tabla de erupciones, modificada del sistema Lacroix de clasificación del comportamiento eruptivo (Lockwood y Hazlett, 2013). Modificado de Cortés, 2019.

| Tipo de erupción         | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hawaianas                | Erupciones efusivas de lava. Principalmente de composición basáltica. Asociada a la construcción de volcanes de escudo. IEV = 0-2.                                                                                                                                                            |
| Estrombolianas           | Erupciones moderadamente explosivas produce bombas y cenizas. Típicamente de composición basáltica y andesítica. IEV = 1-3.                                                                                                                                                                   |
| Vulcaniana               | Expulsión moderada a violenta de fragmentos sólidos de roca fría (ultravulcaniana), o de lava sólida recientemente endurecida (vulcana ordinaria). Se producen grandes cantidades de ceniza. Tiene cualquier tipo de composición, pero no a menudo basáltica. IEV = 2-5.                      |
| Pliniana                 | Erupción altamente violenta, genera grandes cantidades de pómez y ceniza. Las columnas eruptivas pueden ser de 20-55 km, inyectando grandes cantidades de agua y aerosoles de azufre en la atmósfera. IEV = 4-8.                                                                              |
| Subpliniana              | Las erupciones subplinianas generalmente consisten en eventos discontinuos de menor volumen e intensidad que las erupciones Plinianas. La columna eruptiva alcanza una altura menor a 20 km y están asociada a la formación de domos y flujos piroclásticos.                                  |
| Formadores de ignimbrita | Denominado Super-erupciones se define como, una erupción capaz de emitir una masa de magma igual o mayor a $1 \times 10^{15}$ kg (volumen de ~450 km <sup>3</sup> de roca densa). Se asocian a erupciones explosivas que se desarrollan relativamente en un corto periodo de tiempo. IEV = 8. |

## Anexo 2

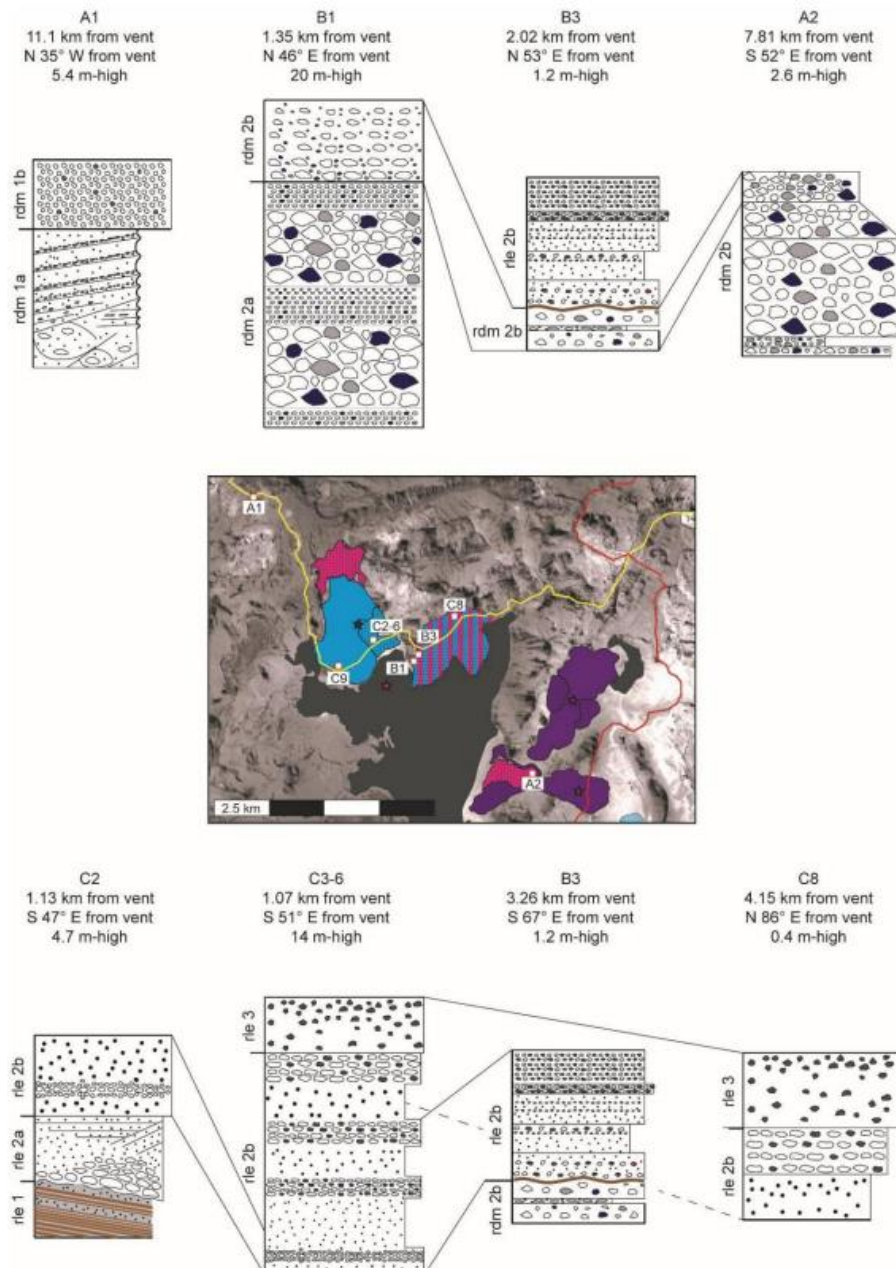
Vistas generales de las estaciones estratigráficas (Contreras-Hidalgo, 2020).

