

Aplicación del sensor Kinect en modelos análogos para la identificación morfo-estructural de procesos de deformación en volcanes

Kinect sensor application in analogue modeling for the morpho-structural identification of volcano deformation processes

Marta Rincón¹, Álvaro Márquez¹, Benjamin van Wyk de Vries², Raquel Herrera¹, José Luis Granja Bruña³ y Pilar Llanes³

¹ Área de Geología ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. C/ Tulipán s/n, 28933. Móstoles. Madrid. España.
m.rincon.r@alumnos.urjc.es, alvaro.marquez@urjc.es, raquel.herrera@urjc.es

² Laboratoire Magmas et Volcans. Université Blaise Pascal. Clermont Ferrand. Francia.
B.vanwyk@opgc.univ-bpclermont.fr

³ Grupo de Tectonofísica Aplicada. Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. España.
jlgranja@ucm.es, pllanes@ucm.es

ABSTRACT

Volcanoes morphology reflects the deformation episodes occurred at the edifice, although different deformation processes can produce similar morphologies. Analogue modeling is a key tool for a better understanding of the causes of deformation in volcanoes using their morphology. In this work we have used for first time the Kinect sensor (Microsoft®) for monitoring topographic changes in modeled volcanoes suffering deformation due to intrusion and spreading over a hydrothermal core processes. Results obtained show differences between the two processes in the extent and location of volcano subsidence and bulging zones, the height of the deformed flank slope change and the fracturing intensity. Technical problems detected in Kinect data restrict parameters quantification using morphometric techniques and imply the need for future research about the capabilities of these methods for the morpho-structural identification of deformation processes in volcanoes.

Key-words: Analogue modeling, volcano deformation, Kinect.

Geogaceta, 57 (2015), 107-110.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción y objetivos

La morfología de los volcanes proporciona información sobre su evolución estructural (p. ej., Grosse *et al.*, 2009). La deformación producida en los volcanes puede modificar su forma y afectar sustancialmente a su estabilidad estructural, provocando colapso de sus flancos incluso en volcanes inactivos. Esta deformación puede estar asociada a procesos diversos con diferentes

escalas temporales, como eventos puntuales de intrusión o procesos de inestabilidad gravitacional prolongados en el tiempo (p. ej., Donnadieu y Merle, 1998; van Wyk de Vries *et al.*, 2000). Ambos procesos pueden producir fallas y cambios similares en la morfología del flanco del volcán, por lo que distinguir la causa de la deformación es fundamental a la hora de prever su estabilidad. La modelización análoga se ha mostrado como una herramienta que aporta informa-

RESUMEN

La morfología de los volcanes refleja los episodios de deformación sufridos por el edificio, aunque procesos de deformación diferentes pueden provocar morfologías similares. La modelización análoga es una herramienta clave para comprender mejor las causas de la deformación en volcanes a partir de su morfología. En este trabajo se ha utilizado por primera vez el sensor Kinect (Microsoft®) para monitorizar los cambios topográficos en volcanes sometidos a experimentos de deformación por procesos de intrusión y expansión sobre un núcleo hidrotermal. Los resultados obtenidos muestran diferencias entre ambos procesos en la amplitud y localización de las zonas de subsidencia y abombamiento del volcán, la altura del cambio de pendiente del flanco deformado y la intensidad de la fracturación. Los problemas técnicos detectados en los datos del Kinect limitan la cuantificación de esas diferencias mediante técnicas morfométricas e implican la necesidad de seguir explorando las capacidades de estos modelos para la identificación morfo-estructural de procesos de deformación en volcanes.

Palabras clave: Modelización análoga, deformación de volcanes, Kinect.

Fecha de recepción: 1 de julio de 2014
Fecha de revisión: 22 de octubre de 2014
Fecha de aceptación: 28 de noviembre de 2014

ción clave para comprender mejor las causas de la deformación en volcanes a partir de su morfología (Norini y Acoccella, 2011).

En este trabajo presentamos los primeros resultados obtenidos de una serie de experimentos análogos de deformación de volcanes, en los que se recrean episodios de intrusión de magma, similares a los realizados por Donnadieu y Merle (1998) y de expansión (*spreading*) del volcán sobre un núcleo hidrotermal (Cecchi *et al.*, 2004).

