

## ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE CENIZAS VOLCÁNICAS POR MICROSCOPIA HOLOGRÁFICA DIGITAL

### MORPHOMETRIC ANALYSIS OF VULCANIC ASHES BY DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY

M. F. Martínez<sup>\*1,2</sup>, A. C. Monaldi<sup>1,2</sup>, G. G. Romero<sup>1,2</sup>, A. V. Blanc<sup>2</sup>, and W. A. Báez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta,  
Av. Bolivia 5150 (A4400), Salta, Argentina.

<sup>2</sup>INENCO (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional) - CONICET,  
Av. Bolivia 5150 (A4408FVY), Salta, Argentina.

<sup>3</sup> IBIGEO (Instituto de Bio y Geociencias del NOA) - CONICET  
Av. 9 de julio 14 (A4405BBA), Rosario de Lerma, Salta, Argentina.

Recibido: 28/02/2020; Aceptado: 31/03/2020

Las cenizas volcánicas presentan formas, texturas y tamaños altamente irregulares. Estas características influyen en su comportamiento aerodinámico, velocidad de sedimentación y dispersión, distancias de desplazamiento, etc. En particular, su morfología brinda información sobre los mecanismos de fragmentación que ocurren durante una erupción, distintos estilos eruptivos, propiedades del magma y es una herramienta de gran utilidad para el modelado de plumas volcánicas. En este trabajo se aborda el estudio morfológico de cenizas volcánicas empleando microscopía holográfica digital. A partir del cálculo de parámetros de tamaño y forma, se lleva a cabo una caracterización morfológico-textural y granulométrica en dos y tres dimensiones de las muestras y una clasificación según el mecanismo de fragmentación del proceso eruptivo.

*Palabras clave:* cenizas, microscopía holográfica digital, caracterización morfológico-textural.

Volcanic ashes features, such as their shapes, textures and sizes, influence their aerodynamic behavior, travel distances, sedimentation and dispersion rates. In particular, their morphology provides information about the fragmentation mechanisms during an eruption, different eruptive styles, magma properties and also is a valuable tool for modeling volcanic plumes. In this work, digital holographic microscopy is used in order to perform a morphological analysis of ashes. A morphological, textural and granulometric 2D and 3D characterization is developed through the calculation of shape and size parameters along with a classification according to the fragmentation mechanism of the eruptive process.

*Keywords:* ashes, digital holographic microscopy, morphological and textural characterization.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2020.31.1.23>

 ISSN 1850-1168 (online)

## I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la geología, el estudio morfológico de cenizas volcánicas ha adquirido gran interés en los últimos tiempos. La forma de las cenizas se ha vinculado a los mecanismos de fragmentación involucrados durante una erupción, además de regir su comportamiento aerodinámico permitiendo comprender y pronosticar tanto la dispersión como la formación de depósitos piroclásticos [1]. Si bien tradicionalmente este tipo de análisis se realizaba visualmente mediante descripciones cualitativas, en la actualidad existen diversas técnicas que permiten realizar una caracterización morfológica cuantitativa. Sin embargo, a pesar de la gran variedad que las cenizas presentan en cuanto a textura, tamaño y morfología en tres dimensiones, la mayoría de las técnicas se encuentran limitadas a su estudio bidimensional. Para ello, se emplea la proyección de las partículas sobre algún plano determinado, en el que se calculan diversos parámetros morfológicos y texturales [2-4]. En los análisis granulométricos, por ejemplo, las cenizas son modeladas como

partículas esféricas [5], pero utilizando radios equivalentes que surgen de aproximaciones bidimensionales e ignoran el aspecto tridimensional. Aunque estas determinaciones resultan útiles para modelar el comportamiento de las partículas, pueden introducir sobreestimaciones o subestimaciones en cuanto a su tamaño, forma y demás características físicas [6, 7].

Para este tipo de estudios se utilizan, usualmente, imágenes obtenidas mediante microscopía SEM, microscopios de barrido, JEOL, analizadores de Tamaño de Partículas [2], analizadores de forma dinámicos (PSds) [3]. Típicamente, los costos involucrados son elevados y/o las muestras necesitan de una meticulosa preparación previa.

La tomografía micro-computada o SEM Micro-CT permite obtener resultados tridimensionales con una gran resolución, analizar cenizas de tamaños muy pequeños (~ 3,5 μm de diámetro) y reconstruir sus características [8]. Además, permite obtener valores de parámetros analizados bidimensionalmente, para cuantificar los distintos aspectos de forma de las cenizas. No obstante, la adquisición de los instrumentos necesarios y las complejidades de proce-

\* flormkn@gmail.com

samiento limitan el análisis a un número muy reducido de partículas individuales.