- A) Vista general los depósitos piroclásticos (estaciones C2– 5).
- B) Frente del flujo de lava *rle* (estación C9). Las líneas rojas más gruesas representan contactos entre unidades estratigráficas del mismo evento, mientras que las líneas rojas más delgadas representan algunas capas.



## Columnas estratigráficas y correlación entre estaciones estratigráficas (Contreras-Hidalgo, 2020).

La distancia y orientación desde el respiradero y la altura del depósito se indican en cada columna estratigráfica. La altura de los depósitos no es proporcional para permitir una mejor visualización. Las notaciones A1 B1 B3 A2 C2 C3-6 B3 C8 corresponde a las estaciones estratigráficas usadas en el trabajo de Contreras-Hidalgo, 2020. De color celeste se encuentra la riolita Los Espejos.



**Componentes principales encontradas en campo por Contreras-Hidalgo, 2020.**

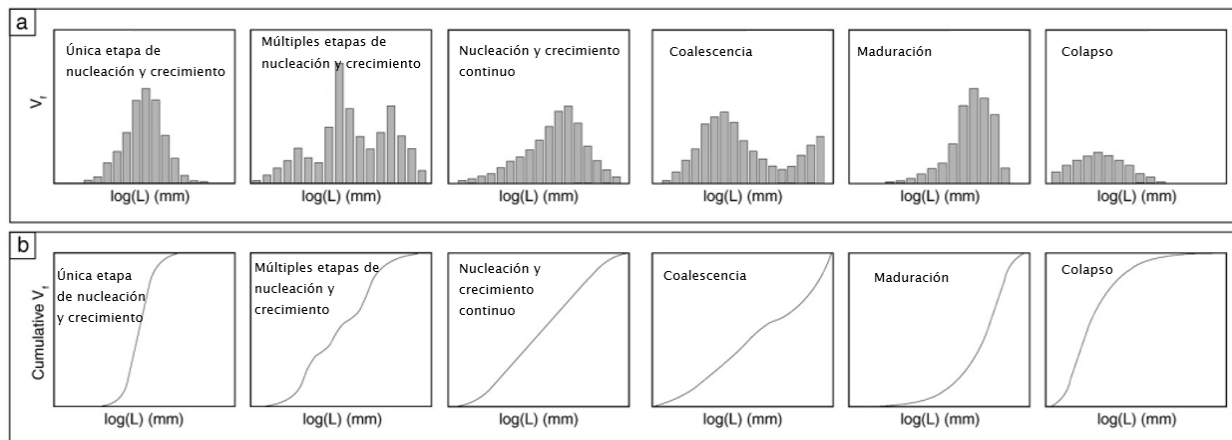
- C) Cenizas a lapilli de una capa marrón del *r/e* 1.
- D) Líticas de lava alteradas y oxidadas del *r/e* 2b.
- E) Piedras pómez densas del depósito de caída del *r/e*.
- F) Ejemplos de obsidianas vesiculares del depósito de caída de *r/e*.
- G) Obsidianas en bandas del flujo de lava *r/e*.
- H) Obsidiana pómez procedente del flujo de lava *r/e*.



