

# La estructura porosa de muestras superficiales del complejo volcánico Los Humeros, revelada a partir de imágenes de microscopía electrónica de barrido y de microtomografía de rayos X

Sandra Vega<sup>1,\*</sup>, Jonathan de la Rosa-Maldonado<sup>1,2</sup>,  
Irving Reyna-Bustos<sup>1,3</sup> y Gerardo Carrasco-Núñez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Querétaro, 76230, México.

<sup>2</sup> Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 07340, México.

<sup>3</sup> Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Taxco El Viejo, Guerrero, 40323, México.

\*Autor para correspondencia (S. Vega): [sandravega@geociencias.unam.mx](mailto:sandravega@geociencias.unam.mx)

## EDITORES:

Luigi A. Solari  
Natalia Pardo Villaveces

## CÓMO CITAR:

Vega, S., de la Rosa-Maldonado, J., Reyna-Bustos, I. & Carrasco-Núñez, G. (2025). La estructura porosa de muestras superficiales del complejo volcánico Los Humeros, revelada a partir de imágenes de microscopía electrónica de barrido y de microtomografía de rayos X. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 42(2), 73–92. DOI: <https://dx.doi.org/10.22201/igc.20072902e.2025.2.1846>

Manuscrito recibido: octubre 27, 2024

Manuscrito corregido recibido: abril 10, 2025

Manuscrito aceptado: abril 15, 2025

Publicado en línea: agosto 1, 2025

## COPYRIGHT

© 2025 Los autores.

Este es un artículo de acceso-libre publicado y distribuido por la Universidad Nacional Autónoma de México bajo los términos [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) que permite uso irrestricto, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se otorguen los créditos correspondientes al (los) autor(es) original(es).



## RESUMEN

La caracterización de la estructura porosa y la permeabilidad de las rocas volcánicas es importante en la investigación de yacimientos geotérmicos, hídricos y de hidrocarburos, así como para la gestión de riesgos volcánicos. El presente estudio tiene como objetivo contribuir a un mejor entendimiento del espacio poroso y la permeabilidad de las rocas volcánicas, utilizando como caso estudio muestras de rocas superficiales pertenecientes al complejo volcánico Los Humeros, el cual alberga un yacimiento geotérmico actualmente en explotación. Para la caracterización de las muestras se utilizan varias técnicas analíticas, tales como porosimetría, permeametría, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X. Para el estudio del espacio poroso y la permeabilidad, se utilizan imágenes de microscopía electrónica de barrido y microtomografía de rayos X. Los resultados obtenidos indican que, en las rocas volcánicas estudiadas, el efecto de tamaño o escala es más relevante que el uso de las diferentes técnicas empleadas para obtener la porosidad. Por otra parte, las permeabilidades medidas analíticamente revelan valores relativamente altos, cuya conectividad solo comienza a ser detectada a partir de resoluciones de 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ , lo cual corrobora los estudios previos. Esto último es de gran importancia ya que los resultados indican que gran cantidad de poros muy pequeños ( $\leq 10 \mu\text{m}/\text{voxel}$ , en este caso) contribuyen considerablemente al transporte de flujo de fluidos, consecuentemente al valor de la permeabilidad, lo cual puede tener consecuencias significantivas en la explotación del campo geotérmico Los Humeros.

**Palabras clave:** porosidad; permeabilidad; campo geotérmico; rocas volcánicas; microtomografía de rayos X; microscopía electrónica de barrido; complejo volcánico Los Humeros; México.

## ABSTRACT

*Studies of pore structure and permeability in volcanic rocks are important in the research of geothermal, water, and hydrocarbon reservoirs, as well as for the management of volcanic risks. The present study aims to contribute to a better understanding of the pore space and permeability of volcanic rocks, using surficial rock samples from Los Humeros volcanic complex, which hosts a geothermal field, as a case study. For this, several experimental techniques are used for the samples' characterization, such as porosimetry, permeametry, X-ray diffraction, and X-ray fluorescence, whereas images of scanning electron microscopy and X-ray microtomography are used to study the pore space and permeability. The results indicate that, in the studied volcanic rocks, the effect of size or scale is more relevant than the use of different techniques to obtain porosity. On the other hand, the*

*experimentally measured permeabilities reveal relatively high values, whose connectivity only begins to be detected from resolutions of 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ , which corroborates previous studies. This finding is of great importance as the results indicate that a significant number of small pores ( $\leq 10 \mu\text{m}/\text{voxel}$ , in this case) contribute considerably to fluid flow transport, and consequently to the permeability. All this has significant potential consequences for the exploitation of the Los Humeros geothermal field.*

**Keywords:** porosity, permeability; geothermal field; volcanic rocks; scanning electron microscopy; X-ray microtomography; Los Humeros volcanic complex; Mexico.

## INTRODUCCIÓN

La caracterización de la estructura porosa y la permeabilidad de las rocas volcánicas es importante para la optimización de exploración y explotación de recursos geotérmicos, hídricos, y de hidrocarburos, así como para la gestión de riesgos volcánicos. En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios de estas propiedades en rocas volcánicas para exploración y producción petrolera (ej., Becker *et al.*, 2019; Sruoga *et al.*, 2004; Tian *et al.*, 2022). Otros estudios se han enfocado en la caracterización de yacimientos geotérmicos en formaciones volcánicas (ej., Cid *et al.*, 2021; Skokan e Ibrahim, 1978), e igualmente en acuíferos (ej., Desbarats *et al.*, 1999; Zahasky *et al.*, 2018). Conjuntamente, estudios de la estructura porosa y permeabilidad de las rocas volcánicas se han realizado para la evaluación de peligros y planificación de emergencias durante erupciones volcánicas de intensidad y magnitud variables (ej., Liedl *et al.*, 2019; Farquharson *et al.*, 2015; Torres-Orozco *et al.*, 2024). Todos estos trabajos resaltan tanto la complejidad de la estructura interna de las rocas volcánicas y el valor de tener un mejor entendimiento de su textura y el transporte de fluidos. Por lo que, estudios que conlleven a un mejor entendimiento de su espacio poroso pueden agregar valor al conocimiento encontrado en los estudios de aplicaciones específicas.

La visualización, caracterización y cuantificación en 3D de la estructura porosa es posible a través de la utilización de la microtomografía computarizada de rayos X (micro-CT). Con esta poderosa técnica (no destructiva) se obtienen imágenes 3D que captan el interior de las rocas a resoluciones entre  $\sim 40$  a  $0.5 \mu\text{m}/\text{voxel}$ . Varios autores han utilizado la micro-CT para el estudio de la estructura porosa y la permeabilidad de rocas volcánicas. Por ejemplo, Liu *et al.* (2023) estudiaron cuantitativamente un juego de muestras representativas de la erupción del Monte Nuovo con micro-CT, encontrando, en este caso en particular, que no había relación entre su porosidad y permeabilidad. Buono *et al.* (2023), en un estudio multiescalar utilizando imágenes de micro-CT para calcular la porosidad y permeabilidad de una toba, encontraron que era necesario llegar a resoluciones mayores de  $4 \mu\text{m}/\text{voxel}$  para poder caracterizar bien esta muestra. Además, Cid *et al.* (2021) realizaron un estudio sobre el papel de la microporosidad (poros  $< 1 \mu\text{m}$ ) en la permeabilidad de rocas volcánicas provenientes del yacimiento geotérmico de Los Humeros utilizando micro-CT. Sus resultados indican que el estudio del espacio microporoso es esencial para una estimación más completa de la permeabilidad en sistemas geotérmicos alojados en volcanes. Asimismo, Heap *et al.* (2024) estudiaron tobas volcánicas del volcán Krafla en Islandia. Sus resultados indican que la microestructura inicial de sus rocas es crucial en la evolución de la permeabilidad bajo condiciones de estrés y deformación. Por otra parte, Vairé *et al.* (2024) al realizar un estudio analítico de las propiedades físicas y mecánicas, y determinar las orientaciones de los poros utilizando micro-CT de cinco lavas de traquiandesitas de la Chaîne des Puys (Massif Central, Francia), mostraron que es importante la incorporación de complejidades de la anisotropía (mecánica y textural) al modelar estas rocas, ya que proporcionan

predicciones más precisas e información más confiable acerca del comportamiento de los volcanes (ya sea erupciones, movimiento del magma o estabilidad de las laderas) y del movimiento de fluidos en yacimientos geotérmicos. Por lo que, estos estudios sugieren que hay que tomar en cuenta la microestructura de las rocas volcánicas para entender mejor su comportamiento, tanto físico como de transporte y mecánico.

El presente estudio tiene como objetivo principal contribuir a un mejor entendimiento del espacio poroso y permeabilidad de las rocas volcánicas. Como caso de estudio se utilizan muestras de rocas provenientes de diferentes etapas evolutivas del complejo volcánico Los Humeros (CVLH). Para ello, se utilizan análisis mineralógicos y de petrografía para refinar la clasificación litológica de las muestras, la porosimetría y permeametría para cuantificar las propiedades de porosidad y permeabilidad, respectivamente; mientras que se utilizan las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) y de micro-CT para realizar análisis tanto cualitativos como cuantitativos del espacio poroso y la porosidad. Asimismo, las imágenes de micro-CT son empleadas para examinar la permeabilidad. La información y resultados obtenidos son comparados con diferentes técnicas analíticas para obtener una comprensión más profunda de las propiedades investigadas (espacio poroso, porosidad y permeabilidad). En otras palabras, el enfoque del estudio se concentra en entender cómo el espacio poroso, y por ende la porosidad, de las muestras estudiadas, son afectados tanto por la técnica de medición como la escala de observación, y que todos estos resultados afectan a su vez a las permeabilidades medidas en rocas del CVHL.

Este estudio se presenta bajo la siguiente estructura. Primero, se expone una breve descripción del marco geológico de las muestras (especímenes) estudiadas y su preparación. Luego, se describen las técnicas y mediciones analíticas utilizadas para la caracterización física de las muestras, *i.e.* clasificación (petrografía, DFX, FRX) y propiedades físicas de porosidad y permeabilidad (porosimetría, permeametría). A continuación, se presentan las dos técnicas utilizadas para la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes (SEM, micro-CT). Posteriormente, se comparan los resultados obtenidos, y más específicamente los valores de porosidad determinada con diferentes técnicas y a varias escalas (porosimetría, micro-CT, SEM), asimismo como la visualización del espacio poroso (micro-CT, SEM). Finalmente, se expone una discusión de los resultados y sus implicaciones tanto particulares como generales.

## MARCO GEOLÓGICO

### Complejo volcánico Los Humeros (CVLH)

El complejo volcánico Los Humeros (CVLH) es una gran estructura cuaternaria asociada a la formación de múltiples calderas volcánicas, que se localiza en la zona más oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (Carrasco-Núñez *et al.*, 2017a). Este complejo volcánico es el resultado de la subducción de las placas de Cocos y

Rivera por debajo de la placa de América del Norte, a lo largo de la trinchera Mesoamericana. Estos mecanismos de subducción de las placas tectónicas y convección en el manto son responsables de la formación de grandes estratovolcanes andesíticos, calderas silíceas, domos riolíticos y campos volcánicos de conos de escorias basálticos, entre otros volcanes (Ferrari *et al.*, 2012). El CVLH se encuentra en el borde septentrional de la cuenca de Serdán Oriental, la cual presenta en sus áreas circundantes las siguientes delimitaciones naturales: (a) al sur, rocas de origen sedimentario marino de edad Mesozoicas, (b) al oriente, la cadena volcánica Cofre de Perote-Citlaltépetl (Pico de Orizaba) y (c) al occidente, el vulcanismo miocénico dominado por el campo volcánico de Cerro Grande (Carrasco-Núñez *et al.*, 1997; Yáñez-García y García-Durán, 1982). La evolución geológica del CVLH está dividida en tres etapas principales, de acuerdo con Carrasco-Núñez *et al.* (2018): (1) vulcanismo pre-caldera, caracterizado por el emplazamiento de domos riolíticos, con edades que oscilan entre los 270 y los 693 ka; (2) vulcanismo de caldera, que comprende la formación de dos calderas anidadas (calderas de Los Humeros y Los Potreros), junto con un periodo intermedio de actividad explosiva asociada a erupciones de tipo pliniano (Toba Faby), ocurrido durante el periodo de 164–69 ka; y (3) vulcanismo post-caldera, comprende dos fases eruptivas, una fase resurgente del Pleistoceno tardío (50.7–28.3 ka) que incluye el emplazamiento de pequeños domos seguidos por actividad explosiva, y una fase de reactivación holocénica que incluye erupciones tanto explosivas como efusivas, ocurridas dentro de la caldera y en el borde anular sur de la caldera de Los Humeros, mostrando una diversidad de composiciones que varían desde basaltos hasta traquitas. El CVLH ha sido estudiado ampliamente por distintas disciplinas con diferentes enfoques (*i.e.*, geología, vulcanología, geofísica y, yacimientos geotérmicos). Entre los trabajos previos de la geología del CVLH se encuentran: Yáñez-García y García-Durán (1982), Ferriz y Mahood (1984), Dávila-Harris y Carrasco-Núñez (2014), Carrasco-Núñez *et al.* (2017a; 2017b; 2018), Cavazos-Álvarez y Carrasco-Núñez (2020). En lo que respecta a estudios geofísicos, se presentan diversos trabajos de exploración geotérmica en donde se interpreta la estructura interna y su relación con el yacimiento geotérmico (Campos-Enriquez y Arredondo-Fragoso; 1992, Arzate *et al.*, 2018; Corbo-Camargo *et al.*, 2020). Asimismo, se presentan descripciones sobre los modelos conceptuales (Arellano *et al.*, 2003; Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2010).

### Contexto geológico de las muestras (especímenes) estudiadas

#### Domos riolíticos (etapa de vulcanismo pre-caldera)

Estas rocas presentan bandeamiento de flujo, textura porfídica y esférulítica, y están compuestas por cuarzo, plagioclasa, biotita y algunos casos, moscovita, rodeados por una matriz vítrea (Carrasco-Núñez *et al.*, 2017b). Se tienen edades reportadas de U-Th en circón de  $270 \pm 17$  ka y  $155.7 \pm 4.9$  ka, y de  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  en plagioclasa de  $485.7 \pm 2.2$  ka y  $693 \pm 1.7$  ka (Carrasco-Núñez *et al.*, 2017a). Los domos riolíticos afloran al sur y oeste cerca del anillo caldérico, y en las partes norte y noroeste fuera de la caldera de Los Humeros.

#### Ignimbrita Xáltipan (etapa de vulcanismo de caldera)

Esta unidad está asociada al colapso de la caldera de Los Humeros y representa el evento explosivo más grande del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) con un volumen de  $280 \text{ km}^3$  (Cavazos-Álvarez y Carrasco-Núñez, 2020). Las ignimbritas presentan diferentes grados de soldamiento, y están compuestas por pómez riolíticas y riolíticas con una mineralogía que incluye plagioclasa, piroxenos, biotita y un bajo contenido de hornblenda (Carrasco-Núñez *et al.*, 2017b). Se tienen edades reportadas de U-Th en circón de

$158.4 \pm 8.3$  ka y  $180 \pm 13$  ka y de  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  en plagioclasa de  $153 \pm 13$  ka (Carrasco-Núñez *et al.*, 2017a). La ignimbrita Xáltipan está distribuida de forma radial alrededor de la caldera de Los Humeros.