En este trabajo se propone utilizar la Microscopía Holográfica Digital (MHD) junto con herramientas de procesamiento digital de imágenes (PDI) para realizar una caracterización granulométrica (en tamaño) y morfológico-textural de las cenizas, tanto en dos como en tres dimensiones. En las últimas dos décadas, la MHD se ha convertido en una herramienta muy valiosa dentro de la microscopía, con numerosas aplicaciones en diferentes campos de la ciencia [9]. En particular, presenta un alto potencial para la caracterización de cenizas volcánicas, ya que, mediante un arreglo interferométrico simple, se puede registrar las variaciones de fase de la luz que ilumina la muestra, y luego traducirse a características tridimensionales del objeto de estudio. En este trabajo, se utiliza un microscopio holográfico digital por transmisión para el análisis morfológico bi y tridimensional de trizas vítreas, cenizas transparentes o traslúcidas que conservan sus características físicas a medida que se desplazan a grandes distancias desde el volcán. A partir de los mapas de fase, se calculan parámetros de tamaño y forma bidimensionales y se definen y computan parámetros tridimensionales. Adicionalmente, se utiliza la información aportada por los parámetros bidimensionales para realizar una clasificación de las cenizas según el proceso de fragmentación, en Magmáticas o Freatomagmáticas y en Dúctil o Frágil [10-12].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### Las muestras

El presente estudio se realiza con trizas vítreas obtenidas de muestras de cenizas volcánicas colectadas de diferentes zonas del noroeste argentino. Se analizan un total de 6 muestras provistas por investigadores de GEONORTE – IBIGEO. Las muestras 1, 2, 3 y 4 fueron tomadas de los valles de Tafí y Santa María y están asociadas a diferentes centros volcánicos ubicados 300 km hacia el este, en el extremo sur de la Puna Catamarqueña [13]. Las muestras 5 y 6 pertenecen a la erupción freatoplina asociada al centro volcánico Tocomar [14] ubicado en las inmediaciones de San Antonio de los Cobres, provincia de Salta.

Para el registro de un holograma, se coloca en un recipiente una pequeña cantidad de cenizas y una gota de glicerina, se mezcla la preparación y, finalmente, se coloca una fracción de la misma sobre un portaobjetos, y se la cubre con un cubreobjetos.

### Microscopía Holográfica Digital

La MHD ha sido ampliamente descrita en la literatura. En esencia, es una técnica óptica no-invasiva que permite recuperar información cuantitativa de los cambios en la fase de la luz al atravesar o reflejarse en una muestra microscópica. Las variaciones de espesor y/o índices de refracción de la muestra alteran la fase de la luz que la ilumina.

Tal como sucede en holografía digital, la técnica MHD consiste en 2 procesos: registro y reconstrucción de un holograma digital. El registro del holograma se realiza utilizando un microscopio holográfico digital, con el cual se registra, en el sensor de una cámara digital, la interferencia de dos haces: un haz objeto que atraviesa o es reflejado por la

muestra, modificando sus propiedades ópticas (amplitud y fase), y un haz de referencia. La luz que emerge de la muestra es colectada por un objetivo de microscopio OM para formar una imagen real y magnificada en un plano que puede coincidir o no con el del sensor de la cámara. En la Fig. 1 se muestra un esquema del dispositivo experimental empleado para registrar hologramas de muestras transparentes, como las trizas del presente estudio. Básicamente, se trata de un interferómetro de Mach-Zehnder con geometría fuera de eje e iluminado con un láser de He-Ne de 10 mW. El holograma se registra en un sensor CMOS Array Bayer monocromo de  $2592 \times 1944 \text{ pix}^2$  de  $1,75 \mu\text{m}$  de lado y se utilizan OM de 20X para lograr los aumentos deseados.

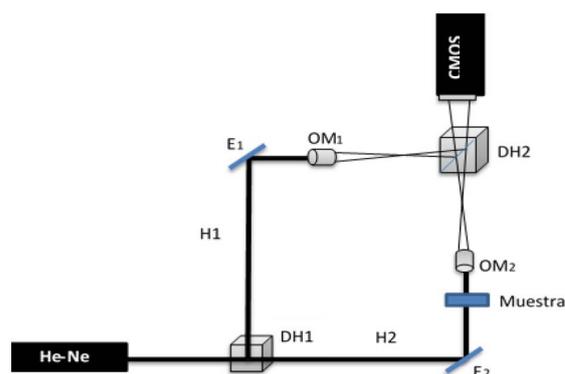


FIG. 1: Esquema de un Microscopio Holográfico Digital. DH: Divisor de haz, E: espejo, OM: Objetivo de microscopio, H1: haz de Referencia, H2: Haz Objeto.