### Anexo 3

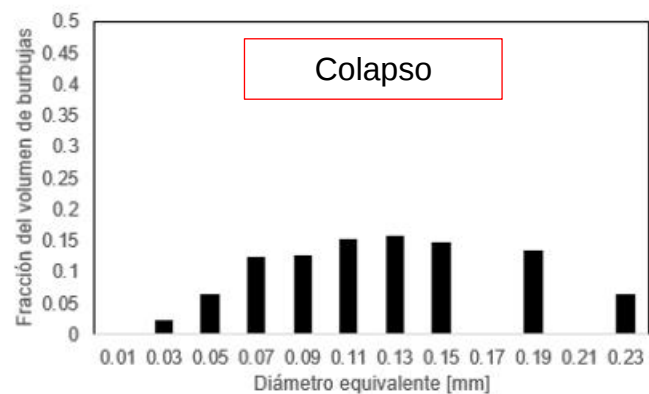
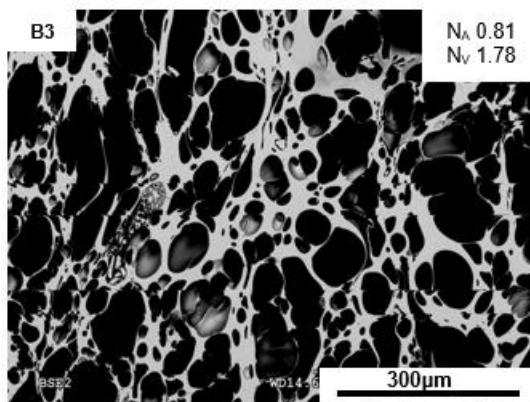
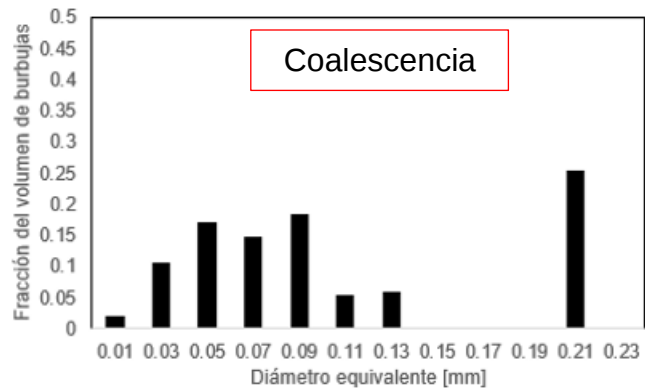
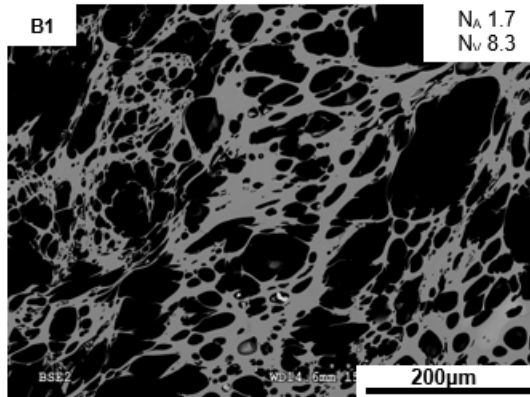
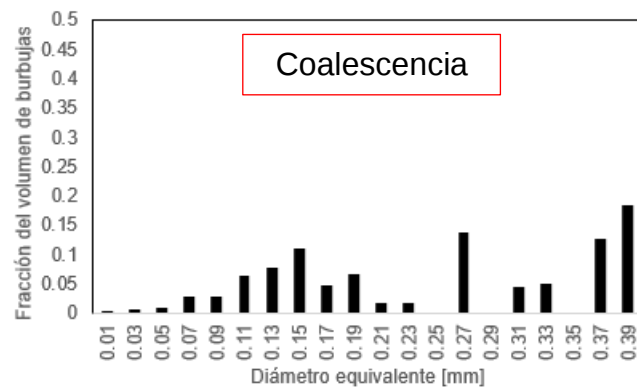
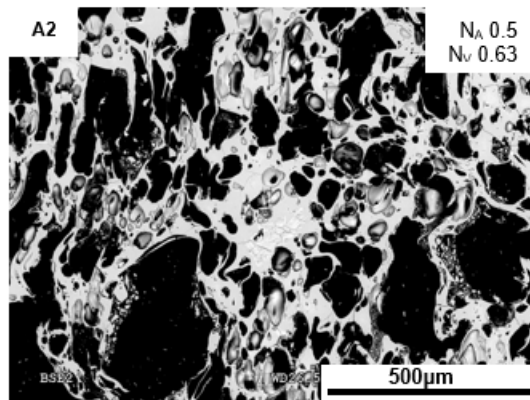
Tablas de formas de mostrar características texturales a través de gráficos de tamaño ( $L$  o diámetro equivalente) y densidad numérica ( $N$  o  $N_v$ ), y procesos con los que pueden estar asociados (eventos de nucleación único o pocos, nucleación múltiple, crecimiento, coalescencia, maduración y colapso). **(a)** Distribución de tamaño de fracción de volumen simple ( $V_f$ ) ( $VVD$ ), **(b)** distribución de tamaño de fracción de volumen acumulada. ( $CVVD$ ). Extraído de Shea et al. 2010.