#### Flujo de lava post-caldera de San Antonio-Las Chapas (etapa de vulcanismo post-caldera)

Estas rocas presentan una coloración gris oscura, con una textura porfídica, y vesicular. Están compuestas por plagioclasa, piroxenos (dos tipos de ellos) y bajo contenido de olivino, rodeados por una matriz vítrea (Carrasco-Núñez *et al.*, 2017b). Se han reportado edades de  $^{14}\text{C}$  de  $8.9 \pm 30$  ka (Carrasco *et al.*, 2017a). Esta unidad aflora en el borde y al norte de la caldera de Los Humeros, al SW de Teziutlán.

#### Flujo de lava post-caldera de El Pájaro (etapa de vulcanismo post-caldera)

Representa el vulcanismo efusivo más reciente de la caldera, asociado al fracturamiento anular del borde de la caldera. Es un flujo de lava en bloques de color oscuro que presenta bandas de flujo, exhibiendo una textura porfídica. Presenta una composición traquítica con minerales de cuarzo, plagioclasa, dos tipos de piroxenos, con poca presencia de anfíboles, todos ellos rodeados por una matriz cristalina (Carrasco-Núñez *et al.*, 2017b). Este flujo ha sido fechado por  $^{14}\text{C}$  2.8 ka (Carrasco *et al.*, 2017a). Los afloramientos de esta unidad se localizan dentro de la Caldera y se asocian al campo de flujos de lava formado en el borde meridional de la caldera de Los Humeros.

### METODOLOGÍA

La estructura de la metodología de este trabajo está sintetizada en la Figura 1. A continuación, se describen cada una de esas etapas.

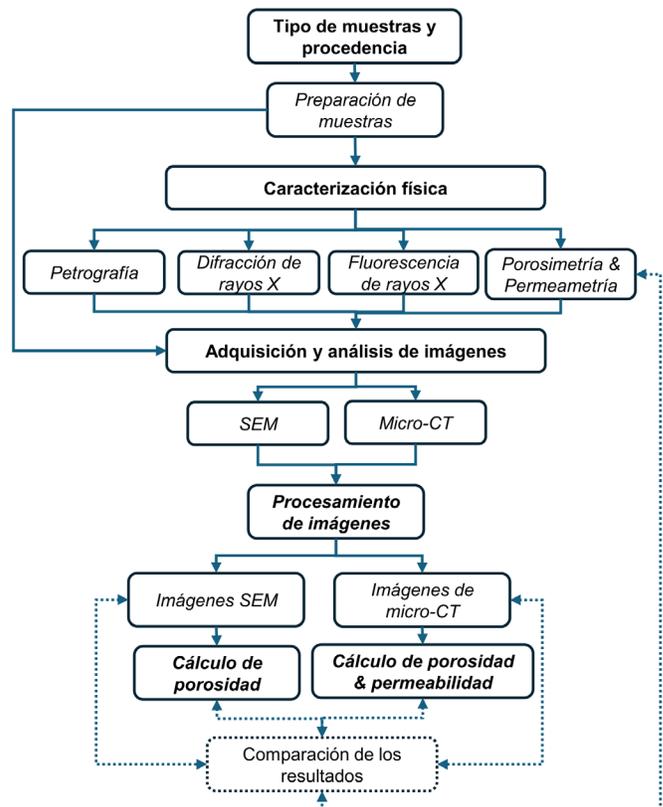


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología empleada en este trabajo.

### Tipo de muestras (especímenes) y procedencia

En este estudio se utilizaron siete muestras provenientes de varios afloramientos del CVLH, cuya ubicación se muestra en la Figura 2. Estas muestras provienen de las principales etapas evolutivas del CVLH que incluyen flujos de lava (pre-caldera y post-caldera) y un depósito piroclástico (Ignimbrita Xáltipan), presentando diferencias en composición química, emplazamiento y proceso eruptivo asociado. Estas muestras proveen un apropiado escenario para estudiar la correlación que existe entre la conducción de fluidos y la estructura del medio poroso. La litología, localización geográfica y geológica de esas muestras se presentan en la Tabla 1, Figura 2 y Figura 3.

Las muestras HK-14-22 y HK-14-43 son rocas riolíticas asociadas a la formación de domos riolíticos de biotita, ubicados en dos locaciones distintas, originados durante la etapa pre-caldera de Los Humeros. La muestra LH-15-03 pertenece a la Ignimbrita Xáltipan y está asociada a la etapa caldérica; se caracteriza por estar soldada e incluir fragmentos de clastos líticos y pómez en una matriz vítrea. Las muestras HJ-14-02 y HK-14-02 provenientes de locaciones distintas, pertenecen al flujo de lava de bloques El Pájaro, perteneciente a la etapa post-caldera y el cual consiste en lavas traquíticas de dos piroxenos. Finalmente, la muestra HK-14-30-M, de la cual se obtuvieron dos muestras “gemelas”, pertenece al flujo de lava post-caldera de San Antonio de Las Chapas, clasificada como andesita porfídica de piroxeno y olivino.

### Preparación de las muestras (especímenes)

Se extrajeron cinco cilindros de roca a partir de cada una de las muestras de mano adquiridas y dos cilindros de la muestra HK-14-

30-M (HK-14-30-M1 y HK-14-30-M2), con diámetro de aproximadamente una pulgada y longitudes variables (Tabla 2). Estas dimensiones de los cilindros fueron supeditadas por los requerimientos de los equipos utilizados para medir porosidad (indirectamente) y permeabilidad. Este procedimiento fue realizado por el Laboratorio de Petrofísica de la ENES-Morelia (UNAM). Para su extracción, el personal utilizó específicamente un taladro eléctrico Husqvarna DM340 Core Drilling Machine con una broca de 50.80 mm (Figura 4). Este equipo utiliza una broca de 38 mm, para rescatar un cilindro de una medida de 26.4 mm de diámetro con longitudes variables, bajo las normas estándar ASTM D4543-19 (ASTM International, 2019). De esta manera, se obtuvieron cilindros de roca de 26.4 mm de diámetro con longitudes entre 39 a 59 mm, y solo para el caso especial de la muestra HK-14-22, la longitud fue de 12 mm, ya que por sus condiciones físicas frágiles, probablemente debido a su gran cantidad de fracturas, solo se logró obtener este tamaño.

Las dimensiones finales de los siete cilindros de roca se exponen en las tres primeras columnas de la Tabla 2 y en la Figura 5. Durante la preparación de los cilindros de roca, se realizaron cortes laminales en cada extremo para ser utilizados en la preparación de láminas delgadas para análisis petrográfico. Las láminas delgadas se prepararon pulidas y sin cubierta en el Taller de Laminación del Instituto de Geociencias (UNAM) para poder ser utilizadas tanto en el microscopio óptico como en el SEM. Sin embargo, como la conducción en dichas láminas no fue lo suficiente para ser observadas sin recubrimiento en el SEM, se extrajeron cilindros de 3 mm de diámetro (“minicores”) a partir de los cilindros de 26.4 mm de diámetro (después de que estos últimos fueran usados en las demás mediciones). Una vez adquiridos estos minicores

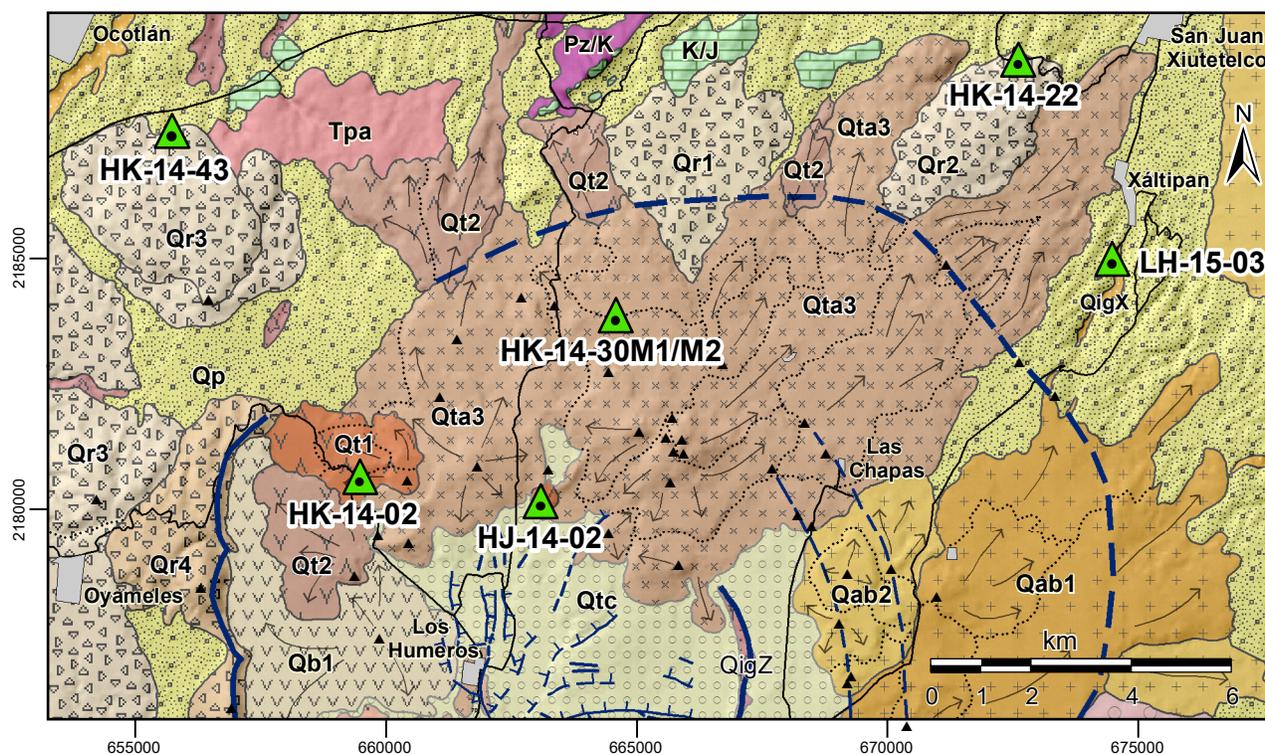


Figura 2. Mapa del sector septentrional de la caldera de Los Humeros modificado de Carrasco-Núñez *et al.* (2017a), el cual se utiliza para visualizar la localización de los sitios de colecta de las muestras utilizadas (triángulos verdes) en el presente trabajo. Los triángulos verdes indican las locaciones de las muestras, cuyos nombres se encuentran debajo de cada uno de ellos. Los símbolos de las unidades litológicas corresponden a: Tpa – lavas andesíticas de Teziutlán; QigX – ignimbrita Xáltipan; QigZ – ignimbrita Zaragoza; K/J – calizas y lutitas con intrusiones andesíticas; Pz/K – granodioritas y esquistos (schists); Qr1 – domos riolíticos (44.8-50.7 ka); Qr3 – domos riolíticos (55.7-270 ka); Qr4 – domos riolíticos (485-693 ka); Qt2 – traquitas Chicomiapa-Los Parajes; Qp – depósitos piroclásticos no diferenciados; Qt1 – traquitas El Pájaro; Qt2 – traquitas Chicomiapa-Los Parajes; Qta3 – traquiandesitas San Antonio-Las Chapas.

Tabla 1. Ubicación y unidad litológica de las muestras utilizadas en este estudio.

Muestra	Localidad		Coordenadas UTM		Clasificación	Unidad litológica
	Geográfica	Geológica	X	Y		
LH-15-03	Xáltipan	Caldera	674359	2184836	Ignimbrita	Ignimbrita Xáltipan
HK-14-22	Teziutlán	Pre-caldera	672583	2188799	Riolita	Domos riolíticos
HK-14-43	Xonocuaatla	Pre-caldera	655591	2187477	Riolita	Domos riolíticos
HJ-14-02	San Antonio	Post-caldera	663044	2180054	Dacita microporfídica	Traquita El Pájaro
HK-14-02	Escarpe occidental	Post-caldera	659387	2180559	Dacita porfídica	Traquita El Pájaro
HK-14-30-M1	San Antonio	Post-caldera	664499	2183781	Andesita porfídica	Traquiandesita San Antonio de Las Chapas
HK-14-30-M2						

(previamente lavados y descontaminados), se recubrió con oro una de las caras planas que estaría en contacto con el haz de electrones, para evitar la distorsión y mejorar la calidad de las imágenes, y se sujetaron a un porta muestras con un adhesivo especial conductor. Estos minicores también se utilizaron para obtener imágenes de micro-CT, antes de ser recubiertos con oro. Por otra parte, de los dos extremos de los cilindros de 26.4 mm de diámetro, se obtuvieron porciones extras de 10 gr para triturarlas con una prensa hidráulica y pulverizarlas pasándolas por un tamiz de malla del número 250 a 300. Después de este tratamiento, las porciones pulverizadas resultantes

se introdujeron en una máquina ultrasónica para eliminar rastros de materiales orgánicos, para finalmente ser utilizadas en los análisis de fluorescencia y difracción de rayos X.

Los cilindros de roca también se utilizaron para adquirir imágenes de micro-CT. Sin embargo, a estas dimensiones (~26.4 mm de diámetro y resolución correspondiente de 26.85 μm/voxel) no se logró detectar el sistema poroso en la mayoría de las muestras. Entonces, para obtener imágenes de micro-CT que pudieran capturar el sistema poroso en estas muestras, se extrajeron submuestras cilíndricas más pequeñas (minicores) de 10 mm y de 3 mm de diámetro (Tabla 2) a

ERA PERIODO EPOCA	GRUPO	FORMACIÓN	EDAD	
HOLEOCENO	GRUPO POST CALDERA DEL CVLH	HJ-14-02 Traquiandesitas el Pájaro HK-14-02	2.8 ka (1)	
		Lavas Basálticas de Olivino	3.8 ka (1)	
		Basaltos Tepeyahualco		
		Traquiandesitas Sarabia		
		Andesitas Basálticas El Limón		
		Andesitas Basálticas Atecax		
		Toba Cuicuiltic	7.3 ka (5)	
		Traquiandesitas Victoria		
		HK-14-30-M1 Traquiandesitas S. Antonio de las Chapas HK-14-30-M2	8.9 ka (1)	
		Andesitas Basálticas Orilla del Monte		
PLEISTOCENO	GRUPO POST CALDERA DEL CVLH	Toba Llano	28.27 ka (7)	
		Traquiandesitas Maxtaloya		
		Miembro Xoxoxtic		
		Traquiandesitas Chicomiapa-Los pajares Domos Riolíticos	44.8-50.7 ka (4)	
		GRUPO CALDÉRICO DEL CVLH	Ignimbrita Zaragoza	69 ka (4)
			Toba Faby	70 ka (4)
			Lavas Riolíticas Los Potreros	74 ka (4)
			Ignimbrita Xáltipan LH-15-03	164 ka (4)
		GRUPO PRE-CALDERA DEL CVLH	HK-14-22 Domos Riolíticos HK-14-43	155.7-270 ka (6)
			Andesitas y Traquiandesitas Cofre de Perote	300-510 ka (2)
Domos Riolíticos	485-693 ka (4)			
Lavas Andesíticas Teziutlán	1.46-2.61 Ma (3)			
PLIOCENO	GRUPO PRE-CALDERA DEL CVLH	Lavas Andesíticas y Dacíticas	8.9-10.5 Ma (8)	
MIOCENO		Granitos	15.12 Ma (1)	
JURÁSICO CRETÁCICO	BASAMENTO PRE-VOLCÁNICO DEL CVTM	Sedimentarias (Calizas y Lutitas) y Intrusiones	131 +- 5 Ma (1)	
PALEOZOICO		Granodioritas y Esquistos	207 +- 7 (8)	

Figura 3. Localización de las muestras estudiadas (marcadas en amarillo) en la columna estratigráfica del complejo volcánico Los Humeros, con edades reportadas por: (1) Carrasco-Núñez *et al.* (2017b); (2) Carrasco-Núñez *et al.* (2010); (3) Carrasco-Núñez *et al.* (2017a); (4) Carrasco-Núñez *et al.* (2018); (5) Dávila-Harris y Carrasco-Núñez (2014); (6) Ferriz y Mahood (1984); (7) Rojas-Ortega (2016) y (8) Yáñez-García y García-Durán (1982). Tomado y modificado de Huerta-Luna (2018).