Recientemente Tortini *et al.* (2014) han propuesto el uso del sensor Kinect (Microsoft®) para la monitorización de la deformación en modelos análogos de colapsos de calderas volcánicas. En este trabajo usamos por primera vez este sensor para la monitorización de procesos de deformación por expansión y por intrusión en volcanes. Nuestro propósito es comparar las formas y estructuras de deformación desarrolladas en estos dos procesos de escalas temporales tan diferentes, que hasta la fecha se habían estudiado con técnicas diferentes (Donnadieu *et al.*, 2003). El objetivo es buscar criterios que permitan identificar los procesos de deformación sufridos por el volcán a partir de su morfología.

Metodología

La figura 1 muestra el diseño experimental empleado para la realización de los experimentos. El material del volcán fue simulado con una mezcla de arena de sílice (tamaño de grano: 50% de 125 μ m y 50% de 250 μ m) y yeso en una proporción 4:1, con el fin de incrementar su cohesión (Tabla 1). Ésta se calculó midiendo la altura soportada por un talud vertical en el cual no se produce el derrumbe (Roche y Druitt, 2001). Con este material y realizando un escalado acorde con la realidad a nivel geométrico y mecánico (Tabla 1), se obtiene un ratio de altura (h^*) de $1,16 \cdot 10^{-4}$, por lo que para modelizar un volcán de 1200 metros de alto, los volcanes de arena-yeso tienen una altura de 14 cm y un diámetro de 36 cm. Para reproducir el núcleo hidrotermal en los experimentos de expansión se utilizó silicona (PDMS; Dow Corning SGM 36®), con una viscosidad de $1 \cdot 10^4$ Pa·s (según Cecchi *et al.*, 2004), simulando un material de viscosidad $7 \cdot 10^{15}$ Pa·s en la realidad. Puesto que existe gran incertidumbre sobre la disposición y proporción de los sistemas hidrotermales en volcanes reales, se realizaron 30 experimentos variando el tamaño (entre 3 y 14 cm), la posición (horizontal y

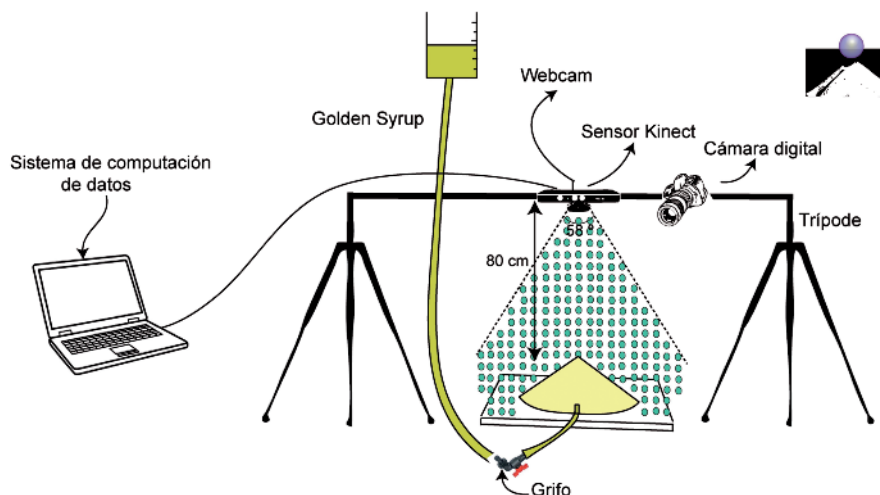


Fig. 1.- Diseño experimental. Consiste en dos trípodes que sostienen una barra rígida de unión donde se acoplan el sensor Kinect, la Webcam y la Cámara Digital en la vertical del volcán.

Fig.1.- Experimental design. Two tripods support a bar where the Kinect sensor, the webcam and the digital camera can be located over the volcano.

vertical) y la forma (conos y paralelepípedos) de la silicona que reproduce dicho sistema. Las piezas de silicona se elaboraron manualmente, siendo ubicadas en el interior del modelo antes de formar el cono de arena. Para recrear la intrusión de magma en el volcán, en vez de silicona como Donnadieu y Merle (1998) se utilizó sirope (Lyle's Golden Syrup®), un material con viscosidad menor (Delcamp *et al.*, 2012). En los modelos de intrusión la inyección del sirope se realizó a través de un tubo situado en el centro del volcán, impulsándolo por una diferencia de altura de 70 cm entre la salida del tubo y el recipiente que contiene el sirope. Se realizó una serie de 6 experimentos variando solo la altura a la que tiene lugar la intrusión a 3, 6 y 12 cm. El experimento finaliza en el momento de salida del sirope a la superficie. El volumen inyectado simula una intrusión similar a la acontecida en el Mt St. Helens en 1980 (Moore y Albee, 1981).