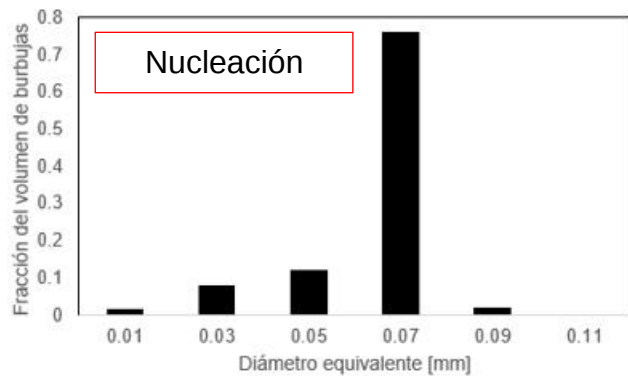
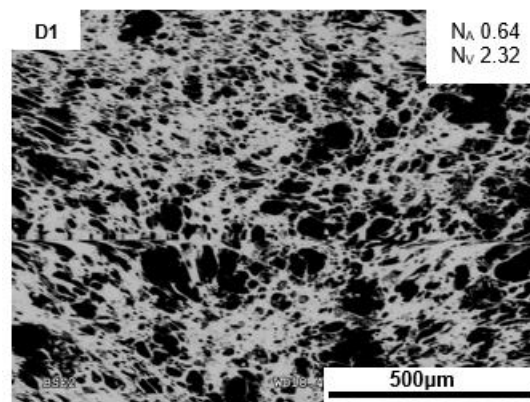
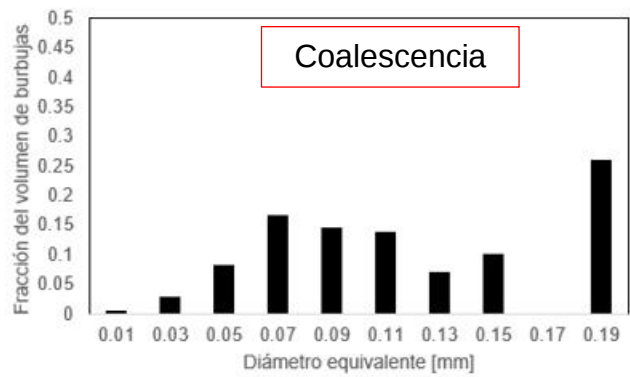
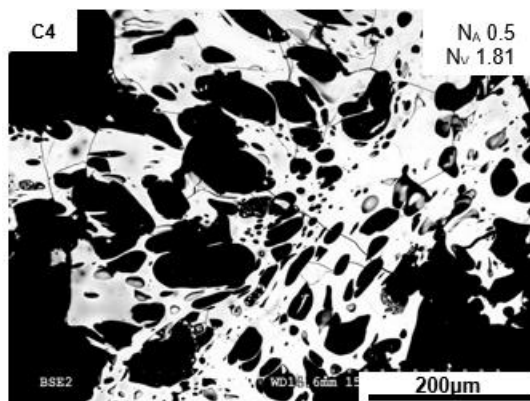
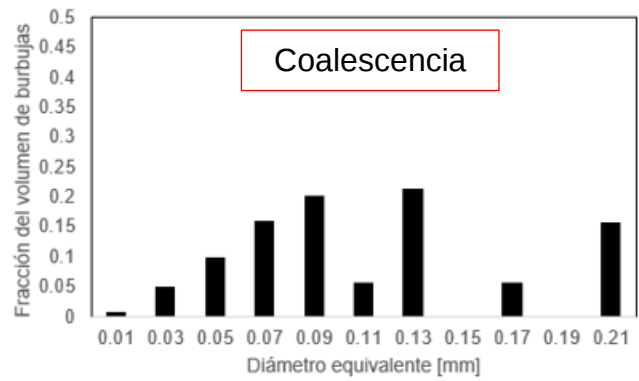
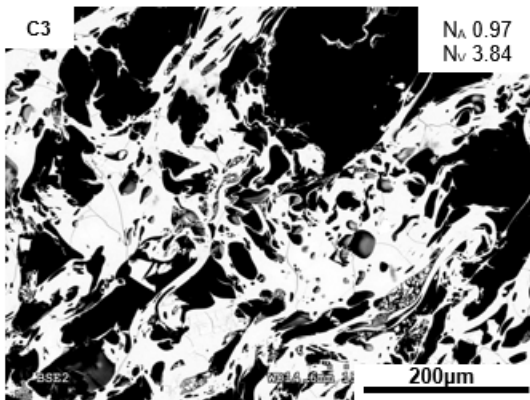
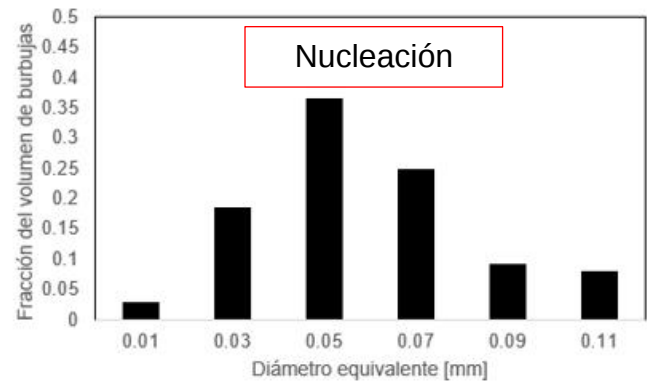
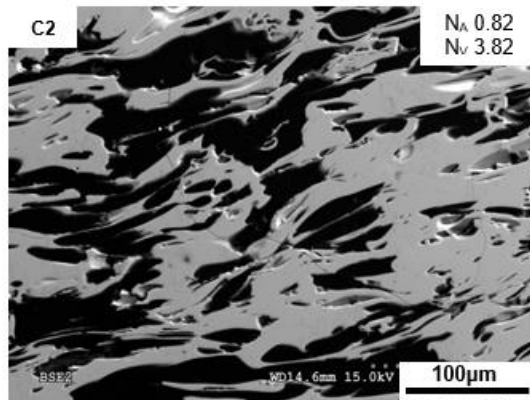
Normalmente, cada modo se interpreta para ilustrar un pulso distinto de nucleación y crecimiento (Klug et al., 2001; Houghton, 2007), la coalescencia tiende a sesgar los datos positivamente o incluso producir un modo distinto más grande (Adams et al., 2006), la maduración produce una asimetría negativa (Mangan y Cashman, 1996) y el colapso de las burbujas reduce drásticamente el total de vesículas, fracción de volumen y tamaño modal (Shea et al., 2010).