Tabla 2. Dimensiones de las muestras utilizadas en este estudio.

Muestra	26.4 mm de diámetro		10 mm de diámetro		3 mm de diámetro			
	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	A		B	
					Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)
LH-15-03	26.387	55.015	10.0	11.0	3.0	~3.0	3.0	~3.0
HK-14-22	26.443	12.910			NA*			
HK-14-43	26.480	53.813	10.0	13.0	3.0	~3.0	3.0	~3.0
HJ-14-02	26.493	55.453	10.0	5.0	3.0	~3.0	3.0	~3.0
HK-14-02	26.413	59.310	10.0	6.0	3.0	~3.0	3.0	~3.0
HK-14-30-M1	26.433	39.675	10.0	11.0	3.0	~3.0	3.0	~3.0
HK-14-30-M2	26.463	40.123	10.0	11.0	3.0	~3.0	3.0	~3.0

NA\*: para la muestra HK-14-22 no fue posible obtener muestras de 10 y 3 mm de diámetro.

partir de los cilindros de roca de ~26.4 mm de diámetro. Los minicores de 3 mm fueron utilizados para el SEM, y todos fueron extraídos con un taladro de alta precisión modelo Dremel 4000. La razón principal de utilizar los minicores en el micro-CT para obtener mayor resolución es debido a que a menor tamaño de la muestra se puede lograr una mejor resolución en las imágenes, ya que, al haber menor cantidad de material, se logra una mayor densidad de rayos X que pueden traspasar la muestra. De hecho, esto ha sido reportado previamente por otros autores, como por ejemplo (a) Pardo *et al.* (2014) utilizaron submuestras cilíndricas de 10 mm y 5 mm de diámetro para resolver muestras pómez con vesículas “gruesas” (4  $\mu\text{m}$ ) y “finas” (2  $\mu\text{m}$ ), respectivamente; (b) Heinrich *et al.* (2020) utilizaron submuestras cilíndricas de 1.4 mm de diámetro para poder resolver (~2  $\mu\text{m}$ ) densidades representativas de muestras de andesitas basálticas; (c) Torres-Orozco *et al.* (2023) utilizaron fragmentos de rocas (cm-mm) de diferentes fases eruptivas para obtener resoluciones de ~1  $\mu\text{m}$ .

#### Caracterización física

Las técnicas utilizadas en este estudio fueron: petrografía, difracción de rayos X (DFX), fluorescencia de rayos X (FRX), porosimetría, permeametría, microscopía electrónica de barrido (SEM), y microtomografía de rayos X (micro-CT). De manera conjunta se consideran como mediciones analíticas a todas las medidas físicas que se obtuvieron a partir de las técnicas utilizadas (DRX, FRX, porosimetría y permeametría). Finalmente, los cálculos se refieren a la medición digital y de simulaciones, respectivamente, de la porosidad y permeabilidad obtenidas a partir de las imágenes SEM y de micro-CT.

#### Petrografía

A partir de las láminas delgadas obtenidas se realizó la descripción de las principales características petrográficas (mineralogía, textura, y consecuente litología). Para esto se utilizó un microscopio petrográfico Nikon 150423 del Laboratorio de Vulcanología Física y un microscopio Nikon Eclipse Modelo Lv100Pol con una cámara digital integrada tipo Qimaging MicroPublisher 3.3 with real-time viewing (RTV) del Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X (LUMIR), ambos ubicados en el Instituto de Geociencias (Campus UNAM Juriquilla). Para ello se trabajó, más específicamente, en identificar los principales minerales formadores de las rocas presentes, además de su forma, tamaño, abundancia y aspectos texturales, con lo que se confirmaron las correspondientes litologías.

#### Difracción y fluorescencia de rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica que consiste en inyectar rayos X a una muestra y capturar la difracción de estos rayos. La difracción de los rayos X se produce en direcciones y energías específicas que son características de las estructuras cristalinas que componen la muestra. Con esto se obtiene un difractograma donde se pueden identificar los diversos componentes de la muestra y sus correspondientes proporciones relativas. Para este estudio se utilizó polvo de esquirlas provenientes de los cilindros extraídos previamente. Se utilizó el equipo Rigaku modelo Ultima IV. Para los análisis cuantitativos se utilizaron los métodos de análisis de Rietveld y la Relación de Intensidades de Referencia (RIR) (ej., Hubbard y Snyder, 1988).

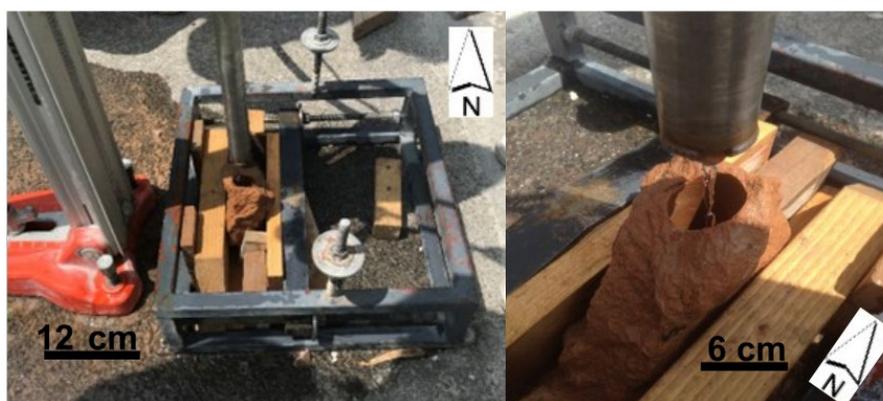


Figura 4. Ejemplo de la extracción de cilindros de roca mediante un taladro eléctrico Husqvarna DM340 Core Drilling Machine con una broca de 50.80 mm (2 pulgadas). Realizado por el Laboratorio de Petrofísica de la ENES-Morelia (UNAM).

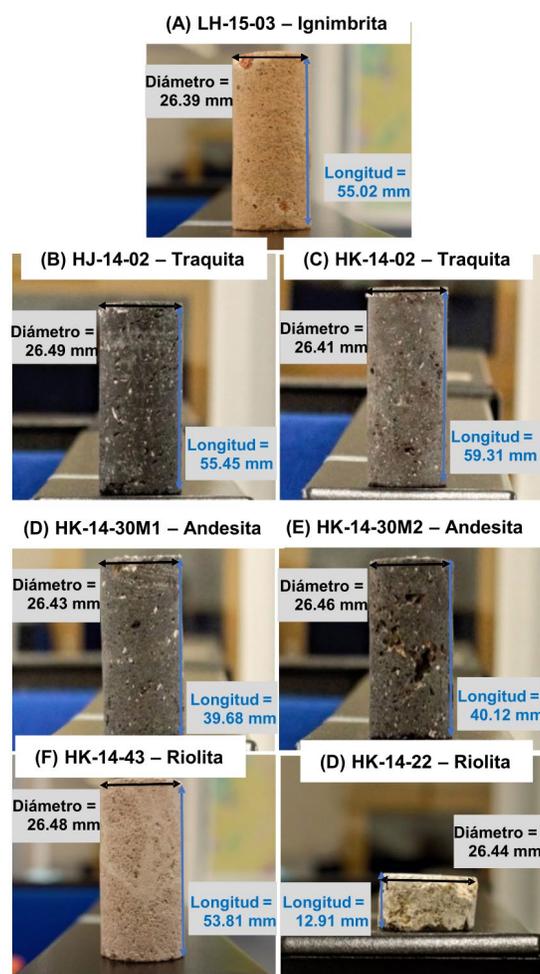


Figura 5. Fotografía de las muestras utilizadas en este estudio. Cilindros de roca con longitud de 50.4mm y un diámetro de 26.4mm, excluyendo la muestra HK-14-22 que no logró obtenerse a esa longitud. (A) LH-15-03, (B) HJ-14-02, (C) HK-14-02, (D) HK-14-30-M1, (E) HK-14-30-M2, (F) HK-14-43, (G) HK-14-22.

El análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) se realizó para complementar los análisis de difracción de rayos X, con el fin de verificar si existían minerales con algún tipo de alteración que pudieran estar afectando al discretizar los cristales o compuestos en las rocas pulverizadas (ej., Valentinuzzi, 2008). Se utilizó un equipo BRUKER modelo S2 PUMA. La prueba de fluorescencia de rayos X consiste en la determinación de óxidos presentes en las muestras, arrojando una gráfica espectral que despliega picos característicos, en este caso los encontrados para las siete muestras estudiadas. Ambas técnicas y análisis, de FRX y DRX, fueron realizados por el personal del Laboratorio de Difracción de Rayos X en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA), UNAM, campus Juriquilla.

#### Porosimetría y permeametría

Las mediciones analíticas de porosidad y permeabilidad fueron realizadas por el grupo de Petrofísica de la ENES-Morelia (UNAM) en los cilindros de roca de ~26.4 mm de diámetro (Figura 5). Dichas mediciones son utilizadas en el presente trabajo para caracterizar los cilindros de 26.4 mm de diámetro y como referencia en el análisis de las imágenes estudiadas.

Para la medición de la porosidad se utilizó el picnómetro de helio modelo ULTRAPIC 1200e (Quantachrome Instruments). En este se utiliza el principio de desplazamiento de gases (ley de Boyle), específicamente mediante la expansión del gas helio, para obtener

la densidad de la fase sólida de la roca y su correspondiente volumen ( $V_s = \text{masa de la roca seca} / \text{densidad de la fase sólida}$ ). De allí, se determina el volumen poroso llenado con helio, cuya pureza en este caso es de 99.999%. Más específicamente, el volumen total ( $V_t$ ) de la muestra cilíndrica de diámetro de 26.4 mm ( $d$ ) y longitud ( $h$ ) se calcula a partir de  $V_t = \pi(d/2)^2 h$ , y es igual a la suma del volumen poroso,  $V_p$ , más el volumen  $V_s$ . Entonces, para finalmente calcular la porosidad total, se utiliza el volumen poroso ( $V_p = V_t - V_s$ ) dividido entre el volumen total ( $V_p/V_t$ ). Dicho método sigue la norma UNE-EN 1936 (Asociación Española de Normalización, 2007), y el picnómetro ULTRAPIC para determinar la densidad de la fase sólida y el helio, en lugar de agua, como fluido saturante, y se ha utilizado rutinariamente en muchos trabajos para calcular la porosidad total de las rocas (ej., Pardo *et al.*, 2014; Sánchez-Núñez *et al.*, 2021; Pola *et al.*, 2024; Torres-Orozco *et al.*, 2017).

Para la medición de la permeabilidad se utilizó el permeámetro GasPerm modelo Ap-123-002-0 (VINCI Technologies). Este equipo aplica la ley de Darcy utilizando nitrógeno, en este caso en particular con 99.997 % de pureza, como fluido saturante. Se realizaron las mediciones a temperatura ambiente, con una presión de confinamiento de 370 psi y una tasa (caudal) de flujo variable entre 1 y 500 cc/min en dirección axial de las muestras cilíndricas. Las mediciones correspondientes fueron la presión del flujo de fluido de entrada y de salida de la muestra (diferencial de presión), para varios caudales de flujo

para obtener varios puntos de medición y poder obtener un valor más preciso de la permeabilidad. Se calculó la permeabilidad según Darcy (perm= caudal multiplicado por la longitud de la muestra y la viscosidad del helio dividido entre el diferencial de presión y el área transversal de la muestra cilíndrica) para cada punto hasta obtener estabilidad en las mediciones. Dicha técnica utiliza la norma ASTM D4525-13e2 (ASTM International, 2013), ampliamente utilizada (ej., Konecny y Kozusnikova, 2011; Joseph *et al.*, 2019; Ramírez-Guzmán *et al.*, 2024).

### Adquisición y análisis de imágenes

#### SEM

El SEM es una técnica no destructiva que ayuda a visualizar y cuantificar la microestructura de las rocas (u otros materiales) a partir del escaneo de la muestra con un haz de electrones de alta energía (0.1 – 30 keV). En particular, para el presente estudio se utilizaron las señales de los electrones retro-dispersados (BSEs) y electrones secundarios (SEs), a partir de un haz de electrones de 15 kV, para generar imágenes de la topografía de las muestras (ej., Damazo *et al.*, 2011). Se utilizó el SEM JEOL modelo JSM-6060LV del Laboratorio de Microscopía del CFATA, UNAM, campus Juriquilla. Para obtener estas imágenes se utilizaron minicores de 3 mm de diámetro a partir de los cilindros de 26.4 mm de diámetro. La cara que estaba en contacto con el haz de electrones se recubrió con una capa de oro para evitar la distorsión y mejorar la calidad de las imágenes.

En el presente trabajo se obtuvieron imágenes SEM de magnificación variable, entre 60X y 4500X. Sin embargo, solo las imágenes de 750X de magnificación correspondieron a una resolución cercana (20  $\mu\text{m}/\text{píxel}$ ) a la de las imágenes de micro-CT (26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ ). Las imágenes SEM obtenidas se utilizaron como referencia, para comparar, y evaluar el espacio poroso. Es de notar que la unidad de voxel es equivalente al píxel en imágenes 3D.

#### Micro-CT

La adquisición de las imágenes de micro-CT, se llevó a cabo en el microtomógrafo Versa 510 Xradia de ZEISS en el Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X (LUMIR) del Instituto de Geociencias, UNAM, campus Juriquilla. El equipo cuenta con un revólver con tres objetivos de aumento óptico (0.4X, 4X, 20X), una fuente de rayos X que genera un potencial entre ánodo y cátodo de entre 30 kV y 160 kV, una base rotatoria de 360°, una cámara CCD junto al centellador, un CPU y una pantalla desde donde se maneja y controla la adquisición de las microtomografías (Arteaga, 2018).

Inicialmente se adquirieron imágenes de micro-CT de cada uno de los siete cilindros de ~26.4 mm de diámetro, obteniéndose a una resolución de 26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ . Luego, como no se logró detectar todo el sistema poroso a esta resolución, se extrajeron submuestras más pequeñas (minicores) de 10 mm y de 3 mm de diámetro (Figura 6), con la finalidad de obtener imágenes de micro-CT de mayor resolución y poder capturar el sistema poroso completo en estas muestras. Para ello, se cortó un cilindro de 26.4 mm de diámetro, delimitando la zona de adquisición anterior. Con estos minicores se alcanzaron resoluciones de 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  y 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ , respectivamente. En la Tabla 3 se resumen las dimensiones y parámetros de adquisición de las imágenes.