A partir de la cohesión de la arena y la viscosidad de la silicona y del sirope, se ha obtenido el escalado temporal. Para mantener una escala temporal similar a la de la in-

trusión del Mt. St. Helens y reproducir más fielmente los parámetros intrínsecos de la intrusión natural (magma de viscosidad de $1 \cdot 10^9$ Pa·s), la temperatura del sirope a lo largo del experimento se mantuvo en 22°C para controlar su viscosidad (Tabla 1). La combinación de los escalados de dimensión y tiempo nos permitió simular una intrusión con caudales también similares a las del Mt St Helens en 1980 (Moore y Albee, 1981). En estos experimentos de intrusión se han adquirido datos cada 1,23 minutos, equivalentes a un día en la realidad. En los ejemplos de extensión, el tiempo de toda la secuencia ha sido de 20 minutos, simulando 6500 años. En ellos se han adquirido datos del experimento cada segundo proporcionando información sobre la evolución del proceso morfoestructural del volcán real cada 5 años.

Para monitorizar los cambios producidos en la morfología del volcán, hemos utilizado el sensor Kinect (Microsoft®). Este dispositivo de captura de movimiento, desarrollado originalmente para la videoconsola Xbox 360®, consta de una cámara en el espectro visible (RGB), una en el infrarrojo (IR), y un emisor láser, los cuales permiten capturar el movimiento de los objetos en 3D. El programa adquiere las distancias en tiempo real y registra imágenes RGB y de profundidad (IR) de 640x480 píxeles de resolución y con una frecuencia de ~ 30 imágenes por segundo en modo continuo. La distancia de trabajo del sensor Kinect está entre 0,5 y 10-15 m, con un campo de visión de 58° x 40°. Para calcular las distancias, el sensor Kinect emite mediante el

Parámetros del escalado	INTRUSIÓN		EXPANSIÓN		Unidades
	Naturaleza	Modelo	Naturaleza	Modelo	
σ Cohesion	$1 \cdot 10^6$	62	$1 \cdot 10^6$	62	Pa
H Altura del volcán	1200	0,14	1200	0,14	m
R Radio del volcán	1550	0,18	1550	0,18	m
μ Viscosidad	$1 \cdot 10^9$	53,4	$7 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^4$	Pa·s
t Tiempo de deformación	60	0,05139	2.372.500	0,01389	días

Tabla 1.- Escalado de los parámetros utilizados en los modelos análogos de intrusión y expansión.

Table 1.- Scaling of parameters used for intrusion and spreading analogue modeling.

láser un patrón conocido de puntos de IR (= 830 mm) y deriva una imagen de distancia por correlación y triangulación de la señal grabada por la cámara de infrarrojos con un patrón de referencia almacenado en la memoria del sensor (Mankoff y Russo, 2013). Su bajo precio permite disponer en el laboratorio de un sistema de medida sencillo y preciso (ver Tortini *et al.*, 2014 para detalles de precisión del sensor).

Para nuestros experimentos sustituimos la cámara RGB de dicho dispositivo por una Webcam Logitech® HD Pro c920 de 1920x1080 píxeles, aumentando la resolución de las imágenes captadas. El grupo de investigación informática CAPO-URJC desarrolló un programa que permite establecer

el número de imágenes adquiridas por segundo y sincronizarlas con los datos de profundidad obtenidos por el sensor Kinect (el programa está a disposición de los interesados a través de los autores). En nuestros experimentos situamos el Kinect y la webcam sobre los volcanes a una distancia de 80 cm (Fig. 1), obteniendo así modelos digitales de elevación del volcán con una resolución horizontal de 1,3 mm (aprox. 11 m reales) y vertical de 1 mm (aprox. 8 metros reales).