A modo de ejemplo, se muestra en la Fig. 2 la fotografía de una triza vítrea tomada por microscopía convencional y su correspondiente holograma digital.

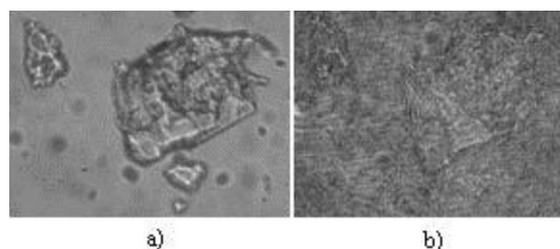


FIG. 2: (a) Fotografía tomada con luz blanca. (b) Holograma de la ceniza.

Luego, el holograma se reconstruye numéricamente, propagando el Espectro Angular de la luz desde el plano del holograma (plano de la cámara) al plano imagen (donde forma la imagen el OM), siguiendo los fundamentos de la teoría escalar de la difracción [15]. Como resultado, se obtiene una matriz de números complejos conocida como frente de onda reconstruido, a partir del cual se calculan un mapa de amplitudes y un mapa de fases. Este mapa presenta saltos de fase (discontinuidades) entre  $(-\pi, \pi)$ , por lo cual se aplica un método de Desenvolvimiento de Fase para lograr un Mapa de Fase continuo. En la Fig. 4(b) se muestra el mapa desenvuelto de la ceniza de la Fig. 2. Este último contiene la información de interés de la muestra. Para cada píxel  $ij$ , el retardo de fase neto  $\Phi_{ij}$  que sufre la luz se relaciona con las variaciones de índice de refracción y/o espesor de la

muestra mediante:

$$\Phi_{ij} = \frac{2\pi}{\lambda} [(n_c - n_g)h_{ij}], \quad (1)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de onda del láser;  $n_c$  el índice de refracción de la ceniza y  $n_g$  el del medio montante, la glicerina;  $h_{ij}$  el espesor de la ceniza en el píxel  $ij$  (ver Fig. 3).

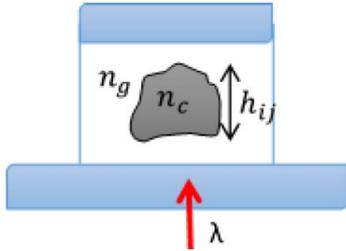


FIG. 3: Esquema de la muestra.

Si se conoce el índice de refracción de la ceniza y de la glicerina, del mapa de fases puede obtenerse un mapa de espesores con la información cuantitativa de las variaciones de espesor en cada punto  $h_{ij}$ .

### Mapa de espesores

La composición de las cenizas volcánicas varía de un volcán a otro y de ceniza a ceniza. De cualquier modo, la composición no es uniforme, por lo que el índice de refracción tampoco. Sin embargo, en el ámbito de la geología suelen realizarse aproximaciones de acuerdo a la composición estimada. Esto permite estimar distribución de tamaños en estudios granulométricos.

Para el presente estudio, se utiliza un índice de refracción promedio para toda la ceniza. Si bien esta aproximación no permite conocer el espesor real de la ceniza punto a punto, brindará información de espesores “efectivos”.

Así, el mapa de espesores efectivos puede obtenerse a partir de la Ec. (1) mediante:

$$h_{ij} = \frac{\lambda}{2\pi(n_c - n_g)} \Phi_{ij} \quad (2)$$

### Segmentación de la información

Para poder realizar una caracterización morfológica de las cenizas, resulta necesario separar la información de interés (la ceniza) del fondo en las imágenes. Al observar la Fig. 2(a), se advierte que, al ser las cenizas transparentes, las imágenes obtenidas por microscopía de campo brillante presentan variaciones en niveles de gris similares dentro de la ceniza respecto del fondo. Adicionalmente, la forma irregular de la partícula ocasiona zonas aleatorias de sombra, lo cual dificulta la segmentación por algoritmos computacionales. Por el contrario, al observar el correspondiente mapa de fase en la Fig. 4(b), se evidencia un alto contraste en niveles de gris entre el fondo de la imagen y la partícula de interés. Este hecho se aprovecha para realizar una segmentación de la ceniza mediante una simple umbralización asistida por computadora. Eligiendo convenientemente un umbral, se construye numéricamente una máscara binaria  $f_{BIN}(i, j)$  asignando el valor “cero” al fondo y “uno” a la región correspondiente a la ceniza:

$$f_{BIN}(i, j) = \begin{cases} 1 & i, j \text{ dentro de la ceniza} \\ 0 & \text{c.o.c.} \end{cases} \quad (3)$$

Esta máscara [Fig. 4(a)] se utiliza por sí sola para el cómputo de parámetros de tamaño y de forma bidimensionales (Ver Sección III). Además, al multiplicarla punto a punto por el mapa de fase [Fig. 4(b)] se obtiene la fase segmentada [Fig. 4(c)] que permite el cálculo de parámetros de tamaño y de forma tridimensionales cuando es convenientemente traducida a un mapa de espesores según la Ec. (2).