#### Procesamiento de imágenes

**Imágenes SEM.** Las imágenes SEM se procesaron con el software Avizo 9.01 de ThermoFisher Scientific. Se filtraron con *Non-local-means* y *Anisotropic Diffusion*. El filtro *Non-local-means* se utilizó para eliminar el ruido blanco (estática), lo cual mejoró la inspección cualitativa de la imagen. El filtro *Anisotropic Diffusion* es una potente

herramienta para la calidad de las imágenes mejorando la eficiencia computacional del análisis (Torres-Orozco *et al.*, 2023; Torres-Orozco *et al.*, 2024). Las imágenes SEM en 2D se segmentaron para poder distinguir la parte porosa y obtener su porosidad a ser comparada con las imágenes de micro-CT. Para ello, se seleccionó la resolución de imágenes SEM más cercana (20  $\mu\text{m}/\text{píxel}$ ) a la de las imágenes 3D (26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ ).

**Imágenes de micro-CT.** Para el procesamiento de las imágenes de micro-CT se utilizó el software comercial Avizo 9.01 de ThermoFisher Scientific, con los pasos descritos a continuación (Figura 7). Es de notar que estos pasos son empleados rutinariamente de forma general para el procesamiento de micro-CT en rocas, y difieren principalmente en los parámetros específicos requeridos de acuerdo a las particularidades de cada imagen (ej., Pardo *et al.*, 2014; Cid *et al.*, 2021; Torres-Orozco *et al.*, 2024).

Primero, se cargaron las tomografías en el software Avizo para dar inicio al procesamiento de las imágenes. En cada una de las imágenes 3D de los cilindros de las muestras, se eligió y cortó el centro de la imagen a través del módulo Extract subvolume7. Con el propósito de incluir el mayor porcentaje de las características de las muestras (poros, fracturas, líticos, etc.) y eliminar los bordes de la imagen 3D. Es importante mencionar que cada uno de estos sub-volumenes presentan distintos tamaños debido a las diferentes dimensiones originales de las muestras en forma de cilindros y minicores (Tabla 2).

Segundo, se procedió al filtrado, el cual fue realizado cuidadosamente, debido a que un uso excesivo de filtros puede opacar o eliminar algunas características (ej., poros, fracturas y minerales). En este trabajo se implementaron particularmente dos filtros: *Unsharp Masking* y *Anisotropic Diffusion*. Ambos filtros se enfocan en resaltar los bordes de los objetos, en este caso los límites de los poros que los separan de la matriz (parte sólida de la roca), aumentando su contraste en zonas donde se pudiera presentar el problema o efecto de “volumen parcial” (Schlüter *et al.*, 2014). Mas específicamente, se aplicó el módulo *Filter Sandbox* y se seleccionó el filtro *Unsharp Masking* y posteriormente *Anisotropic Diffusion*.

Tercero, la segmentación, o diferenciación de la fase porosa de la sólida se logró bajo el método de Otsu, el cual, con base en los valores de intensidad de gris en la imagen (dentro de cada píxel) delimita estas fases agrupándolas en dos (o más) clases, lo cual se representa a través de un histograma. Comúnmente en el histograma, en la cresta del lado izquierdo se representan todos los valores de intensidad de

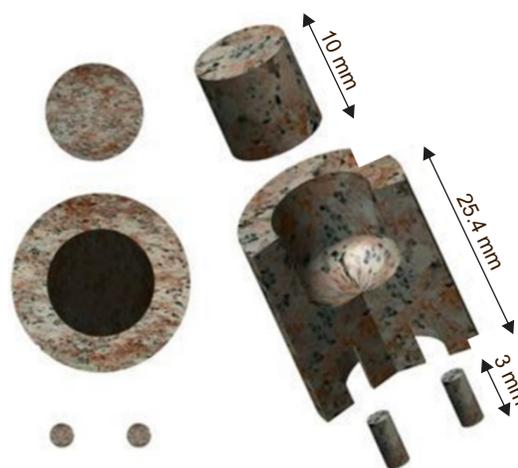


Figura 6. Extracción de los minicores a partir del cilindro de 26.4 mm de diámetro.

Tabla 3. Datos de adquisición de las imágenes de Micro-CT.

Muestra	Diámetro (mm)	Tiempo de adquisición (horas)	Voltaje (kV)	Potencia (W)	Resolución (mm/voxel)
HK-14-22	26.4	1.4	140	10	26.85
	10.0	2.5	60	5	10.0
	3.0	NA	NA	NA	NA
HK-14-43	26.4	1.5	100	9	26.85
	10.0	1.9	60	5	10.0
	3.0	1.8	40	3	3.0
LH-15-03	26.4	1.4	110	10	26.85
	10.0	1.6	70	6	10.0
	3.0	1.6	40	3	3.0
HJ-14-02	26.4	1.5	140	10	26.85
	10.0	1.6	70	6	10.0
	3.0	1.4	50	4	3.0
HK-14-02	26.4	1.4	140	10	26.85
	10.0	1.6	70	6	10.0
	3.0	1.4	50	4	3.0
HK-14-30-M1	26.4	1.4	140	10	26.85
	10.0	1.2	80	7	10.0
	3.0	1.8	50	4	3.0
HK-14-30-M2	26.4	1.4	140	10	26.85
	10.0	1.5	70	6	10.0
	3.0	1.5	50	4	3.0

gris de la fase porosa y en la cresta del lado derecho los de la fase sólida (minerales). El módulo para llevar a cabo esta tarea fue *Auto Thresholding11* (algoritmo de Otsu). De manera inicial se determinan los valores de la fase porosa y sólida. Estos valores no son definitivos, son usados como referencia para ser iterados las veces necesarias para que sean acordes con la geometría de los poros de la muestra que se esté analizando. Se usó el criterio de que estos valores calculados no sobrestimaran el espacio poroso presente en cada imagen, además que respetara la geometría de los poros. Finalmente, los valores iterados que se consideran correctos son ingresados al módulo *Interactive Thresholding12*, esto da como resultado imágenes en formato binario (imágenes binarizadas); en otras palabras, la fase porosa dentro de la imagen ahora son 1 (unos) y la sólida 0 (ceros).

#### Cálculo de porosidad - imágenes SEM

La porosidad total,  $\phi_T$ , se obtuvo con el empleo del software comercial Avizo 9.01 de ThermoFisher Scientific para la tercera iteración de valores generados por la herramienta *Auto Thresholding* e implementado a su vez la herramienta *Interactive Thresholding*. Los datos obtenidos dieron fiables a la tercera iteración ya que los valores se encontraban acorde a los espacios porosos y no se sobreestimaba la porosidad. Por último, se generó un archivo, al cual se le aplica la función de "volume fraction", la cual calcula finalmente la porosidad en las imágenes ya filtradas y segmentadas (ej., Andrä *et al.*, 2013; Madonna *et al.*, 2012).

#### Cálculo de porosidad y permeabilidad - imágenes de micro-CT

Una vez procesadas las imágenes, a partir de su binarización, se computó el volumen de porosidad mediante el módulo *Volume Fraction* el cual arroja un valor de  $\phi_T$  (porosidad total) del subvolumen particular de cada muestra (ej., Cid *et al.*, 2017; Torres-Orozco *et al.*,

2023). Para conocer la fracción de la porosidad que presenta conectividad se usó el módulo *Axis Connectivity* y la función *Volume Fraction*. Al conocer la fracción del espacio poroso que presenta conectividad se incluyó el módulo de *Absolute permeability experiment simulation*, el cual realiza una simulación numérica del flujo de fluido en el espacio poroso, a través de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes usando volúmenes finitos (Whitaker, 1999; Harlow y Welch, 1965). Al obtener el campo de velocidades de flujo se puede calcular el valor de permeabilidad de la roca en una dirección o varias direcciones determinadas. Estas simulaciones son individuales para cada muestra y pueden demorar aproximadamente entre 2 y 6 días en finalizar, de acuerdo con el tamaño del subvolumen o ROI ("Region of Interest") en su caso. Los valores de porosidad y permeabilidad calculados y simulados, respectivamente, fueron comparados con las mediciones analíticas correspondientes, las cuales sirven de referencia. Respecto a la simulación de permeabilidad se realizó únicamente en las imágenes cuyo espacio poroso presentó conectividad en las imágenes de 26, 10 y 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ , respectivamente, y solo en la dirección axial (misma de las mediciones analíticas).

## RESULTADOS

### Petrografía

A partir de las láminas delgadas obtenidas de cada muestra, se realizaron estudios petrográficos con los cuales se identificaron los principales minerales formadores de las muestras, se obtuvo su abundancia relativa y se definió su principal textura. Con esto se realizó la correspondiente clasificación. La Tabla 4 presenta un resumen de los análisis petrográficos, incluyendo la determinación de los contenidos minerales y texturas identificadas con sus correspondientes litologías.

### Mineralogía a partir de difracción y fluorescencia de rayos X

Los minerales encontrados con DRX no estaban en sus fases puras o características; sino que, algunos como la biotita, diópsido y augita presentaron elementos adicionales en sus composiciones. Con los valores obtenidos a partir de FRX, se logró ajustar la cuantificación de los minerales presentes en las siete muestras. La Tabla 5 presenta la mineralogía obtenida para cada muestra, y la Figura 8 muestra un ejemplo de los difractogramas obtenidos, particularmente para la muestra HK-14-30-M1, con los valores típicos de referencia para cada mineral. A pesar del esfuerzo en realizar las mediciones lo más precisas posible, debido a la variabilidad de la preparación de las muestras y que algunos de los minerales presentes como la biotita, diópsido y augita presentaron elementos adicionales en sus composiciones, no fue posible detectar todos los minerales de forma completa. Por ejemplo, esto último ocurrió más específicamente en las muestras HJ-14-02 y la HK-14-43, y en especial la LH-15-03 al tener mucho vidrio silíceo amorfo, no fue posible una detección precisa de todos sus minerales. A pesar de esto, es de notar que estos resultados corroboran, de forma más detallada, la estimación mineralógica que se obtuvo en el análisis petrográfico de las láminas delgadas (Tabla 4).

### Determinación de la porosidad

La Tabla 6 muestra un resumen de las porosidades obtenidas con las diferentes técnicas utilizadas; específicamente, la segunda columna despliega las porosidades obtenidas a partir de mediciones analíticas. Los valores medidos analíticamente de porosidad están en el rango de [0.09, 0.310] unidades en unidades fraccionales de  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . Es de notar que casi todas las muestras tienen una porosidad total mayor a 0.20, a excepción de la traquita HJ-14-02 con una porosidad de 0.093. Para un entendimiento más profundo de estos valores, a continuación, se

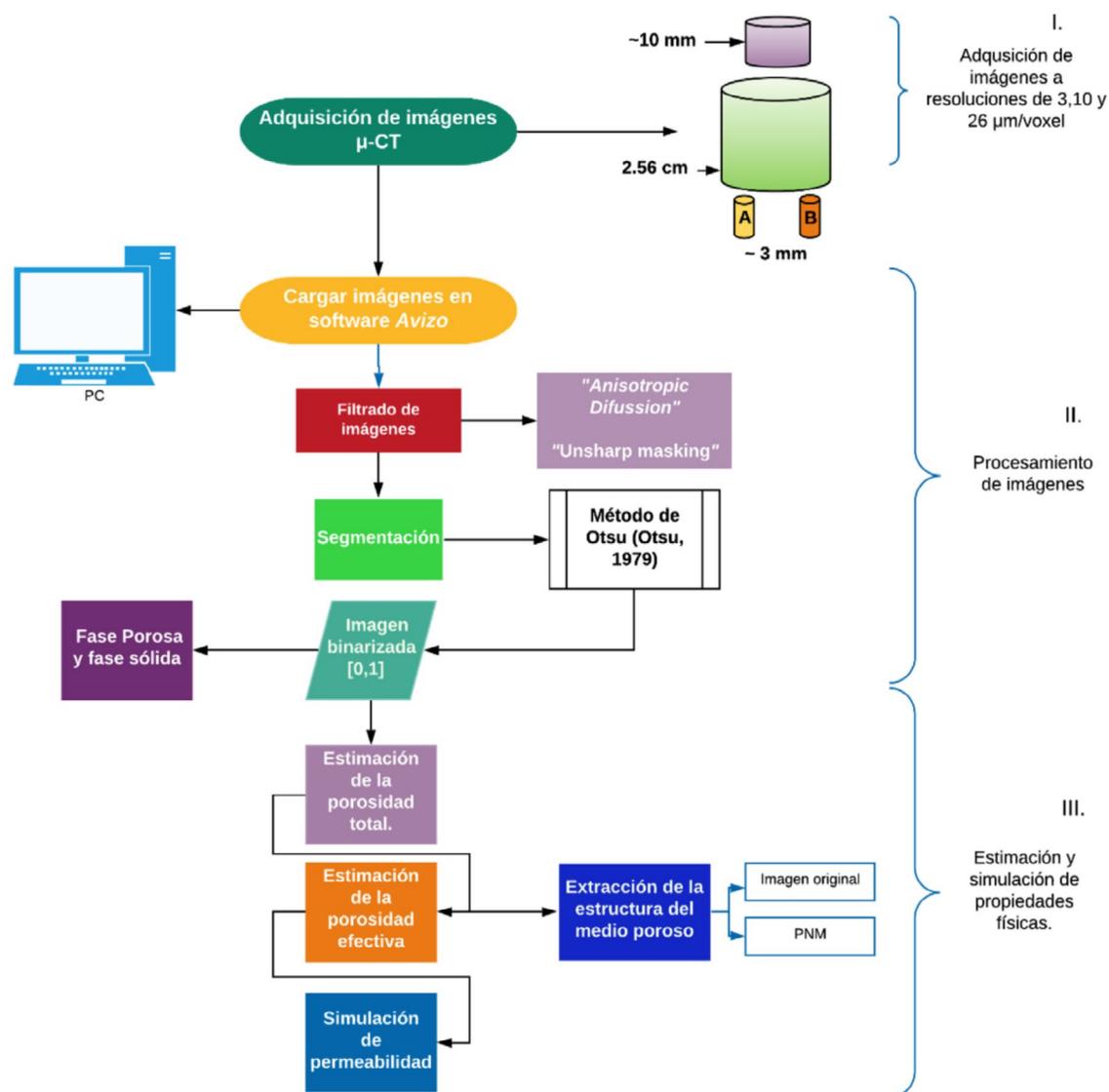


Figura 7. Flujo de trabajo en el procesamiento y extracciones de propiedades físicas en las muestras de roca digitalizadas.

exponen y analizan en detalle los resultados de las imágenes SEM y de micro-CT.

### Imágenes SEM

La estructura y tamaño de los poros observados a través de imágenes SEM se resume en la Tabla 7. En general, las formas de los poros son irregulares, y en algunas muestras se observan poros casi esféricos y ovalados, como por ejemplo en la muestra LH-15-03.

La porosidad medida en las imágenes SEM, después del procesamiento, a una resolución de 20 µm/píxel (750X) da valores entre 0.027 (HJ-14-02) y 0.095 (HK-14-30M1). La Tabla 6 muestra un resumen de las porosidades obtenidas con varias técnicas; específicamente, la tercera columna despliega las porosidades obtenidas a partir de imágenes SEM, y la cuarta columna la comparación de ésta con el valor experimental. Para comparar las porosidades a partir de imágenes y las obtenidas analíticamente, se calculó la relación  $\frac{\phi_{total}}{\phi_{exp}}$ . Los valores obtenidos de porosidad en las imágenes SEM (2D) son mucho menores que los medidos analíticamente ( $\frac{\phi_{total}}{\phi_{exp}} \ll 1$ ). Probablemente, esto se deba a que a esta resolución de 20 µm/píxel no se captan

gran parte de los poros, como se muestra en las imágenes a 4500X (~120 µm/píxel) de la Tabla 7 donde se pueden apreciar poros muy pequeños. Además, al ser la escala de medición de estas dos técnicas (milímetros y centímetros) y sus dimensiones (2D y 3D) diferentes, realizadas en muestras muy heterogéneas, no es de esperar obtener valores similares, tal como ha ocurrido en algunos casos, como, por ejemplo, Rotella *et al.*, (2014), Karimpouli *et al.*, (2020), entre otros.