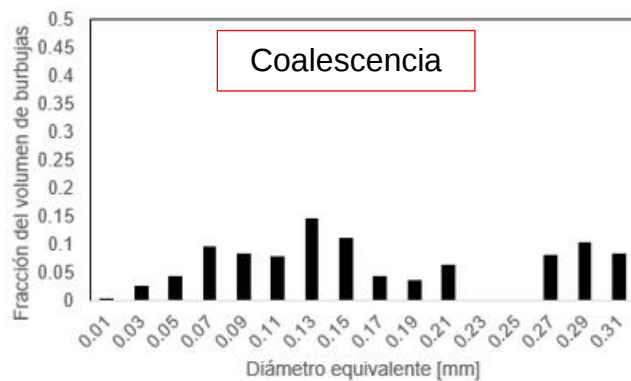
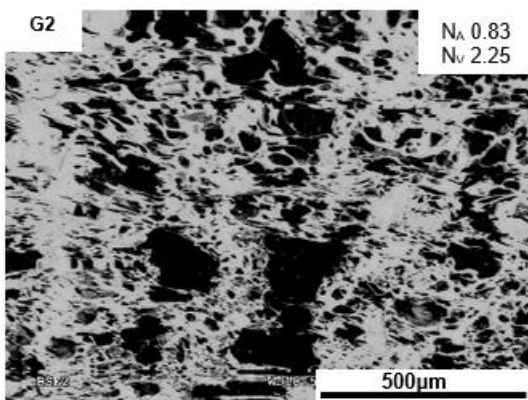
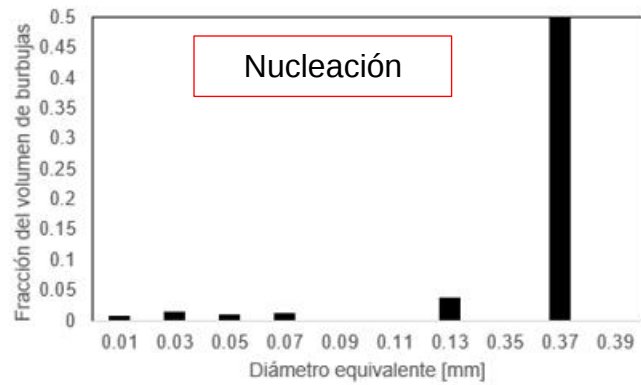
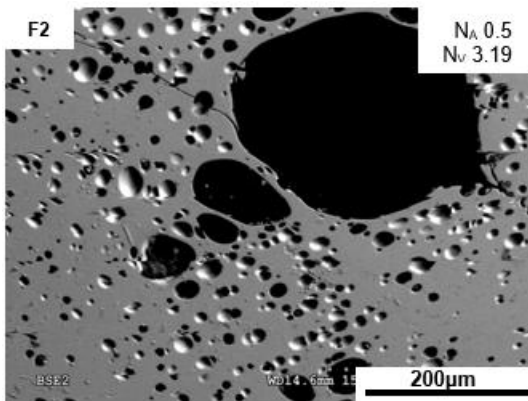
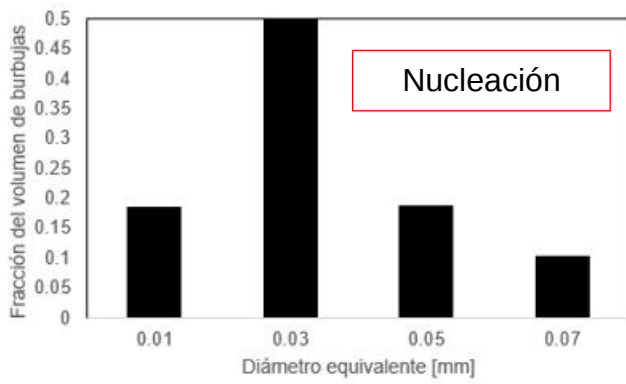
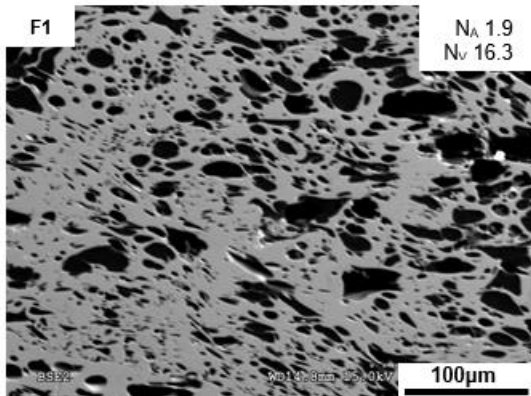
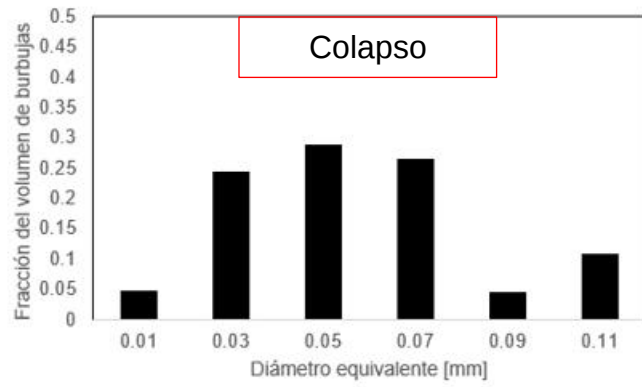
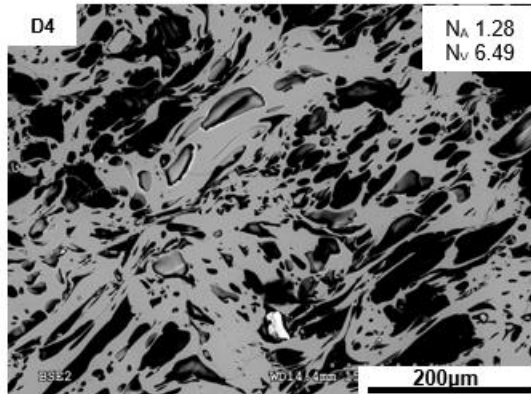