Resultados

En la figura 2 se muestran algunos ejemplos seleccionados de los resultados de modelos de intrusión y expansión para su

comparación. Los experimentos realizados muestran cambios asimétricos en la morfología de los volcanes, desarrollándose geometrías cóncavo-convexas en el flanco que se deforma, aunque las intrusiones y las piezas de silicona estén centradas en el volcán (Fig. 2). En estos experimentos la cima del volcán sufre subsidencia en una zona muy amplia (Figs. 2A, C), que se acomoda con el abombamiento de un flanco que produce un aumento de su pendiente y el desarrollo de un perfil característico cóncavo-convexo.

En los modelos de intrusión también se produce una subsidencia en la zona de cima, del mismo orden que en los experimentos de expansión (unos 25-30 mm; Figs. 2B, D) pero en un área mucho más localiz-

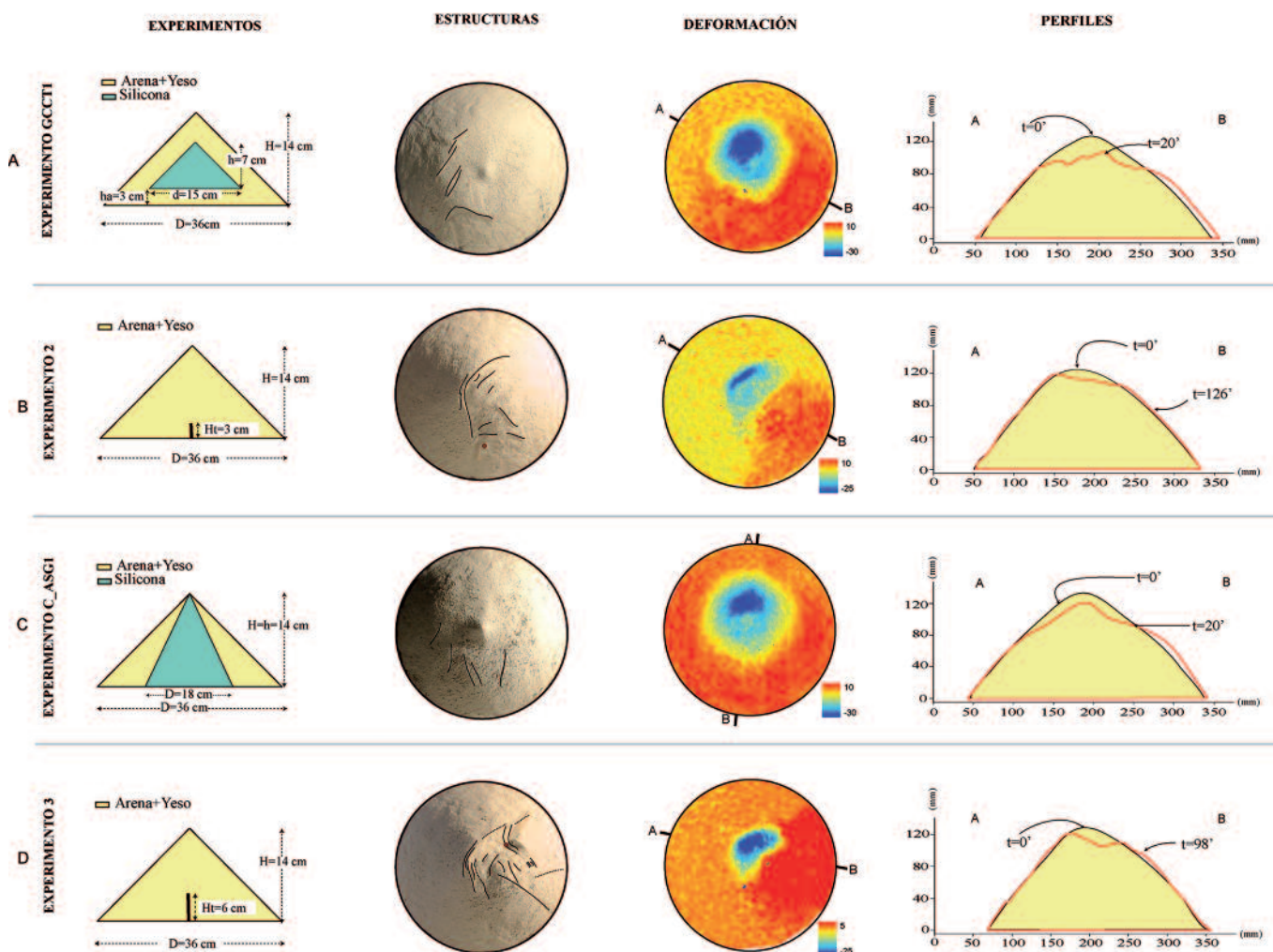


Fig. 2.- Resultados seleccionados de los modelos análogos. "Experimentos": configuración de cada experimento; "Estructuras": principales estructuras presentes al final de los experimentos; "Deformación": resultado en milímetros de la resta de la topografía inicial de cada modelo menos la final; "Perfiles": perfiles topográficos finales característicos de cada experimento según la línea A-B marcada en "Deformación". A) Experimento de expansión GCCT1, tiempo = 20 minutos. B) Experimento de intrusión 2, $Q=1,1 \text{ cm}^3/\text{min}$, tiempo = 126 minutos. C) Experimento de expansión C_ASG1, tiempo = 20 minutos. D) Experimento de intrusión 3, $Q=1,2 \text{ cm}^3/\text{min}$, tiempo = 98 minutos.

Fig 2.- Analogue modelling selected results. "Experimentos": experiment configuration; "Estructuras" interpreted structures at the end of the experiment; "Deformación": subtraction in millimetres of the initial topography minus the final topography; "Perfiles": a representative final topographic profile of each experiment following the A-B line from "Deformación". A) Spreading experiment GCCT1, time = 20 minutes. B) Intrusion experiment 2, $Q=1.1 \text{ cm}^3/\text{min}$, time = 126 minutes. C) Spreading experiment C_ASG1, time = 20 minutes. D) Intrusion experiment 3, $Q=1.2 \text{ cm}^3/\text{min}$, time = 98 minutes.

zada, y claramente controlada por el desarrollo de fallas. El abombamiento del flanco deformado, con aumento de pendiente, es más pronunciado pero ocurre en una zona más pequeña y más cercana a la cima (ver "Perfiles" en figuras 2B, D).