### Imágenes de micro-CT

Se emplearon las imágenes de micro-CT para visualizar el espacio poroso en 3D de las muestras. Las observaciones realizadas se resumen en la Tabla 8. El análisis se enfocó en las imágenes de 3 µm/voxel ya que son las de más alta resolución y en las que se pudo obtener imágenes más precisas del espacio poroso, similar a Buono *et al.* (2023). Cabe destacar que se trató de adquirir dos minicoros de 3 mm a partir de los cilindros de ~26.4 mm de diámetro de cada muestra, con el propósito de tener imágenes de mayor resolución (3 µm/voxel). Sin embargo, solo se pudo adquirir el par de minicoros de 3 mm en cuatro de las muestras, a excepción de la muestra HJ-14-02

Tabla 4. Mineralogía y clasificación de las rocas estudiadas por análisis petrográfico.

Muestra	Mineralogía	Textura	Localidad	Grupo	Litología	Coordenadas (UTM)
HK-14-22	45 % feldespato potásico 38 % cuarzo 15 % plagioclasa 2 % biotita	Porfídica	Teziutlán	Pre-Caldérico	Riolita	(672583, 2188799)
HK-14-43	49 % feldespato potásico 43 % cuarzo 7 % plagioclasa 1 % biotita	Porfídica	Xonocuautila		Riolita	(655591, 2187477)
LH-15-03	75 % vidrio silícico 17 % feldespato potásico 5 % plagioclasa 2 % clinopiroxeno 1 % óxidos	Afanítica	Xáltipan	Caldérico	Ignimbrita (Toba vitro-lítica)	(674359, 2184836)
HJ-14-02	68 % feldespato potásico 27 % plagioclasa 2 % clinopiroxeno 1 % olivino 1 % óxidos <1 % Cuarzo	Porfídica	San Antonio	Primer grupo post-caldérico	Traquita	(659387, 2180559)
HK-14-02	63 % feldespato potásico 31 % plagioclasa 3 % clinopiroxeno 1 % olivino 1 % óxidos <1 % cuarzo	Porfídica	San Antonio		Traquita	(663044, 2180054)
HK-14-30-M1	55 % plagioclasa 26 % feldespato potásico 13 % clinopiroxeno 2 % olivino 1 % óxidos <1 % Cuarzo	Porfídica	San Antonio Las Chapas	Segundo grupo post-caldérico	Andesita	(664499, 2183781)
HK-14-30-M2	58 % plagioclasa 23 % feldespato potásico 15 % clinopiroxeno 2 % olivino 1 % óxidos <1 % Cuarzo	Porfídica	San Antonio Las Chapas		Andesita	(664499, 2183781)

donde se pudo adquirir un solo minicore de 3 mm y la muestra HK-14-22 donde no fue posible obtener ningún minicore de 3 mm de diámetro. La Figura 9 presenta un ejemplo de la visualización del sistema poroso en imágenes de micro-CT a una resolución de 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ , para los minicores de 3 mm de diámetro; donde A y B son los dos minicores tomados en cada muestra.

Las porosidades obtenidas a partir de las imágenes de micro-CT a resolución de 26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  tienen un rango de [0.017, 0.065], a resolución de 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  tienen un rango de [0.044, 0.199] y a resolución de 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  tienen un rango de [0.076, 0.284] (Tabla 6). Se nota, por lo tanto, un incremento en las porosidades a medida que se aumenta la resolución. Esto puede ser debido a que algunos de los poros no llegan a ser resueltos a las bajas resoluciones (26 y 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ ). De hecho, nuestras observaciones en el microscopio electrónico de barrido (SEM) corroboran que muchos o algunos de los poros son menores a 5  $\mu\text{m}$  (Tabla 8), por lo que gran parte de los poros no logran ser resueltos a 26 y 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ , y algunos ni a 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ . En particular, la muestra LH-15-03 contiene algunos poros menores a 2  $\mu\text{m}$ , la HK-14-22 presenta varios poros menores de 3  $\mu\text{m}$ , y la HJ-14-02 presenta fracturas con aperturas menores de 2  $\mu\text{m}$ .

En la Tabla 6 se puede observar que los valores obtenidos de  $\phi_{\text{total}}$  a una resolución de 26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  difieren fuertemente con los resultados de porosidad experimental ( $\frac{\phi_{\text{total}}}{\phi_{\text{exp}}} \ll 1$ ) y ninguna de las muestras presenta conectividad ( $\phi_{\text{cf}}$ ), a excepción de la HK-14-30-M2. Sin embargo, los valores de  $\phi_{\text{total}}$  en las imágenes de micro-CT a 26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  son cercanos a los valores de porosidad en las imágenes SEM de 20  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  ( $\phi_{\text{SEM}}$ ), especialmente para la muestra HK-14-30-M2. Por otro lado, los valores de  $\phi_{\text{total}}$  estimados en las imágenes de micro-CT con una resolución de 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  se aproximan relativamente a los medidos analíticamente ( $\phi_{\text{exp}}$ ). Cuatro (LH-15-03, HJ-14-02, HK-14-30-M1 y M2) de las siete muestras presentan conectividad a esta resolución. En el caso de las imágenes con una resolución de 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  los valores de porosidad,  $\phi_{\text{total}}$ , estimados son más cercanos a los valores analíticos,  $\phi_{\text{exp}}$ , ( $\frac{\phi_{\text{total}}}{\phi_{\text{exp}}} < 1$ ) que las imágenes a 10 y 26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  ( $\frac{\phi_{\text{total}}}{\phi_{\text{exp}}} \ll 1$ ).

En la Figura 10 se comparan los resultados de la porosidad total experimental ( $\phi_{\text{exp}}$ ) y los resultados de porosidad total,  $\phi_{\text{total}}$ , adquiridos en las imágenes de micro-CT a distintas resoluciones 26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  (P26), 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  (P10) y 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  (P3A y P3B) en un gráfico de barras. Se observa de forma general, un incremento en la estimación de la porosidad conforme la resolución de la imagen aumenta (de

Tabla 5. Minerales identificados a través de DRX y ajustados con FRX.

Mineral	HK-14-22	HK-14-43	LH-15-03	HJ-14-02	HK-14-02	HK-14-30 M1	HK-14-30 M2
Albita [NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	0.04	0.05	0.01	0.27	0.14	0.28	0.29
Anortita [CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ]	0.12	0.03	0.05	0.14	0.32	0.59	0.5
Cuarzo cristobalita [SiO <sub>2</sub> ]	0.37	0.36		0.04	0.06		0.03
Ortoclase [KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	0.39	0.06		0.16	0.17		
Sanidina [(K,Na)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> ]	0.07	0.45	0.02	0.27	0.17	0.06	0.07
Biotita [K(Mg,Fe) <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> ]	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03		
Diópsido [CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]		0.02	0.03	0.07	0.04	0.02	0.05
Augita [(Ca,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]		0.01				0.04	0.05
Fayalita [(Fe <sup>2+</sup> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ]				0.02	0.03	0.01	0.01
Vidrio silíceo [SiO <sub>2</sub> ]			0.85				
Pirita [FeS <sub>2</sub> ]				0.02	0.02		
Hematita [Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]			0.02		0.02		
<b>TOTAL</b>	<b>1.00</b>						

P26 a P3). Particularmente en las imágenes con una resolución de 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  se aprecia que los valores de porosidad total fluctúan entre sí (minicores A y B), esto puede deberse a: 1) la posición donde se extrajo el minicore de 3 mm y, 2) reflejo de una alta heterogeneidad de las rocas estudiadas.

### Cálculo de la permeabilidad

La Tabla 9 presenta un resumen de las permeabilidades obtenidas con las técnicas utilizadas; específicamente, la segunda columna despliega las permeabilidades medidas analíticamente. Dichas permeabilidades están en el rango de [2, 365] mD, mostrando gran variabilidad que refleja la heterogeneidad de los sistemas porosos conectados en estas muestras.

### Imágenes de micro-CT

En la Tabla 9 se exponen los resultados de permeabilidad experimental ( $\kappa_{\text{exp}}$ ) y los adquiridos en las simulaciones de permeabilidad a partir de las imágenes de micro-CT a 26, 10 y 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$  de resolución ( $\kappa_{\text{img}}$ ) de las muestras estudiadas. Las simulaciones de permeabilidad de las muestras se hicieron en la misma dirección axial (z), donde se obtuvieron los resultados de la permeabilidad experimental. Para comparar las permeabilidades a partir de imágenes y las obtenidas analíticamente, se calculó la relación  $\frac{\kappa_{\text{img}}}{\kappa_{\text{exp}}}$  (Andrä, et al., 2013; Cid et al., 2021). De forma general en esta tabla comparativa se observa que los valores de  $\kappa_{\text{img}}$  son mayores que los adquiridos de forma experimental ( $\kappa_{\text{exp}}$ ),  $\frac{\kappa_{\text{img}}}{\kappa_{\text{exp}}} > 1$ . Lo cual debe estar afectado tanto por el tamaño de las muestras como por la resolución a la que se tomaron las imágenes. En este trabajo se utilizaron tres diferentes tamaños de núcleos y por ende tres resoluciones diferentes de imágenes. A continuación, se presentan los resultados de cada resolución:

**Imágenes a una resolución de 26  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ .** Únicamente la muestra HK-14-30-M2 presentó conectividad con una permeabilidad extremadamente alta (4091.37 mD) comparada a la reportada analíticamente (364.81 mD),  $\frac{\kappa_{\text{img}}}{\kappa_{\text{exp}}} \ll 1$ , lo cual coincide con su alta conectividad (Tabla 6,  $\phi_{\text{total}} = \phi_{\text{exp}}$ ). Su alta conectividad, y correspondiente permeabilidad, se debe probablemente a que se tomó la parte interna más conectada dentro de esta muestra. Debido a que en el procesamiento de imágenes normalmente se quitan los bordes de la imagen por presentar ruido y “artifacts”. Por otra parte, el resto de las imágenes a esta resolución no presentaron conectividad; por lo que no se pudo obtener la permeabilidad del resto de las muestras.

**Imágenes a una resolución de 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ .** Cuatro de las siete muestras presentaron conectividad a esta resolución (LH-15-03,

HJ-14-02, HK-14-30-M1 y HK-14-30-M2) y se les realizó la correspondiente simulación de permeabilidad. La muestra que presentó mayor similitud al valor experimental de permeabilidad fue la muestra HK-14-30-M2 ( $\frac{\kappa_{\text{img}}}{\kappa_{\text{exp}}} \approx 1$ ).

**Imágenes a una resolución de 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ .** Cinco de las siete muestras presentaron conectividad al menos en uno de los minicores A o B (Tabla 9). En general los resultados de permeabilidad en estas imágenes también fueron mayores que los valores analíticos ( $\frac{\kappa_{\text{img}}}{\kappa_{\text{exp}}} \gg 1$ ), a excepción del minicore a de la muestra HK-14-43 ( $\frac{\kappa_{\text{img}}}{\kappa_{\text{exp}}} < 1$ ). Es de notar, además, que los valores obtenidos en las simulaciones corroboran el espacio conectado mostrado en las imágenes (Figura 9). Ciertamente, se puede observar en la Figura 9 que los minicores para los que no se obtuvo conectividad en los poros, y se muestran totalmente en rojo, no fue posible realizar simulaciones de permeabilidad. Asimismo, podemos notar que los minicores con mayor conectividad (espacios coloreados en azul) son los que presentan mayor permeabilidad, como por ejemplo el minicore B de la muestra HK-14-43 y el minicore B de HK-14-30-M2.

## DISCUSIÓN

Un resultado interesante a destacar en el presente estudio es que la porosidad obtenida en las imágenes a resoluciones similares, pero con técnicas diferentes, dan valores más cercanos entre sí que con los valores medidos analíticamente. Lo anterior sugiere que el efecto de tamaño o escala es más relevante que el uso de diferentes técnicas para obtener la porosidad en las muestras estudiadas. Algunos trabajos, presentan resultados equivalentes, por ejemplo, Becker et al. (2019) obtienen que la porosidad calculada en imágenes de micro-CT (27  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ , muestras 3D de  $\sim 1.6\text{cm}$ ) dan resultados más parecidos (más no iguales) a los medidos con análisis de conteo modal en láminas delgadas (300 puntos por lamina, muestras 2D de  $\sim 2\text{cm}$ ) que los medidos con un porosímetro de gas en muestras cilíndricas de 2.5 cm de diámetro.

Es de notar que la porosidad total estimada en las imágenes se calcula a partir de todo el espacio poroso resuelto, mientras que la porosidad medida en el laboratorio solo cuenta el espacio poroso conectado de hasta el tamaño de la molécula de helio ( $\sim 1\text{Å}$ ), gas utilizado aquí para la medición de la porosidad. Esto indicaría que la porosidad medida en el laboratorio debería ser menor que la porosidad calculada en las imágenes. Sin embargo, en la mayoría de los resultados encontrados en este estudio las porosidades medidas en el laboratorio