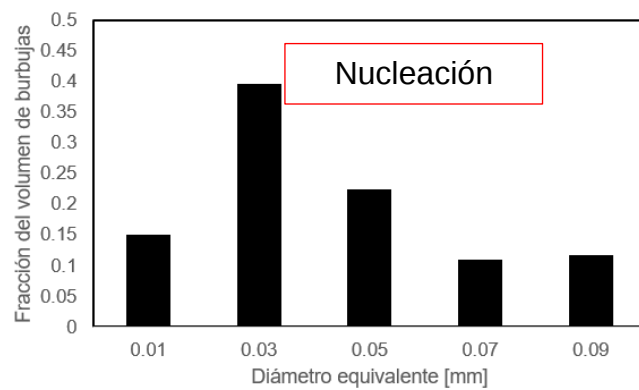
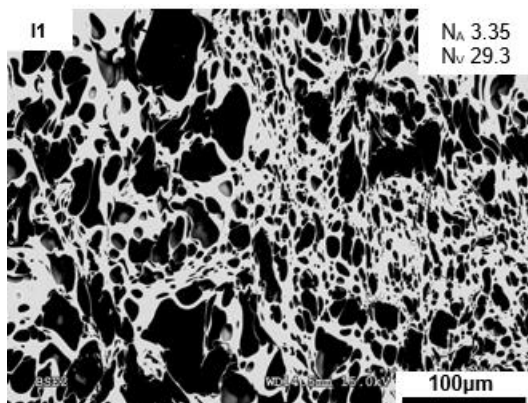
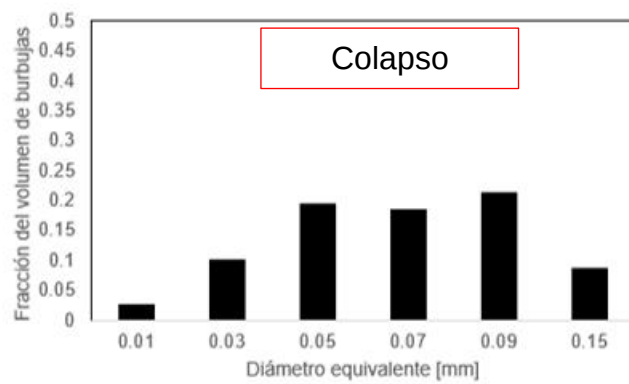
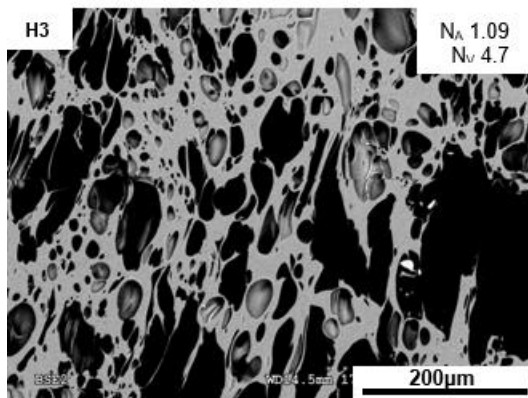
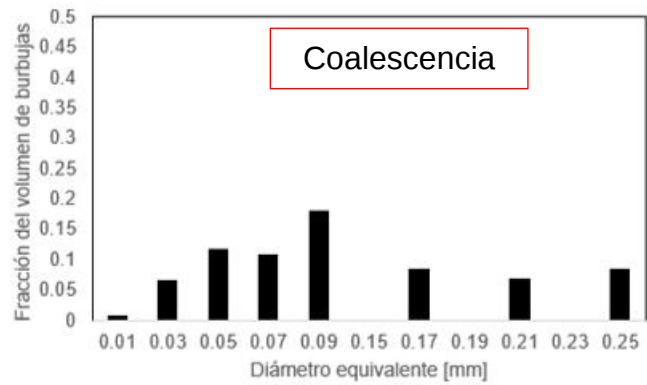
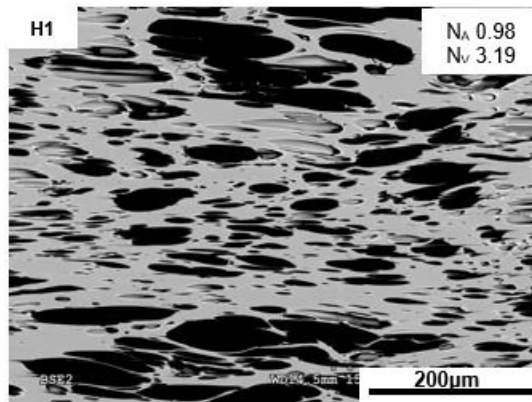
## Anexo 4