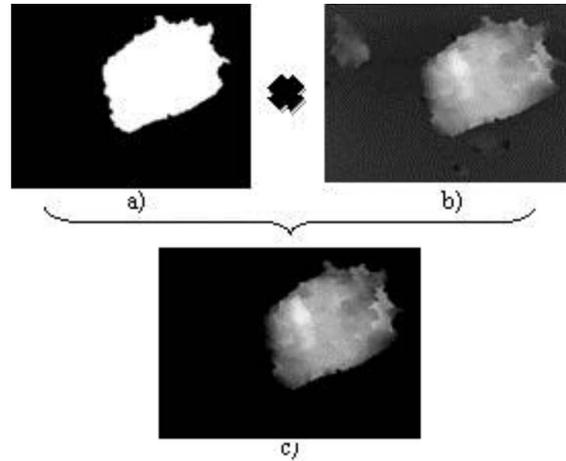


FIG. 4: (a) Máscara Binaria; (b) Mapa de Fases; (c) Mapa de Fases segmentado.

## III. CARACTERIZACIÓN 2D y 3D DE LAS MUESTRAS

Para estudios granulométricos es preciso definir parámetros que aporten información dimensional del tamaño de las partículas. Para esto, suelen emplearse diámetros o radios equivalentes que relacionan algunas propiedades geométricas de la partícula irregular con las de una esfera equivalente. En tanto, para caracterizaciones morfológicas, se utilizan parámetros adimensionales que surgen de la relación entre determinadas medidas dimensionales típicas (asociadas con el tamaño de la partícula) como ser, diámetros equivalentes, área proyectada, perímetro, etc. Estos parámetros permiten cuantificar las irregularidades comparando la forma de una partícula con formas estándar de referencia (por ejemplo, rectángulos y círculos).

En la literatura se han definido numerosos descriptores que brindan información bidimensional de la partícula [4, 5]. En particular, en este trabajo se calculan el área proyectada  $A_p$ , ancho  $w$ , largo  $l$ , perímetro  $P_p$ , que se obtienen empleando la máscara binaria definida previamente mediante software desarrollado *ad hoc*. Como contraparte 3D, a partir del mapa de espesores segmentado, se calculan volumen efectivo  $V_e$  y espesor efectivo máximo  $h_{max}$ . En la Tabla 1 se muestra un esquema en el cual se indican ilustrativamente cada uno de estos descriptores.

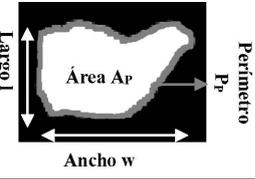
### Parámetros de tamaño

Para caracterizar el tamaño de las muestras en 2D se utiliza el *radio del círculo equivalente* ( $R_{Aeq}$ ) que surge de igualar el área de la ceniza  $A_p$  al área de un círculo de radio  $R_{Aeq}$ , esto es:

$$R_{Aeq} = \left( \frac{A_p}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

Donde  $A_P = \sum_{i,j \in f} f_{BIN}(i,j) \Delta x \Delta y$ , con  $\Delta x$  y  $\Delta y$  el tamaño del píxel de acuerdo al aumento del OM utilizado y  $f_{BIN}(i,j)$ , definida según la Ec. (3).

TABLA 1: Parámetros morfológicos.

ParámetroS 2D	Parámetros 3D
 <p>Diagrama de un píxel 2D con sus parámetros morfológicos: Área <math>A_P</math>, Perímetro <math>P_P</math>, Ancho <math>w</math>, Largo <math>l</math>.</p>	 <p>Diagrama de un píxel 3D con sus parámetros morfológicos: Volumen efectivo <math>V_e</math>, Espesor Máx. <math>h_{max}</math> (efectivo).</p>
<p>Elongación Feret:</p> $E_F = \frac{w^2}{A_P}$ <p>Compacticidad:</p> $Comp = \frac{A_P}{w.l}$	<p>Elongación Feret 3D:</p> $E_{F3D} = \frac{h_{max}^3}{V_e}$ <p>Compacticidad 3D:</p> $Comp_{3D} = \frac{V_e}{w.l.h_{max}}$

Similarmente, se define en el contexto de este trabajo el *radio de la esfera equivalente* ( $R_{Veq}$ ) que contempla la información 3D aportada por MHD y que se obtiene al igualar el volumen efectivo de la ceniza  $V_e$  con el volumen de una esfera de radio  $R_{Veq}$ :

$$R_{Veq} = \left( \frac{3}{4\pi} V_e \right)^{1/3} \quad (5)$$

Donde  $V_e = \sum_{i,j} h_{ij} \Delta x \Delta y$  con  $\Delta x$  y  $\Delta y$  el tamaño del píxel de acuerdo al aumento del OM utilizado y  $h_{ij}$  extraído del mapa de espesores segmentado.