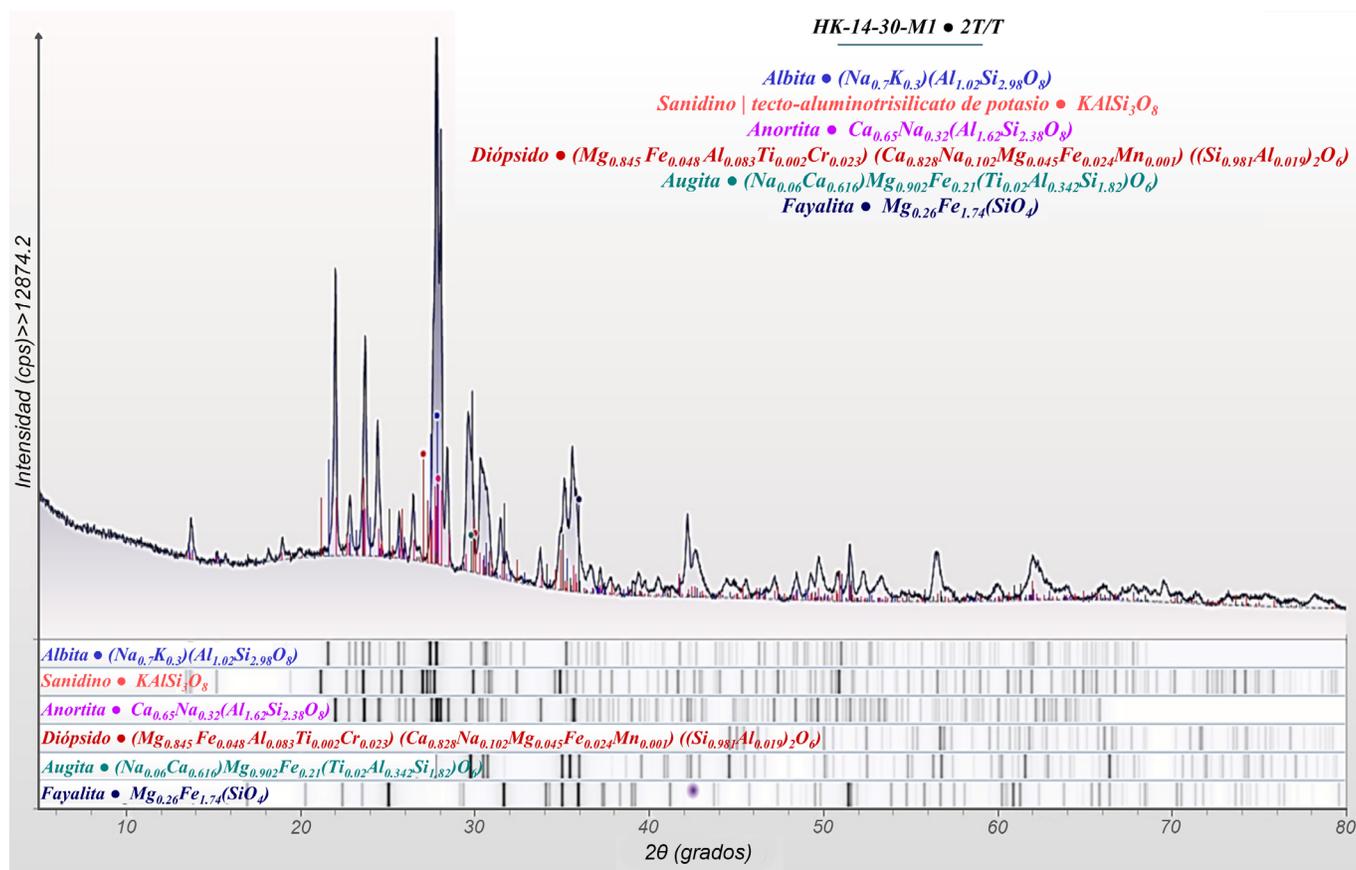


Figura 8. Ejemplo de los difractogramas obtenidos, para la muestra HK-14-30M1. Cada color refleja una fase mineral, apoyada con su fórmula química; i.e. Albita  $(Na_{0.7}K_{0.3})(Al_{1.02}Si_{2.98}O_8)$  en azul, Sanidino  $KAlSi_3O_8$  en naranja, Anortita  $Ca_{0.65}Na_{0.32}(Al_{1.62}Si_{2.38}O_8)$  en magenta, Diópsido  $(Mg_{0.845}Fe_{0.048}Al_{0.083}Ti_{0.002}Cr_{0.023})(Ca_{0.828}Na_{0.102}Mg_{0.045}Fe_{0.024}Mn_{0.001})((Si_{0.981}Al_{0.019})_2O_6)$  en rojo, Augita  $(Na_{0.06}Ca_{0.616})Mg_{0.902}Fe_{0.21}(Ti_{0.02}Al_{0.342}Si_{1.82})O_6$  en azul verde y Fayalita  $Mg_{0.26}Fe_{1.74}(SiO_4)$  en morado. Se encontraron los picos característicos de esos minerales, los cuales fueron esenciales para la cuantificación de sus porcentajes por los métodos de Refinamiento Rietveld y la Relación de Intensidades de Referencia (RIR) sin reducción de fondo.

Tabla 6. Porosidades medidas analíticamente ( $\phi_{exp}$ ), y las calculadas a partir de: (a) imágenes SEM ( $\phi_{SEM}$ ) a 20  $\mu m$ /pixel, (b) de micro-CT ( $\phi_{total}$ : porosidad total, y  $\phi_{ef}$ : porosidad efectiva) a 26, 10 y 3  $\mu m$ /voxel. SN indica las muestras a la que no se les pudo extraer minicores.

Muestra	SEM			Microtomografía												
	$\phi_{exp}$	20 $\mu m$ /voxel (1 mm de diámetro)		26 $\mu m$ /voxel (26.4 mm de diámetro)			10 $\mu m$ /voxel (10 mm de diámetro)			3 $\mu m$ /voxel (3 mm de diámetro)						
		$\phi_{SEM}$	$\phi_{total}$	$\phi_{total}$	$\phi_{ef}$	$\phi_{total}$	$\phi_{ef}$	$\phi_{total}$	$\phi_{ef}$	$\phi_{total}$	$\phi_{ef}$	A	B	A	B	A
HK-14-22	0.206	0.050	0.24	0.020	0.0	0.10	0.044	0.000	0.21	SN	SN	SN	SN	SN	SN	SN
HK-14-43	0.394	0.070	0.18	0.017	0.0	0.04	0.059	0.000	0.15	0.126	0.267	0.100	0.249	0.32	<b><u>0.68</u></b>	
LH-15-03	0.311	0.037	0.12	0.017	0.0	0.05	0.118	0.048	0.38	0.153	0.200	0.111	0.149	0.49	<b><u>0.64</u></b>	
HJ-14-02	0.093	0.027	0.29	0.037	0.0	0.40	0.048	0.025	0.52	0.076	SN	0.058	SN	0.81	SN	
HK-14-02	0.214	0.066	0.31	0.014	0.0	0.05	0.100	0.000	0.47	0.124	0.170	0.000	0.126	0.58	<b><u>0.79</u></b>	
HK-14-30 M1	0.210	0.095	0.45	0.047	0.0	0.22	0.199	0.088	<b><u>0.95</u></b>	0.191	0.284	0.000	0.000	0.91	<b><u>1.35</u></b>	
HK-14-30 M2	0.220	0.059	0.27	0.065	0.065	0.30	0.131	0.051	<b><u>0.60</u></b>	0.234	0.179	0.029	0.111	1.06	<b><u>0.81</u></b>	

Nota: subrayadas en negritas y estilo itálico están las porosidades de las imágenes que se acercan con un 70% o más a la porosidad medida analíticamente.

Tabla 7. Resultados observados en las imágenes SEM.

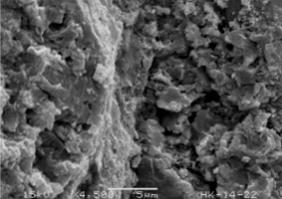
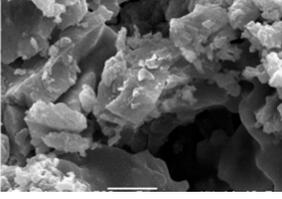
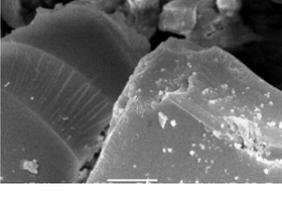
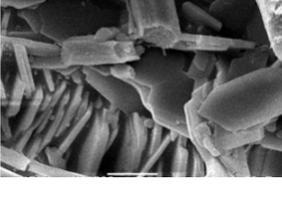
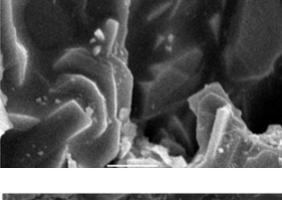
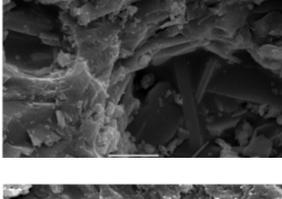
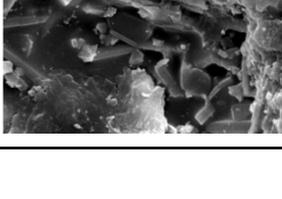
Muestra	Litología	Tamaño de poros (mm)	Observaciones	Imagen SEM Magnificación 4500X
HK-14-22	Riolita	[1, 3]	La forma de los poros es irregular. El tamaño de los poros presenta un tamaño no mayor a 3 $\mu\text{m}$ .	
HK-14-43	Riolita	[1, 50]	La forma de los poros es irregular.	
LH-15-03	Ignimbrita (toba vitro-lítica)	[1, 100]	La forma de las vesículas con un mayor tamaño ( $\approx 100 \mu\text{m}$ ) presentan formas elípticas. Las de menor tamaño son predominantemente esféricas ( $< 2 \mu\text{m}$ ).	
HJ-14-02	Traquita	[200, 500]	La forma de las vesículas presenta una forma alargada (ovoide) conectadas a través de fracturas ( $< 2 \mu\text{m}$ ). Se observa la presencia de microlitos que conforman su fase sólida.	
HK-14-02	Traquita	[5, 200]	La forma de las vesículas es irregular. La roca presenta una alta presencia de vesículas, además se observa la presencia de microlitos que conforman su fase sólida.	
HK-14-30 M1	Andesita	[5, 350]	La forma de las vesículas es irregular. La roca presenta una alta presencia de vesículas, además se observa la presencia de microlitos que conforman su fase sólida.	
HK-14-30 M2	Andesita	[5, 400]	La forma de las vesículas es irregular. La roca presenta una alta abundancia de vesículas, además se observa la presencia de microlitos que conforman su fase sólida.	

Tabla 8. Resumen de las observaciones del espacio poroso a partir de imágenes de micro-CT.

Muestra	Observaciones
HK-14-22	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las imágenes de la muestra HK-14-22 a resoluciones de 26 y 10 <math>\mu\text{m}/\text{voxel}</math>, solo logra resolver espacio poroso no conectado.</li> <li>La gran heterogeneidad de esta muestra de roca, así como la presencia de poros de tamaños menores de 1 <math>\mu\text{m}</math>, es revelada través de las imágenes de SEM (Tabla 7).</li> <li>La muestra presenta fracturas y microfracturas.</li> </ul>
HK-14-43	<ul style="list-style-type: none"> <li>En las imágenes de micro-CT de la muestra HK-14-43 a una resolución de 3 <math>\mu\text{m}/\text{voxel}</math>, se aprecia que la forma de los poros es amorfa, con bordes irregulares, donde difícilmente podemos encontrar estructuras suavizadas o redondeadas (Figura 9).</li> <li>Esta muestra presenta conectividad en ambos minicores de 3 mm (A y B).</li> <li>La muestra presenta poros orientados aleatoriamente.</li> </ul>
LH-15-03	<ul style="list-style-type: none"> <li>En las imágenes de la muestra LH-15-03 a una resolución de 3 <math>\mu\text{m}/\text{voxel}</math> (Figura 9), se aprecia que los poros no conectados presentan una forma ovalada y aplanada y con cierto grado de inclinación (<math>\sim 130^\circ</math>).</li> <li>Los poros conectados también siguen esa orientación, con una forma irregular.</li> <li>Los dos minicores A y B de 3 mm presentan conectividad entre sus poros.</li> <li>Es denotar que las imágenes del SEM (Tabla 7) revelan la existencia de poros <math>&lt; 3 \mu\text{m}</math>, los cuales no son visibles (captados) en las imágenes de <math>\mu\text{-CT}</math>.</li> <li>La muestra presenta poros orientados aleatoriamente.</li> </ul>
HJ-14-02	<ul style="list-style-type: none"> <li>En las imágenes de micro-CT de la muestra HJ-14-02 a una resolución de 3 <math>\mu\text{m}/\text{voxel}</math> (Figura 9), se observa que los poros tienen una forma plana y elongada, muy bien definida.</li> <li>Cuenta con la presencia de fracturas y microfracturas de poco espesor conectando a los poros, lo cual se puede apreciar en las imágenes SEM (Tabla 7).</li> <li>Esta muestra presenta conectividad en el único minicores (A) de 3 mm que se consiguió extraer.</li> <li>Se aprecia que tanto los poros conectados y no conectados presentan una orientación, de unos <math>45^\circ</math> en el plano XY.</li> </ul>
HK-14-02	<ul style="list-style-type: none"> <li>En las imágenes de micro-CT de la muestra HK-14-02 a resolución de 3 <math>\mu\text{m}/\text{voxel}</math>, se observa que la forma de los poros es irregular. Particularmente el minicores A de 3 mm no presenta conectividad, mientras que el minicores B de 3 mm presenta conectividad (Figura 9).</li> <li>La muestra presenta fracturas y microfracturas.</li> </ul>
HK-14-30 M1	<ul style="list-style-type: none"> <li>En las imágenes de micro-CT de la muestra HK-14-30-M1 a resolución de 3 <math>\mu\text{m}/\text{voxel}</math> (Figura 9), se observa que la forma de los poros es predominantemente irregular en poros mayores a 350 <math>\mu\text{m}</math>, mientras que para poros menores de 350 <math>\mu\text{m}</math> los poros son parcialmente esféricos.</li> <li>Ninguno de los minicores (A y B) presenta conectividad.</li> <li>La muestra presenta poros orientados aleatoriamente.</li> </ul>
HK-14-30 M2	<ul style="list-style-type: none"> <li>En las imágenes de micro-CT de la muestra HK-14-30-M2 a resolución de 3 <math>\mu\text{m}/\text{voxel}</math> (Figura 9), se observa que la forma de los poros es predominantemente irregular en poros mayores a 400 <math>\mu\text{m}</math>, mientras que para poros menores de 400 <math>\mu\text{m}</math> los poros son parcialmente esféricos.</li> <li>Esta muestra presenta conectividad en los dos minicores (A y B).</li> <li>El minicores A presenta poros con un mayor tamaño que el minicores B. Sin embargo, el minicores B presenta una mayor conectividad en contraste al minicores A.</li> <li>La muestra presenta poros orientados aleatoriamente.</li> </ul>

son mayores que las porosidades calculadas en las imágenes ( $\phi_{\text{exp}} > \phi_{\text{total}}$ , tanto en 2D como en 3D (Tabla 6). Un resultado similar es encontrado, por ejemplo, para la porosidad promedio debida a las vesículas calculada en imágenes de micro-CT en comparación con la porosidad total medida en picnómetro de gas ( $\phi_{\text{picnometría-gas}} \geq \phi_{\text{vesículas-micro-CT}}$ ) en clastos de pómez provenientes de erupciones andesíticas plinianas del monte Ruapehu (Pardo *et al.*, 2014). De hecho, Andrä *et al.*, (2013) indican, en su estudio comparativo de las propiedades calculadas en imágenes de micro-CT, que los resultados obtenidos a diferentes escalas, como lo son en muestras físicas cilíndricas (de algunos cm de diámetro) y las imágenes de micro-CT de muestras milimétricas ( $\sim 2\text{mm}$ ), no son directamente comparables.

Es importante comentar que el espacio poroso captado a diferentes resoluciones en las imágenes no es necesariamente el mismo de la muestra original (Andrä *et al.*, 2013). Por ejemplo, a altas resoluciones se pueden visualizar poros pequeños que a bajas resoluciones pudieran aparecer como zonas indefinidas o simplemente ni siquiera notarse, asimismo algunos de los poros más grandes podrían no aparecer o lle-

vase gran parte de la muestra a resoluciones altas. En otras palabras, lo que se puede detectar y visualizar a una resolución puede no aparecer en otra resolución. Si las muestras fueran homogéneas el problema no fuera tan complejo pues cualquier muestra tomada de forma aleatoria a bajas o altas resoluciones debería mostrar características similares, siempre y cuando la homogeneidad se mantenga a esas resoluciones. Sin embargo, la mayoría de las rocas no presentan textura homogénea, especialmente las estudiadas en este trabajo que presentan también anisotropía (Figura 9). Entonces, ¿qué pasa con la representatividad de las muestras? La mejor respuesta que podemos dar es que todo depende de la muestra a estudiar. Esto es debido a que hay muestras de rocas en las que se puede seleccionar zonas representativas pues pueden contener características similares a varios tamaños/resoluciones. No obstante, en rocas muy heterogéneas, es más apropiado hablar de características de las rocas para una determinada resolución/tamaño, que pueden ser muy diferentes a otra resolución/tamaño.