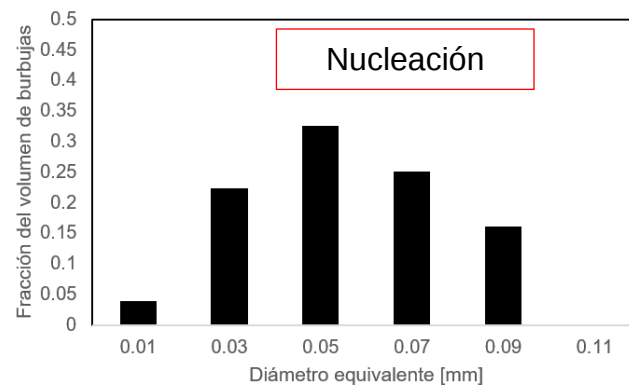
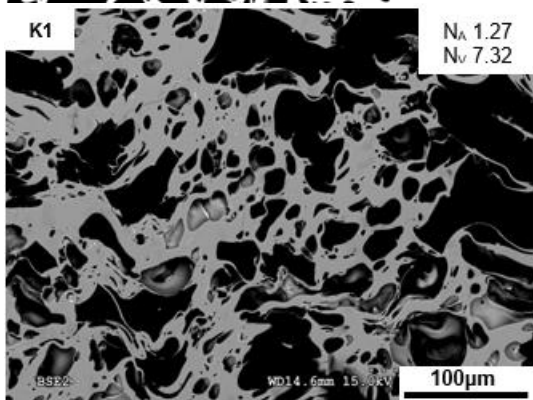
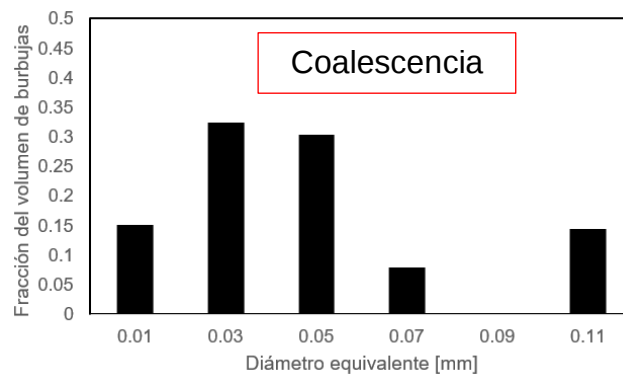
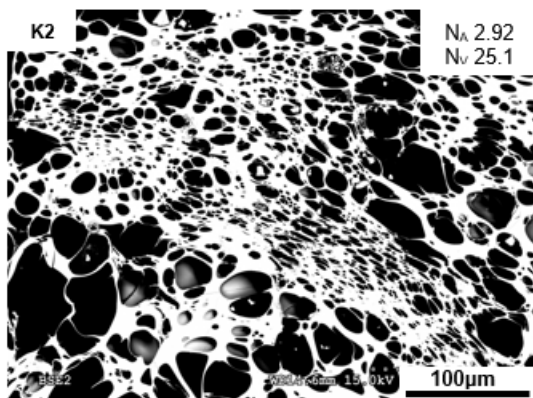
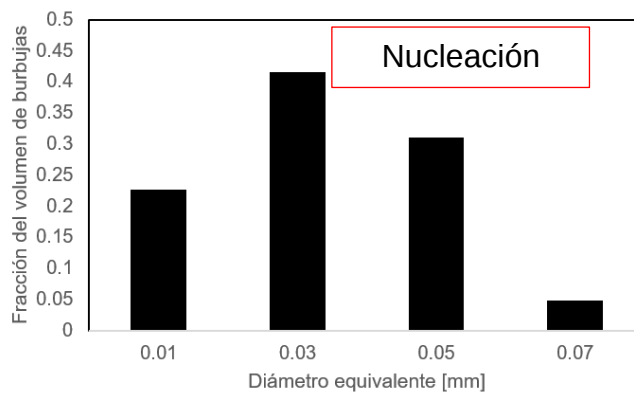
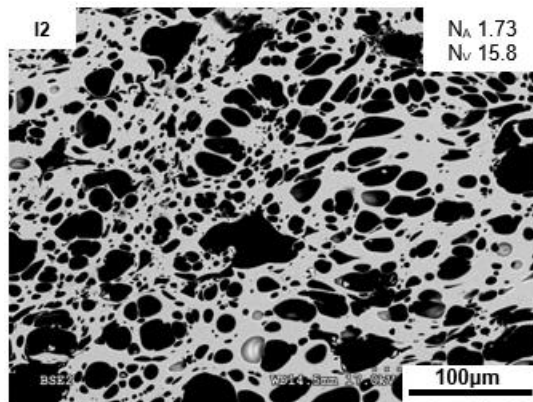
Distribución de tamaño de fracción de volumen simple (V o Vf) (VVD). Muestras estudiadas desde A2 (Techo) hasta K2 (Base) con sus respectivas densidades numéricas en  $N_A$  y  $N_V$ , se incluye la distribución del tamaño de burbujas (*BSD*) en razón de la fracción del volumen de burbujas versus el diámetro equivalente [mm]. Los valores de  $N_A$  están presentados en  $\times 10^3 \text{ mm}^{-2}$  y los valores de  $N_V$  están en  $\times 10^4 \text{ mm}^{-3}$ .