#### Parámetros morfológicos

En general, la irregularidad morfológica de una partícula depende tanto de la forma como de la rugosidad, cada una de las cuales puede variar de manera independiente. De los numerosos parámetros definidos en la literatura, los parámetros morfológicos simples (PMS) comparan la forma de la partícula con una figura geométrica estándar y son sensibles a diferentes aspectos de la morfología, tales como nivel de elongación o rugosidad superficial. Éstos, a su vez, pueden combinarse para formar parámetros morfológicos compuestos (PMC), que brindan información más general de la irregularidad morfológica [5].

En este trabajo, a los fines de la caracterización morfológica 2D se han seleccionado los PMS compacticidad ( $Comp$ ) y elongación Feret ( $E_F$ ). La compacticidad es un parámetro de rugosidad morfológica e indica cuánto se asemeja la proyección bidimensional de la ceniza, a una forma rectangular (sus valores varían entre 0 y 1). Por su parte, la elongación Feret es un parámetro de forma e indica cuán alargada es la partícula.

Para la caracterización morfológica tridimensional, en este trabajo se han definido las contrapartes 3D de estos parámetros: compacticidad 3D ( $Comp_{3D}$ ) y elongación Feret 3D ( $E_{F3D}$ ). En la Tabla 1 se encuentran las ecuaciones necesarias para su cálculo, en función de los descriptores morfológicos 2D y 3D que pueden calcularse a partir de la máscara binaria y del mapa de espesores segmentado.

#### Aplicación a clasificación de estilos eruptivos

Una de las aplicaciones más interesantes relacionada con la caracterización morfológica de cenizas volcánicas está

dada por su relación con la identificación de diferentes estilos eruptivos. En este sentido, se encontró que basta con realizar una combinación adecuada de cuatro PMS,  $Comp$ ,  $E_F$ , circularidad ( $Circ$ ) y rectangularidad ( $Rect$ ), para describir de manera completa la morfología de la partícula. En particular, cuando estos cuatro parámetros se combinan formando dos PMC es posible definir “campos” relacionados con los mecanismos intervinientes durante la fragmentación del material magmático. La interacción con el agua que habrían sufrido durante la fragmentación, magmática o freatomagmática, se establece mediante los PMC  $Circ \times Rect$  y  $Comp \times E_F$  [10, 11]. Por otro lado, la clasificación en fragmentación dúctil o frágil, se fija mediante los PMC  $Circ \times E_F$  y  $Comp \times Rect$  [12].

El PMS  $Circ$  compara el perímetro de la partícula con el perímetro de un círculo de radio  $R_{Aeq}$ . Así:

$$Circ = \frac{P_P}{2(\pi A_P)^{1/2}} \quad (6)$$

Por su parte, el PMS  $Rect$  lo compara con el perímetro de un rectángulo que circunscribe la partícula de lados: ancho  $w$  y largo  $l$ . Así:

$$Rect = \frac{P_P}{2(w+l)} \quad (7)$$

## IV. RESULTADOS

Se analizaron entre 15 y 30 cenizas de cada una de las 6 muestras provistas por GEONORTE, conformando un total de 105 cenizas analizadas. Previo al registro del holograma se utilizó luz blanca para realizar una inspección general de cada muestra, lo cual permitió observar las diferentes formas y tamaños de las cenizas presentes y realizar un registro representativo de hologramas digitales. Los hologramas fueron registrados, reconstruidos y procesados según lo descrito en la Sec. II. Para el cálculo del mapa de espesores se utilizó, para todas las cenizas, un índice de refracción  $n_c = 1,54$ , conforme con la composición típica estimada por geólogos [16]. Para la glicerina, en tanto, se utilizó  $n_g = 1,47$ . Luego, se calcularon los parámetros granulométricos y morfológicos (tanto PMS como PMC) descritos en la Sec. III. Los resultados se presentan a continuación.

#### Análisis de tamaños

Los resultados para los parámetros  $R_{Aeq}$  y  $R_{Veq}$  se ilustran en los diagramas de cajas y bigotes de la Fig. 5.