Tomando en cuenta lo anterior no es singular que las permeabilidades obtenidas en las imágenes sean diferentes a las permeabilidades

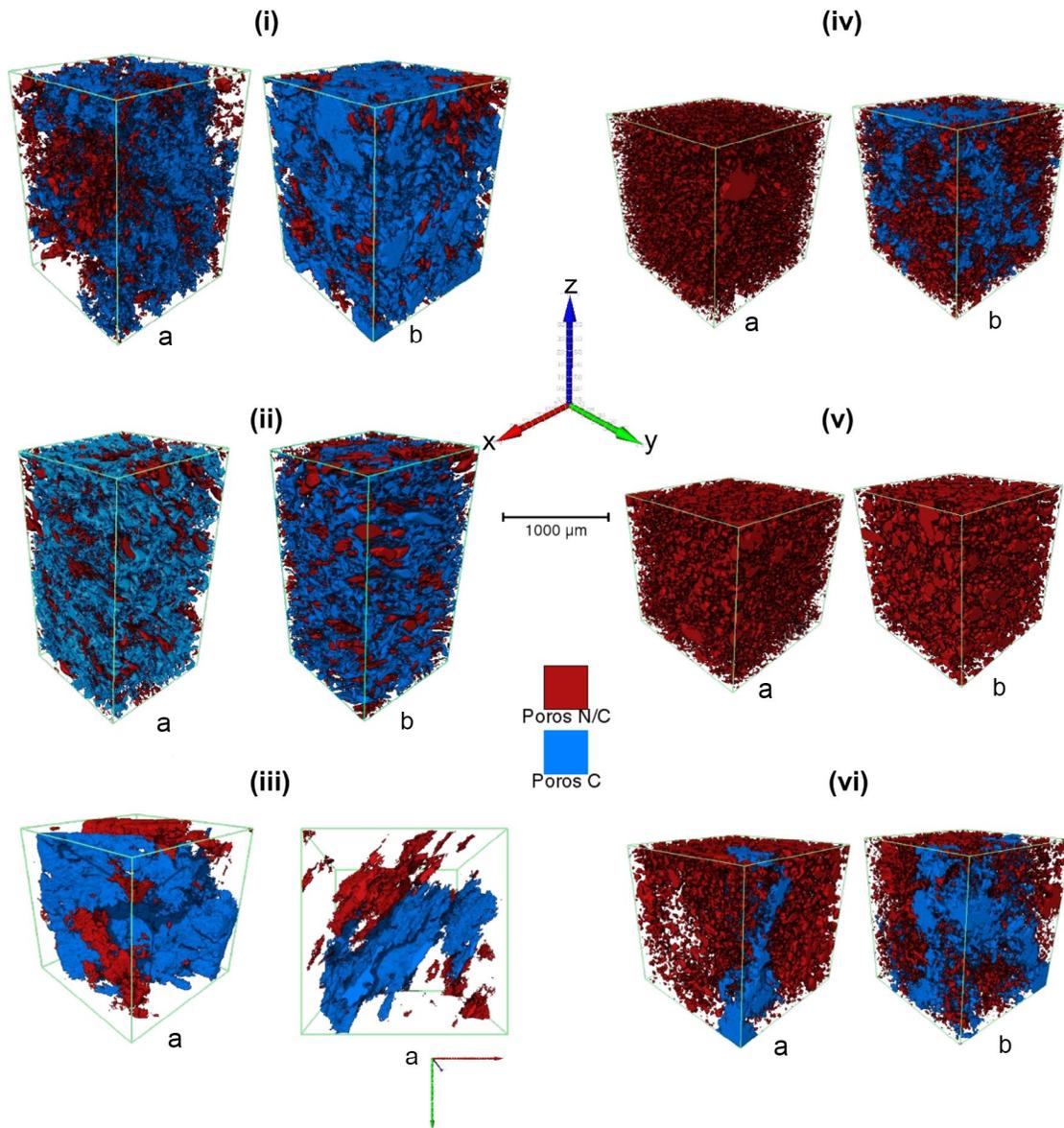


Figura 9. Ejemplo de visualización del sistema poroso en imágenes de micro-CT a una resolución de  $3 \mu\text{m}/\text{voxel}$ , para los minicoros de 3 mm de diámetro. A y B son los dos minicoros tomados en cada muestra, a excepción de HJ-14-02, donde solo fue posible obtener un minicoro de 3 mm. Los poros conectados se encuentran de color azul y los poros no conectados en rojo. Todo esto para las muestras: (i) HK-14-43, (ii) LH-15-03, (iii) HJ-14-02, (iv) HK-14-02, (v) HK-14-30M1, (vi) HK-14-30M2.

medidas físicamente en cilindros de roca. De hecho, la mayoría de las muestras presentan permeabilidades más altas en las simulaciones realizadas a lo largo de los minicoros ( $<10 \text{ mm}$ ) que las permeabilidades medidas físicamente en cilindros de  $>24 \text{ mm}$  de longitud. Este resultado coincide con lo mostrado por Andr a *et al.*, (2013), donde sus simulaciones para obtener la permeabilidad en varias muestras sedimentarias, con Navier Stokes (al igual que las simulaciones de Avizo), son en su mayoría más altas que las medidas analíticamente. En los presentes resultados hay dos factores principales que afectan la discrepancia entre los valores medidos y los obtenidos en las simulaciones: (1) el tamaño de las muestras es diferente y, aunque los minicoros pertenezcan a los mismos cilindros de roca, no son, estrictamente hablando, la misma muestra; (2) las simulaciones se realizan en imágenes que captaron solo una parte del espacio poroso conectado del cilindro original. Lo interesante es que en su mayor

parte las permeabilidades resultaron ser mayores en los minicoros, a excepción de los minicoros B en HK-14-43 y HK-14-30-M2. Esto indica que la mayor parte del espacio poroso captado en las imágenes de los minicoros presentó mayor conectividad en el eje axial, posiblemente consecuencia de que hay mayor probabilidad de capturar un espacio conectado en una longitud más pequeña (minicoros) que en una longitud más grande (cilindros de  $26.4 \text{ mm}$  de diámetro), y quizás por una sobrestimación del espacio poroso conectado (a pesar de haberse subestimado el espacio poroso total, Tabla 6). Por otra parte, la tensión superficial de los fluidos puede afectar las mediciones de laboratorio (porosidad y permeabilidad), mientras que en los cálculos realizados en las imágenes no es tomada en cuenta. Sin embargo, los fluidos utilizados en el presente estudio fueron gases, helio para la porosidad y nitrógeno para la permeabilidad, por lo cual este posible efecto de la tensión superficial puede ser considerado nulo.

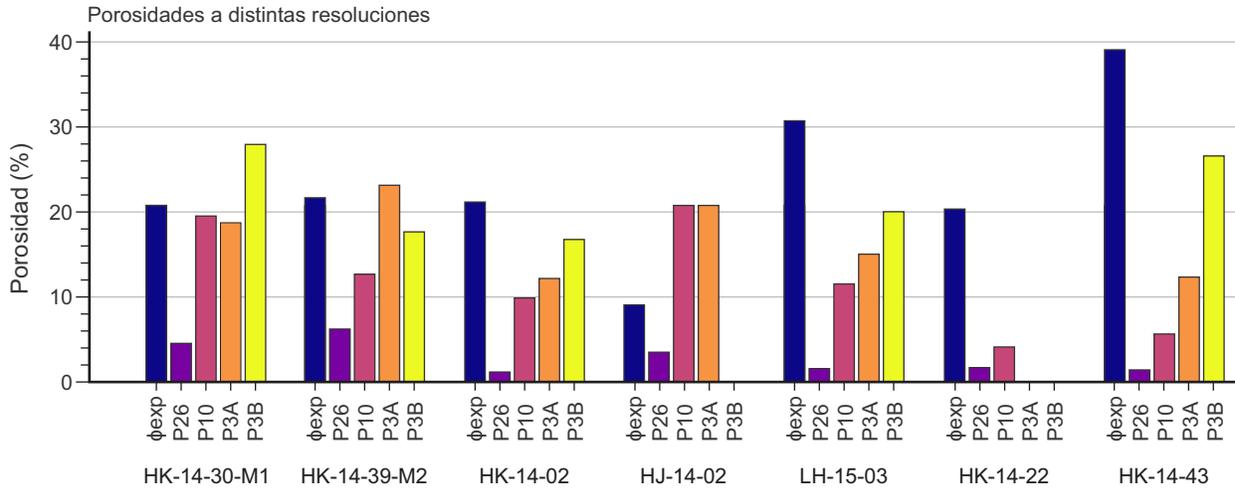


Figura 10. Grafica comparativa entre los resultados de porosidad adquiridos analíticamente y a través de las imágenes de micro-CT a diferentes resoluciones.  $\phi_{exp}$  corresponde a la porosidad medida con porosimetría, P26, P10 y P3 corresponden a las porosidades calculadas en las imágenes de micro-CT a resoluciones de 26, 10 y 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ , P3A y P3B diferencian los resultados de los minicores A y B a 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ .

Con respecto a las permeabilidades obtenidas previamente en imágenes de micro-CT de alta resolución ( $\leq 1 \mu\text{m}/\text{voxel}$ ), en muestras de andesitas de subsuelo provenientes del CVLH (Cid *et al.* 2017, 2021), sus valores son generalmente menores o similares a las permeabilidades halladas analíticamente, donde utilizaron las mismas técnicas analíticas y de cálculo que las empleadas aquí. Por el contrario, lo que se observa en el presente estudio es que las permeabilidades obtenidas de imágenes a resoluciones  $\leq 10 \mu\text{m}/\text{voxel}$  son generalmente más altas que los valores analíticos, aún en las andesitas, como la muestra HK-14-30. Esto podría ser debido a la compactación sufrida en las muestras de subsuelo, donde probablemente parte de la microporosidad pudo haber sido cerrada, a diferencia de las muestras de afloramientos de lavas y de depósito de la ignimbrita, con menor compactación. Al mismo tiempo, los presentes resultados corroboran que la permeabilidad en las muestras volcánicas estudiadas del CVLH proviene de los poros más pequeños, ya que los poros conectados son captados a partir de resoluciones de 10  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ . Por lo tanto, la permeabilidad en las muestras estudiadas proviene mayormente de poros menores de 10  $\mu\text{m}$ , así como en Cid *et al.* (2021) las permeabilidades en las muestras de subsuelo provienen considerablemente de poros menores de 1  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ . Esto pone de relieve la

limitación de la técnica de micro-CT que está condicionada al menor tamaño adquirido por la resolución utilizada/alcanzada. De tal manera que, si las muestras de roca presentan poros de tamaño menor a la resolución utilizada, no se puede obtener la información completa del espacio poroso estudiado. A pesar de esto, se ha podido obtener y corroborar que en las rocas estudiadas del CVLH hay un componente de poros muy pequeños que contribuyen considerablemente al transporte de flujo de fluidos, lo cual puede tener consecuencias significativas para la explotación del campo geotérmico Los Humeros. Para futuros trabajos se recomienda utilizar técnicas complementarias, como la microscopía electrónica de barrido con haz enfocado de iones (FIB-SEM), que llegan a resoluciones más altas en 3D, para así poder tener un análisis más completo del espacio poroso.

CONCLUSIONES

El presente estudio brinda un mejor entendimiento del espacio poroso, la porosidad y permeabilidad de las rocas volcánicas. De tal manera que se encontró que todas las rocas estudiadas, andesitas, riolitas traquitas e ignimbrita, son muy heterogéneas y presentan

Tabla 9. Resultados de las mediciones de permeabilidad ( $\kappa_{exp}$ ) y de las simulaciones de permeabilidad en imágenes de micro-CT ( $\kappa_{img}$ ) a 26, 10 y 3  $\mu\text{m}/\text{voxel}$ . SN indica las muestras a las que no se les pudo extraer minicores, y NA (no aplicable) indica las muestras cuyos poros no presentaron conexión en dirección del eje Z.

Muestra	Permeabilidad (medición analítica)	26 $\mu\text{m}/\text{voxel}$ (26.4 mm de diámetro)		10 $\mu\text{m}/\text{voxel}$ (10 mm de diámetro)		3 $\mu\text{m}/\text{voxel}$ (3 mm de diámetro)			
		$\kappa_{exp}$ (mD)	$\kappa_{img}$ (mD)	$\frac{\kappa_{img}}{\kappa_{exp}}$	$\kappa_{img}$ (mD)	$\frac{\kappa_{img}}{\kappa_{exp}}$	$\kappa_{img}$ (mD)	$\frac{\kappa_{img}}{\kappa_{exp}}$	
HK-14-22	NA	NA	NA	NA	NA	SN	SN	NA	NA
HK-14-43	227			NA	NA	144	1063	0.64	4.68
LH-15-03	79			328	4.13	211	465	2.66	5.89
HJ-14-02	5			698	149.25	212	SN	42.4	NA
HK-14-02	47			NA	NA	NA	283	NA	6.02
HK-14-30 M1	2			1774	1111.11	NA	NA	NA	NA
HK-14-30 M2	365	4091	11.20	389	1.07	0	1155	0	3.16

anisotropía textural. Además, sus valores de porosidad parecen ser más afectados por el tamaño de las muestras o escala de medición que por la técnica específica utilizada. También, se encontró que las permeabilidades calculadas en imágenes de micro-CT de dichas muestras son generalmente mayores que las permeabilidades medidas analíticamente, lo cual corrobora trabajos previos. Esto último es de gran importancia ya que los resultados indican que gran cantidad de poros muy pequeños ( $\leq 10 \mu\text{m}/\text{voxel}$ , en este caso) contribuyen considerablemente al transporte de flujo de fluidos, consecuentemente al valor de la permeabilidad, lo cual puede tener consecuencias significativas para la explotación del campo geotérmico Los Humeros.

De cara a futuros estudios, con lo aprendido en este trabajo, sería interesante analizar a mayor profundidad el efecto del tamaño de las muestras en los valores de porosidad y permeabilidad, amarrando con las escalas medibles para luego poder extrapolar a longitudes mayores, tales como las de las formaciones rocosas y/o yacimientos. Asimismo, se propone complementar el estudio del espacio poroso a resoluciones mayores que las investigadas en este trabajo, haciendo uso de técnicas complementarias como el FIB-SEM.

**Agradecimientos.** Esta investigación fue realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA104919. Los autores agradecen el apoyo brindado por el Ing. Dante Arteaga del Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X (LUMIR) y a Juan Tomás Vázquez, ambos del Instituto de Geociencias (UNAM); al Laboratorio de Microscopía Electrónica y al Laboratorio de Difracción de Rayos X del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA), todos localizados en la UNAM Campus Juriquilla. Asimismo, agradecemos el apoyo y colaboración del Laboratorio de Petrofísica de la ENES Morelia, UNAM. También le damos un especial reconocimiento al Maestro Javier Hernández por el gran soporte y ayuda en campo, como en la localización, selección, manipulación y descripción de las muestras. Finalmente, agradecemos todas las sugerencias y recomendaciones realizadas por los revisores y los editores, las cuales fueron muy valiosas para poder presentar más eficientemente este trabajo.

**Contribución de los autores.** S. Vega: metodología, investigación, procesamiento, análisis formal, redacción, revisión, edición y recursos. J. de la Rosa Maldonado e I. Reyna Bustos: investigación, análisis e interpretación de datos, y redacción. G. Carrasco-Núñez: revisión, análisis de datos y edición. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión aceptada del manuscrito.