Además, el cambio de pendiente observado en los experimentos siempre ocurre a menor altura en los de expansión que en los de intrusión (ver "Perfiles" en figura 2), independientemente del tamaño o localización de la pieza de silicona.

Otra observación es que, aunque los experimentos de expansión desarrollan superficies mayores de subsidencia y abombamiento, en los experimentos de intrusión se forman un mayor número de fallas, además de estar más desarrolladas que las formadas en los experimentos de expansión ("Estructuras" en figura 2).

Discusión

Los resultados obtenidos con el sensor Kinect en los experimentos de deformación de volcanes muestran el gran potencial de este tipo de sensores en la modelización análoga. Las morfologías obtenidas son similares a las descritas previamente por Donnadiou *et al.* (2003) pero el procesamiento necesario para obtenerlas es mucho menor que con otros métodos previos como la fotogrametría. Sin embargo el sensor Kinect, aún siendo un dispositivo que nos da información en tiempo real sobre los movimientos en la vertical del volcán en nuestros experimentos, ha mostrado una serie de problemas que en un futuro se deben tratar de eliminar. A la hora del procesamiento de los datos adquiridos por el sensor Kinect hemos observado que la superficie obtenida muestra una marcada rugosidad, causada probablemente por la interferencia del IR cercano del sensor con la luz solar existente en el laboratorio (con una fuerte energía en = 830 mm). Este ruido es similar al que se observa en los perfiles de Tortini *et al.* (2014) y dificulta enormemente el estudio de los mapas de pendiente de los volcanes de los experimentos.

En este trabajo aparecen posibles criterios morfo-estructurales para diferenciar el tipo de proceso de deformación: amplitud y localización de las zonas de subsidencia y abombamiento, altura del cambio de pendiente e intensidad de la fracturación. Por tanto, un estudio más detallado de estos criterios podría aportar elementos para

identificar los diferentes procesos de deformación en volcanes. Éstos deben ser confirmados con estudios futuros en los que se analicen más parámetros, como la evolución temporal de la topografía y la localización y desarrollo de las estructuras asociadas. El uso de técnicas morfométricas, que han sido aplicadas con éxito en el estudio de la evolución morfo-estructural en volcanes reales (p. ej., Grosse *et al.* 2009), es otra herramienta que puede proporcionar una gran información aplicada a los datos de los modelos. Además, los resultados pueden ser comparados con datos estructurales relevantes de campo en volcanes, como zonas basculadas (van Wyk de Vries *et al.*, 2014).