De la inspección de los mismos se observan diferencias en cuanto a las estimaciones de tamaño que brindan las caracterizaciones 2D y 3D. Con la caracterización 2D se estiman para todas las muestras, en promedio, partículas de mayor tamaño en relación con la caracterización 3D. Partiendo de la hipótesis que, al contemplar los aspectos tridimensionales de la partícula, el  $R_{Veq}$  brinda información más confiable, se podría afirmar que con el  $R_{Aeq}$  se sobreestima el tamaño de las partículas.

En efecto, cuando se realiza una inspección visual de las muestras, se observa que las cenizas son en su mayoría aplanadas, por lo que la esfera equivalente resulta de menor tamaño, avalando los resultados obtenidos. Sin embargo, no debe ignorarse el hecho de que los cálculos de  $R_{Veq}$  han sido realizados a partir del volumen efectivo, y no el real.

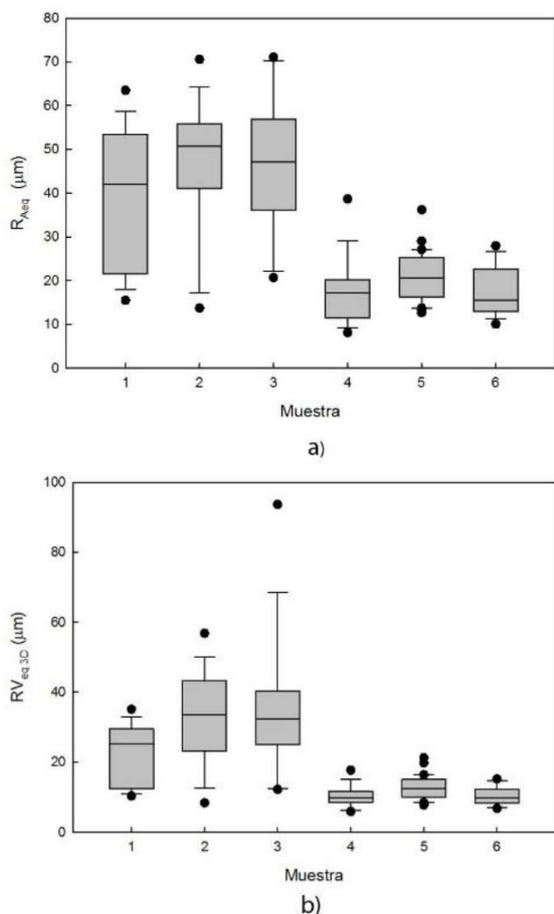


FIG. 5: Distribución de tamaños para las seis muestras. (a)  $R_{Aeq}$  y (b)  $R_{Veq}$ .

Por esto, la información 3D aportada debe examinarse con cuidado. Si una ceniza bajo estudio es maciza (sin incrustaciones ni vesículas), el índice de refracción de la ceniza  $n_c$  es probablemente correcto, lo que le da confiabilidad a los datos arrojados por la caracterización 3D. Entonces, el mapa de espesores efectivos es, en principio, igual al mapa de espesores real, evidenciando que el tamaño de la ceniza se encuentra adecuadamente caracterizado por el parámetro 3D. En tanto, si la ceniza estudiada presenta burbujas de aire, el mapa de espesores efectivo subestimará el mapa de espesores real y, por lo tanto, la información 3D subestimará el tamaño real.

### Análisis morfológico

Se computaron para las 6 muestras los parámetros morfológicos seleccionados,  $Comp$  y  $E_F$ , en sus versiones bi y tridimensional. En la Tabla 2 se presentan los resultados de los valores promedio, junto con sus desviaciones estándar. Para el parámetro  $Comp$ , el análisis 2D sugiere que las seis muestras son relativamente regulares en su morfología; es decir, se asemejan a formas rectangulares, ya que los valores promedio del parámetro se encuentran por encima de 0,5. Por el contrario, los valores de  $Comp_{3D}$  se distribuyen, en promedio, bastante por debajo de 0,5 evidenciando gran irregularidad morfológica cuando se tienen en cuenta los aspectos tridimensionales de la partícula.

Los resultados para el parámetro  $E_F$  evidencian que la mayoría de las muestras son considerablemente alargadas

TABLA 2: Resultados de los parámetros morfológicos.