**Política de disponibilidad de datos.** Los autores confirman que todos los datos que respaldan este estudio están disponibles en este artículo o en sus suplementos.

**Declaración de conflicto de intereses.** Los autores declaran que no tienen conocimiento de conflictos de intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influenciado el trabajo que se reporta en este artículo.

**Financiamiento.** Este trabajo recibió financiamiento del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM-PAPIIT), proyecto IA104919.

## REFERENCIAS

- Andrä, H., Combaret, N., Dvorkin, J., Glatt, E., Han, J., Kabel, M., Keehm, Y., Krzikalla, F., Lee, M., Madonna, C., Marsh, M., Mukerji, T., Saenger, E. H., Sain, R., Saxena, N., Ricker, S., Wiegmann, A., & Zhan, X. (2013). Digital rockphysics benchmarks—part II: Computing effective properties. *Computers & Geosciences*, *50*, 33–43. doi:10.1016/j.cageo.2012.09.008
- Arellano, V. M., Gracia, A., Barragán, R. M., Izquierdo, G., Aragón, A., & Nieva, D. (2003). An updated conceptual model of the Los Humeros geothermal reservoir (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *124*(1-2), 67–88. doi:10.1016/S0377-0273(03)00045-3
- Arteaga, D. (2018). Análisis multiescalar de porosidad y permeabilidad de un intervalo permeable usando microtomografía de rayos X, caso de estudio campo geotérmico Los Humeros [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arzate, J., Corbo-Camargo, F., Carrasco-Núñez, G., Hernández, J., & Yutsis, V. (2018). The Los Humeros (Mexico) geothermal field model deduced from new geophysical and geological data. *Geothermics*, *71*, 200–211. doi:10.1016/j.geothermics.2017.09.009
- ASTM International. (2013). *Standard Test Method for Permeability of Rocks by Flowing Air* (ASTM D4525-13e2). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4525-13E02
- ASTM International. (2019). *Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances* (ASTM D4543-19). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4543-19
- Becker, M., Lima, E. F., Waichel, B. L., & Mantovani, I. F. (2019). Pore system quantification and characterization in volcanic rocks: a case study from the Lower Cretaceous Serra Geral Group, Paraná Basin, Southern Brazil. *Journal of Petroleum Geology*, *42*(3), 301–317. doi:10.1111/jpg.12735
- Buono, G., Caliro, S., Macedonio, G., Allocca, V., Gamba, F., & Pappalardo, L. (2023). Exploring microstructure and petrophysical properties of microporous volcanic rocks through 3D multiscale and super-resolution imaging. *Scientific Reports*, *13*, 6651(1–14). doi:10.1038/s41598-023-33687-x
- Campos-Enriquez, J. O., & Arredondo-Fragoso, J. J. (1992). Gravity study of Los Humeros caldera complex, Mexico: Structure and associated geothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *49*(1-2), 69–90. doi:10.1016/0377-0273(92)90005-X
- Carrasco-Núñez, G., Gomez-Tuena, A., & Lozano, L. (1997). Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area, Central Mexico. *Geological Society of America Maps and Chart*, series MHC 81.
- Carrasco-Núñez, G., Siebert, L., Díaz-Castellón, R., Vázquez-Selem, L., & Capra, L. (2010). Evolution and hazards of a long-quietest compound shield-like volcano: Cofre de Perote, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *197*(1-4), 209–224. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.08.010
- Carrasco-Núñez, G., Hernández, J., De León, L., Dávila-Harris, H. P., Norini, G., Bernal, J. P., Jicha, B., Navarro, M., López-Quiroz, P. (2017a). Geologic map of Los Humeros volcanic complex and geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Terra Digitalis. International e-journal of Maps*, *1-2*, 1-11. doi:10.22201/igg.terradigitalis.2017.2.24
- Carrasco-Núñez, G., López-Martínez, M., Hernández, J., & Vargas, V. (2017b). Subsurface stratigraphy and its correlation with the surficial geology at Los Humeros geothermal field, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geothermics*, *67*, 1–17. doi:10.1016/j.geothermics.2017.01.001
- Carrasco-Núñez, G., Bernal, J. P., Dávila-Harris, H. P., Jicha, B., Giordano, G., & Hernández, J. (2018). Reappraisal of Los Humeros Volcanic Complex by New U/Th Zircon and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating: Implications for Greater Geothermal Potential. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *19*(1), 132–149. doi:doi.org/10.1002/2017GC007044
- Cavazos-Álvarez, J. A., & Carrasco-Núñez, G. (2020). Anatomy of the Xáltipan ignimbrite at Los Humeros Volcanic Complex; the largest eruption of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *392*, 106755. doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.106755
- Cid, H. E., Carrasco-Núñez, G., & Manea, V. C. (2017). Improved method for effective rock microporosity estimation using X-ray microtomography. *Micron*, *97*, 11–21. doi:10.1016/j.micron.2017.01.003
- Cid, H. E., Carrasco-Núñez, G., Manea, V. C., Vega, S., & Castaño, V. (2021). The role of microporosity on the permeability of volcanic-hosted geothermal reservoirs: A case study from Los Humeros, Mexico. *Geothermics*, *90*(102020), 102020-1-102020-23. doi:10.1016/j.geothermics.2020.102020
- Corbo-Camargo, F., Arzate, J., Fregoso, E., Norini, G., Carrasco-Núñez, G., Yutsis, V., Herrera, J., & Hernández, J. (2020). Shallow structure of Los Humeros (LH) caldera and geothermal reservoir from magnetotellurics

- and potential field data. *Geophysical Journal International*, 223(1), 666–675. doi:10.1093/gji/ggaa338
- Damazo, B. N., Ming, B., Purushotham, P. K., Vladár, A. E., & Postek, M. T. (2011). *Accurate Nanometer-Scale Imaging and Measurements with SEM*. Portland, Oregon (USA), 11th IEEE International Conference on Nanotechnology, (pp. 776-779).
- Dávila-Harris, H. P., & Carrasco-Núñez, G. (2014). An unusual syn-eruptive bimodal eruption: The Holocene Cuicuiltic Member at Los Humeros caldera, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 271, 24–42. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.11.020
- Desbarats, A. J., Boyle, D. R., Stapinsky, M., & Robin, M. L. (1999). A dual-porosity model for water level response to atmospheric loading in wells tapping fractured rock aquifers. *Water Resources Research*, 35(5), 1495–1505. doi:10.1029/1998WR90011
- Farquharson, J., Heap, M. J., Varley, N. R., Baud, P., & Reuschlé, T. (2015). Permeability and porosity relationships of edifice-forming andesites: A combined field and laboratory study. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 297, 52–68. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.03.016
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 22–149. doi:10.1016/j.tecto.2011.09.018
- Ferriz, H., & Mahood, G. A. (1984). Eruption rates and compositional trends at Los Humeros Volcanic Center, Puebla, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B-10), 8511–8524. doi:10.1029/JB089iB10p0851
- Gutiérrez-Negrín, L. C., Izquierdo-Montalvo, G., & Aragón-Aguilar, A. (2010). Review and update of the main features of the Los Humeros geothermal field, Mexico: *GRC Transactions*, 34, 771–777.
- Harlow, F. H., & Welch, J. E. (1965). Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface. *Physics of Fluids*, 8, 2182–2189. doi:10.1063/1.1761178
- Heap, M. J., Bayramov, K., Meyer, G. G., Violay, M. S., Reuschlé, T., Baud, P., Gilg, H. A., Harnett, C. E., Kushnir, A. R. L., Lazari, F., & Mortensen, A. K. (2024). Compaction and Permeability Evolution of Tuffs From Krafla Volcano (Iceland). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(8), 1–27. doi:10.1029/2024JB029067
- Heinrich, M., Cronin, S. J., Torres-Orozco, R., Colombier, M., Scheu, B., & Pardo, N. (2020). Micro-porous pyroclasts reflecting multi-vent basaltic-andesite Plinian eruptions at Mt. Tongariro, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 401, 1–17. doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106936
- Hubbard, C. R., & Synder, R. L. (1988). RIR - Measurement and Use in Quantitative XRD. *Powder Diffraction*, 3(2), 74–77. doi: 10.1017/S0885715600013257
- Huerta-Luna, G. (2018). *Caracterización geológica y geoquímica de subsuelo del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla, México: caso de estudio, Pozo H-50* [Tesis de Ingeniería]. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán
- Joseph, J., Kuntikana, G., & Singh, D. N. (2019). Investigations on gas permeability in porous media. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 64, 81–92. doi:10.1016/j.jngse.2019.01.017
- Karimpouli, S., Faraji, A., Balcewicz, M., & Saenger, E. H. (2020). Computing heterogeneous core sample velocity using Digital Rock Physics: A multiscale approach. *Computers and Geosciences*, 135, 1–10. doi:10.1016/j.cageo.2019.104378
- Konecny, P., & Kozusnikova, A. (2011). Influence of stress on the permeability of coal and sedimentary rocks of the Upper Silesianbasin. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 347–352. doi:10.1016/j.ijrmms.2010.11.017
- Liedl, A., Buono, G., Lanzafame, G., Dabagov, S. B., Della Ventura, G., Hampai, D., Mancini, L., Marcelli, A., & Pappalardo, L. (2019). A 3D imaging textural characterization of pyroclastic products from the 1538 AD Monte Nuovo eruption (Campi Flegrei, Italy). *Lithos*, 340-341, 316–331. doi:10.1016/j.lithos.2019.05.010
- Liu, C., Buono G., Pappalardo, L., Shan, X., Yi, J., Shi, Y., & Ventura, G. (2023) X-ray computed microtomography revealing the effects of volcanic, alteration, and burial processes on the pore structure of rocks from unconventional reservoirs (Songliao Basin, NE China). *Geoenergy Science and Engineering*, 226, 211781(1–13). doi:10.1016/j.geoen.2023.211781
- Madonna, C., Almqvist, B. S., & Saenger, E. H. (2012). Digital rock physics: numerical prediction of pressure-dependent ultrasonic velocities using micro-CT imaging. *Geophysical Journal International*, 189, 1475–1482. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05437.x
- Pardo, N., Cronin, S. J., Wright, H. M., Schipper, C. I., Smith, I., & Stewart, B. (2014). Pyroclast textural variation as an indicator of eruption column steadiness in andesitic Plinian eruptions at Mt. Ruapehu. *Bulletin of Volcanology*, 76, 1–19. doi:10.1007/s00445-014-0822-x
- Pola, A., Herrera-Díaz, A., Tinoco-Martínez, S. R., Macias, J. L., Soto-Rodríguez, A. N., Soto-Herrera, A. M., Sereno, H., & Avellán, D. R. (2024). Rock characterization, UAV photogrammetry and use of algorithms of machine learning as tools in mapping discontinuities and characterizing rock masses in Aconulco Caldera Complex. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83, 1–19. doi:10.1007/s10064-024-03743-5
- Ramírez-Guzmán, Á., Pola, A., Macias, J. L., Soto-Herrera, A. M., Avellán, D. R., Pacheco-Valdivinos, P. M., & Martínez-Martínez, J. (2024). The influence of alteration and fractures on gas permeability and mechanical properties of the sedimentary and volcanic rocks of the Aconulco Caldera Complex (México). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83, 1–16. doi:10.1007/s10064-023-03522-8
- Rojas-Ortega, E. (2016). *Litoestratigrafía, petrografía y geoquímica de la toba Llano, y su relación con el cráter el Xalapazco, Caldera de Los Humeros, Puebla*. [Instituto Potosino de Investigación, Científica y Tecnológica Tesis de Maestría].
- Rotella, M. D., Wilson, C. J., Barker, S. J., Cashman, K. V., Houghton, B. F., & Wright, I. C. (2014). Bubble development in explosive silicic eruptions: insights from pyroclast vesicularity textures from Raoul volcano (Kermadec arc). *Bulletin of Volcanology*, 76, 1–24. doi:10.1007/s00445-014-0826-6
- Sánchez-Núñez, J. M., Pola, A., Cisneros, G., Sereno, H. I., Serrano-Flores, M. E., Jiménez, L. Á., & Rodríguez, P. (2021). Physical-mechanical behavior of fresh and completely altered rocks as an important factor of slope instability in the El Rosario Monarch Butterfly Sanctuary, Michoacán, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38(3), 272–282. doi:10.22201/cgeo.20072902e.2021.3.1674
- Schlüter, S., Sheppard, A., Brown, K., & Wildenschild, D. (2014). Image processing of multiphase images obtained via X-ray microtomography: A review. *Water Resources Research*, 50, 3615–3639. doi: 10.1002/2014WR015256
- Skokan, C. K., & Ibrahim, A. (1978). *Research on the physical properties of geothermal reservoir rock*. Colorado School of Mines, Department of Geophysics, Quarterly report.
- Sruoga, P., Rubinstein, N., & Hinterwimmer, G. (2004). Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobí fera, South Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 132(1), 31–43. doi:10.1016/S0377-0273(03)00419-0
- Tian, W., Lu, S., Li, J., Wang, W., Li, J., & Wen, Z. (2022). Insights into the pore structure and pore development pattern of subaqueous volcanic rocks in the Santanghu Basin, western China: *Marine and Petroleum Geology*, 135(105387). doi:10.1016/j.marpetgeo.2021.105387
- Torres-Orozco, R., Cronin, S. J., Damaschke, M., & Pardo, N. (2017). Diverse dynamics of Holocene mafic-intermediate Plinian eruptions at Mt. Taranaki (Egmont), New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 79, 3–27. doi:10.1007/s00445-017-1162-4
- Torres-Orozco, R., Cronin, S. J., Pardo, N., Kósik, S., Ukstins, I., Heinrich, M., & Lee, P. D. (2023). Complex decompression and fragmentation of mingled andesite magmas driving multi-phase Plinian eruptions at Mt. Taranaki, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 433(107728), 1-28. doi:10.1016/j.jvolgeores.2022.107728
- Torres-Orozco, R., Capra, L., Márquez-Ramírez, V. H., Sosa-Ceballos, G., De Plaen, R. S., Cid, H. E., Sulpizio, R., & Arámbula-Mendoza, R. (2024). Andesite magma genesis, conduit dynamics and variable decompression from shallow reservoirs drive contrasting PDC events at Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 453, 1–23. doi:10.1016/j.jvolgeores.2024.108143
- Asociación Española de Normalización. (2007). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la*

- porosidad abierta y total* (Norma UNE-EN 1936:2007). Asociación Española de Normalización.
- Vairé, E., Heap, M. J., Baud, P., & van Wyk de Vries, B. (2024). Quantifying the physical and mechanical heterogeneity of porous volcanic rocks from the Chaîne des Puys (Massif Central, France). *Bulletin of Volcanology*, 86(5). doi:10.1007/s00445-024-01742-8
- Valentinuzzi, M. C. (2008). Análisis por fluorescencia de rayos X: implementación de guías de haces en reflexión total. [Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Tesis Doctoral].
- Whitaker, S. (1999). *The method of volume averaging. Theory and applications of transport in porous media* (Vol. 13). Dordrecht: Springer Dordrecht. doi:10.1007/978-94-017-3389-2
- Yáñez-García, C., & García-Durán, S. (1982). *Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz, Mexico, D.F.* Comisión Federal de Electricidad.
- Zahasky, C., Thomas, D., Matter, J., Maher, K., & Benson, S. M. (2018). Multimodal imaging and stochastic percolation simulation for improved quantification of effective porosity and surface area in vesicular basalt. *Advances in Water Resources*, 121, 235–244. doi:10.1016/j.advwatres.2018.08.009
-