Conclusiones

El uso del sensor Kinect (Microsoft®) nos ha permitido monitorizar la deformación vertical producida en experimentos análogos de procesos de intrusión de magma y expansión sobre un núcleo hidrotermal en volcanes. En todos los casos se produce una deformación asimétrica del volcán, con desarrollo de un flanco de geometría cóncavo-convexa, pero el tamaño y localización de las zonas de deformación producidas por ambos procesos son diferentes. En los volcanes deformados por expansión la zona de subsidencia en la cumbre y el abombamiento de flanco producidos son más extensos y con límites menos netos que en los volcanes deformados por una intrusión. Además, el cambio de pendiente que se produce en el flanco deformado está siempre a menor altitud en los modelos de la deformación por expansión.

Los problemas técnicos con el sensor Kinect detectados en este trabajo dificultan actualmente la aplicación de técnicas morfométricas que permitan cuantificar esas diferencias. La reducción de esos problemas permitiría desarrollar series más completas de experimentos así como la monitorización de la evolución temporal de sus deformaciones. Esto posibilitaría definir cuantitativamente criterios morfo-estructurales de identificación del proceso de deformación en volcanes.

Las semejanzas existentes entre las estructuras morfológicas encontradas en los volcanes en nuestros experimentos y en la naturaleza (p. ej., la intrusión del criptodomo del Mt. St. Helens en 1980), confir-

man que los modelos análogos proporcionan gran información para una mejor comprensión de los procesos de deformación en volcanes. Sin embargo, es necesario seguir desarrollando las técnicas de modelización análoga y su monitorización, además de contrastar las recreaciones de laboratorio con las estructuras observables con el trabajo de campo (p. ej., fallas o abombamientos).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto CGC2010-19388 del MINECO que ha permitido la creación del Laboratorio de Modelización Análoga de la URJC. Agradecer al grupo CAPO-URJC la creación del programa para el uso del Kinect-Webcam, a R. Tortini por compartir su trabajo con el Kinect, a Tate & Lyell por el sirope para los experimentos y a los revisores A. Geyer y O. Ferrer por sus anotaciones y comentarios que han mejorado el artículo.

Referencias

- Cecchi, E., de Vries, B.V.W. y Lavest, J.M. (2004). *Bulletin of Volcanology* 67, 72-91.
- Delcamp, A., van Wyk de Vries, B., James, M.R., Gailler, L.S. y Lebas, E. (2012). *Bulletin of Volcanology* 74, 743-765.
- Donnadiou, F. y Merle, O. (1998). *Geology* 26, 79-82.
- Donnadiou, F., Kelfoun, K., van Wyk de Vries, B., Cecchi, E. y Merle, O. (2003). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123, 161-180.
- Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Petrinovic, I.A., Euillades, P.A. y Alvarado, G.E. (2009). *Geology* 37, 651-654.
- Mankoff, K.D. y Russo, T.A. (2013). *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 926-936.
- Moore, J.G. y Albee, W.C. (1981). En: *The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington* (D.L. Peck, Ed.) United States Geological Survey, Washington DC, 123-134.
- Norini, G. y Acocella, V. (2011). *Journal of Geophysical Research* 116, doi: 10.1029/2011J B008216.
- Roche, O. y Druitt, T.H. (2001). *Earth and Planetary Science Letters* 191, 191-202.
- Tortini, R., Bonali, F.L., Corazzato, C., Carn, S.A. y Tibaldi, A. (2014). *Terra Nova* 26, 273-281.
- van Wyk de Vries, B., Kerle N. y Petley D. (2000). *Geology* 28, 167-170.
- van Wyk de Vries, B., Márquez, A., Herrera, R., Granja Bruña, J.L., Llanes, P. y Delcamp A. (2014). *Bulletin of Volcanology* 76, 1-20.