	$Comp$	$Comp_{3D}$	$E_F$	$E_{F3D}$
Muestra 1	$0,61 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,07$	$2,3 \pm 0,5$	$0,3 \pm 0,1$
Muestra 2	$0,65 \pm 0,05$	$0,29 \pm 0,08$	$2,0 \pm 0,3$	$0,9 \pm 0,5$
Muestra 3	$0,62 \pm 0,05$	$0,30 \pm 0,05$	$1,9 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,2$
Muestra 4	$0,64 \pm 0,05$	$0,27 \pm 0,07$	$2,2 \pm 0,8$	$0,5 \pm 0,3$
Muestra 5	$0,62 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,07$	$2,6 \pm 0,7$	$0,8 \pm 0,5$
Muestra 6	$0,64 \pm 0,07$	$0,25 \pm 0,09$	$2,3 \pm 0,6$	$0,8 \pm 0,6$

en el sentido bidimensional, presentando diferentes grados de elongación. Los resultados tridimensionales aportan información novedosa ya que, además, sugieren cenizas en su mayoría aplanadas, lo que se encuentra de acuerdo con la información visual.

No obstante, dado que la información 3D se obtiene a partir de volúmenes efectivos (y no reales), cualquier interpretación debe ser realizada cuidadosamente por los geólogos expertos en la materia.

### Clasificación por mecanismo de fragmentación

Para establecer los dominios magmáticos y freatomagmáticos, en la Fig. 6(a) se grafican, para cada muestra, los valores de los PMC correspondientes a  $Circ \times Rect$  vs.  $Comp \times E_F$  y la curva de clasificación sugerida en la Ref. [11].

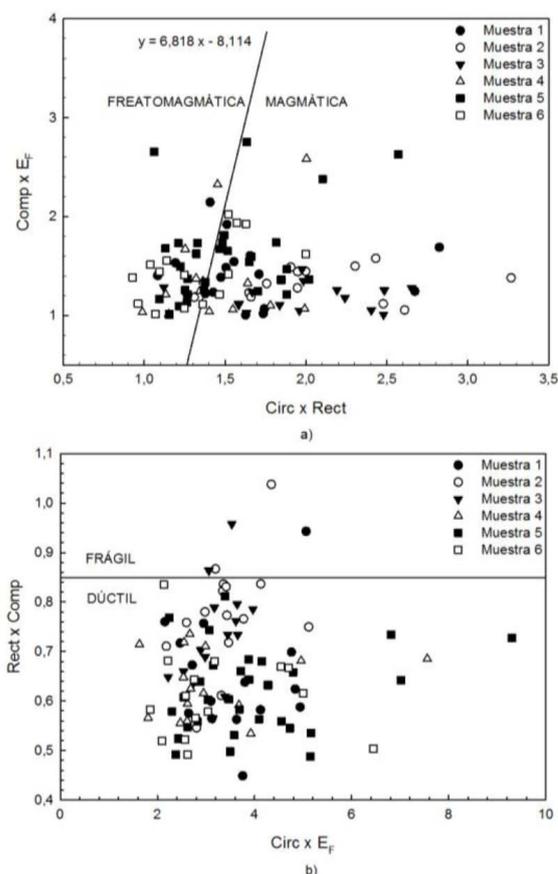


FIG. 6: Clasificación de cenizas según el régimen de fragmentación (a) Freatomagmático o Magmático. (b) Dúctil o Frágil.

Se observa que las muestras 1, 2 y 3 caen mayormente en el dominio magmático, lo cual indicaría que fueron generadas a partir de un mecanismo de fragmentación del magma debido a la exsolución de volátiles magmáticos. La

muestra 5, en tanto, se extiende en ambas regiones, sin una preferencia determinada. Las muestras 4 y 6 se ubican en su mayoría en la región asociada a fragmentaciones freatomagmáticas, las cuales se relacionan con la interacción del magma con agua externa. Esta interacción con agua genera un grado de fragmentación mucho más eficiente, lo cual se traduce en partículas más pequeñas en tamaño. Este hecho podría asociarse a la presencia de partículas más pequeñas en las muestras 4 y 6, tal como se evidencia en la Fig. 5 (análisis de tamaños).

Los resultados están de acuerdo con estudios geológicos previos [13, 14] que sugieren mecanismos de fragmentación de tipo magmática para las muestras 1, 2, 3 extraídas de Taffí y Santa María, y freatomagmáticas para las 5 y 6 colectadas en el centro Volcánico Tocomar cerca de San Antonio de los Cobres. En particular, la muestra 4 indica un mecanismo de fragmentación de tipo freatomagmático que no había sido identificado por los estudios previos. Futuros estudios vulcanológicos de detalle podrán determinar de manera más precisa el mecanismo de fragmentación asociado a esta erupción en particular.

En la Fig. 6(b) se muestra el diagrama que surge al graficar los  $PMC \text{ Circ} \times E_F$  vs  $Comp \times Rect$  para las seis muestras, junto con la curva de clasificación para fragmentación dúctil/frágil [13].