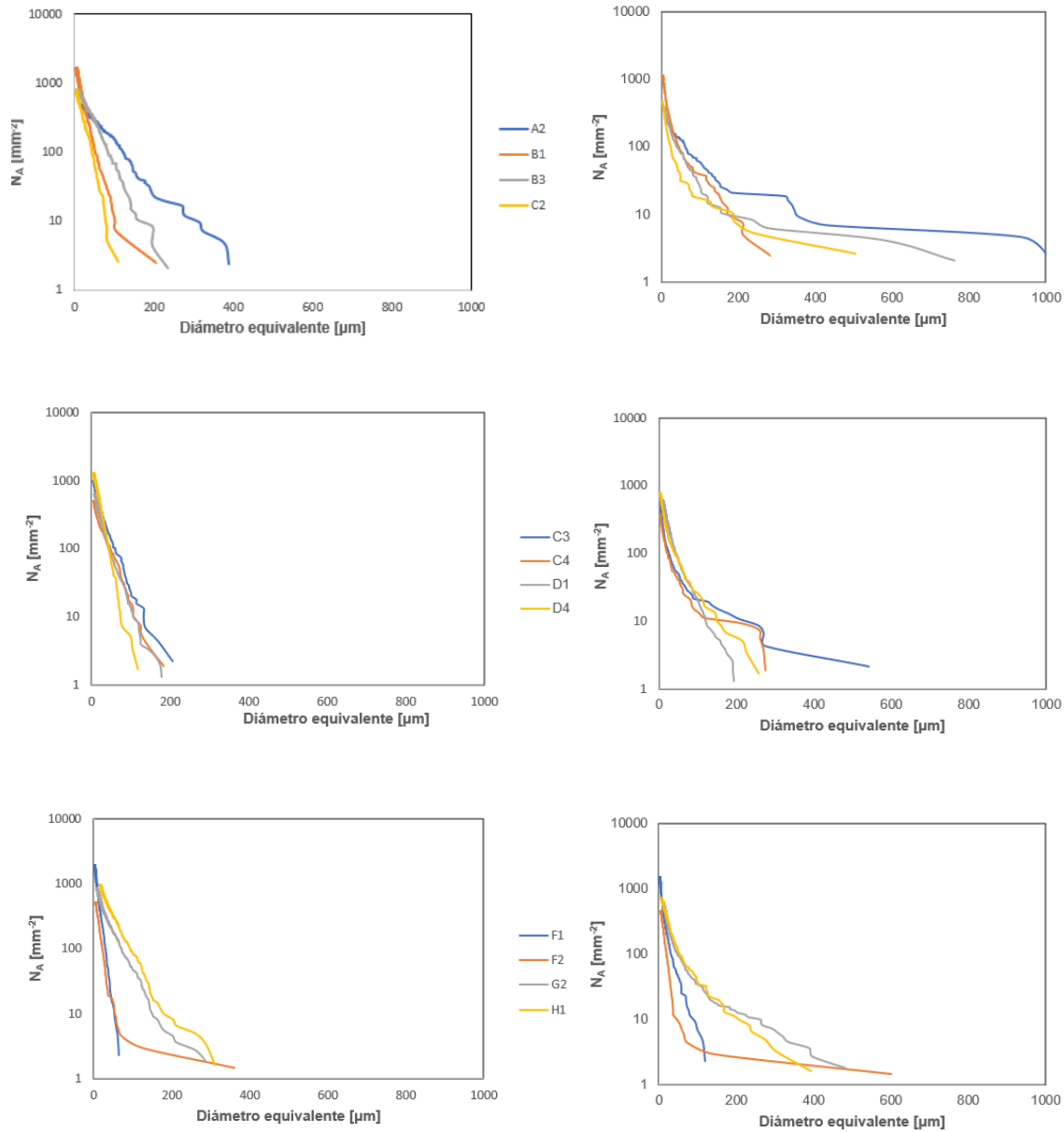


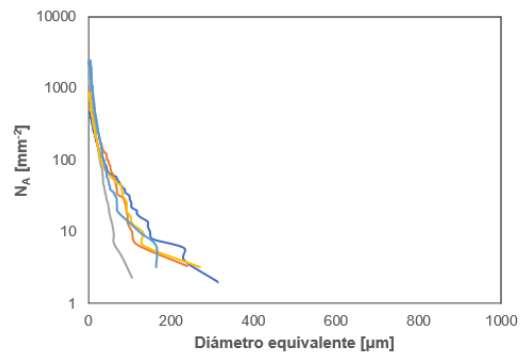
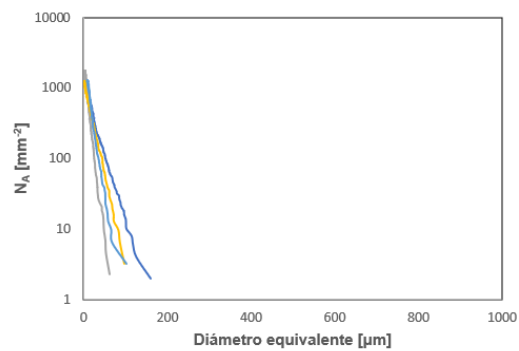




## Anexo 5

Graficas de distribución de tamaño de burbujas (*BSD*) representadas en forma de número acumulativo decreciente de burbujas por unidad de área de vidrio (densidad numérica) o Distribución de tamaño de fracción de área acumulado (CAAD), a la izquierda post segmentación y a la derecha previa segmentación.





## Anexo 6

Distribución de la elongación promedio de las burbujas de tamaño  $>20\text{ }\mu\text{m}$ , respecto a la secuencia estratigráfica.