Se observa claramente que los resultados predicen el predominio de fragmentación dúctil, ya que las muestras 1, 2 y 3 se ubican casi en su totalidad en este dominio, mientras que todas las cenizas de las muestras 4, 5 y 6 pertenecen a esta región.

## V. CONCLUSIONES

Se ha explorado el uso y utilidad de la MHD para la caracterización granulométrica y morfológica de muestras microscópicas de cenizas volcánicas. Los mapas de fase que se obtienen de los hologramas se utilizaron para obtener información tanto bi como tridimensional del material particulado. El alto contraste de las imágenes de fase permitió computar parámetros bidimensionales para cada partícula con facilidad, mientras que los mapas de espesores fueron útiles para la caracterización tridimensional. Los resultados presentados indican que la información 3D resulta novedosa y podría ser de gran interés para estudios geológicos. La simplicidad de la MHD respecto de otras técnicas pone de manifiesto su potencialidad como técnica alternativa para el estudio de cenizas volcánicas.

## REFERENCIAS

[1] K. V. Cashman y B. Scheu. "Magmatic fragmentation", *In the Encyclopedia of volcanoes* pag. 459-471 (Academic Press, 2015).

[2] D. Nurfiyani y C. B. De Maisonrouve. Furthering the investigation of eruption styles through quantitative shape analyses of volcanic ash particles. *J. Volcanol. Geoth. Res.* **354**, 102-114 (2018).

[3] J. Schmith, Á. Höskuldsson y P. M. Holm. Grain shape of basaltic ash populations: implications for fragmentation. *Bull. Volcanol.* **79**, 14 (2017).

[4] K. V. Liu E. J. and Cashman y A. C. Rust. Optimising shape analysis to quantify volcanic ash morphology. *GeoResJ.* **8**, 14-30 (2015).

[5] B. H. Kaye. "Particle size characterization", in *Handbook of Powder Science and Technology* Eds.: M. E. Fayed, L. Otten. ISBN: 978-0-412-99621-4 (Chapman y Hall, New York, 1997).

[6] N. A. Krotkov, D. E. Flittner, A. J. Krueger, A. Kostinski, C. Riley, W. Rose y O. Torres. Effect of particle non-sphericity on satellite monitoring of drifting volcanic ash clouds. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **63**, 613-630 (1999).

[7] S. Wen y W. I. Rose. Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5. *J. Geophys. Res.* **99**, 5421-5431 (1994).

[8] P. Vonlanthen, J. Rausch, R. A. Ketcham, B. Putlitz, L. P. Baumgartner y B. Grobéty. High-resolution 3D analyses of the shape and internal constituents of small volcanic ash particles: the contribution of SEM micro-computed tomography (SEM micro-CT). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **293**, 1-12 (2015).

[9] M. K. Kim. *Digital holographic Microscopy: Principles, Techniques, and applications* ISBN: 978-1-4614-2995-1 (Springer-Verlag New York, 2011).

[10] P. Dellino y L. La Volpe. Image processing analysis in reconstructing fragmentation and transportation mechanisms of pyroclastic deposits. The case of Monte Pilato-Rocche Rosse eruptions, Lipari (Aeolian Islands, Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **71**, 13-29 (1996).

[11] R. M. Murtagh y J. D. L. White. Pyroclast characteristics of a subaqueous to emergent Surtseyan eruption, Black Point Volcano, California. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **267**, 75-91 (2013).

[12] R. Büttner, P. Dellino, L. La Volpe, V. Lorenz y B. Zimanowski. Thermohydraulic explosions in phreatomagmatic eruptions as evidenced by the comparison between pyroclasts and products from Molten Fuel Coolant Interaction experiments. *J. Geophys Res.: Solid Earth* **107**, ECV-5 (2002).

[13] M. M. Sampietro-Vattuone, W. Báez, J. L. Peña-Monné y A. Sola. Chronological and geomorphological approach to the Holocene tephra from Taffí and Santa María valleys, NW Argentina. *Quaternary Res.* **94**, 14-30 (2020).

[14] I. A. Petrinovic y F. C. Piñol. Phreatomagmatic and phreatic eruptions in locally extensive settings of Southern Central Andes: The Tocomar Volcanic Centre (24° 10'S-66° 34'W), Argentina. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **158**, 37-50 (2006).

[15] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier optics* 3.<sup>a</sup> ed. ISBN: 0-9747077-2-4 (Roberts y Company Publishers, USA, 2005).

[16] J. G. C. Ball, B. E. Reed, R. G. Graiger, D. M. Peters, T. A. Mather y D. M. Pyle. Measurements of the complex refractive index of volcanic ash at 450, 546.7, and 650 nm. *J. Geophys. Res.: Atmos.* **120**, 7747-7757 (2015).