



Caracterización morfológica y morfométrica de los volcanes Tul Tul, Pocitos y Del Medio en la Puna, Andes Centrales

López, Mauricio¹, Bustos, Emilce^{1,2*} y Arnosio, Marcelo^{1,2}

¹ Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina

² IBIGEO – Universidad Nacional de Salta – CONICET, Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina

* Autor correspondiente emilcebustos@gmail.com

Editor: Ricardo A. Astini

Recibido: 03/04/2025

Aceptado: 11/08/2025

RESUMEN

La morfología volcánica resulta de la acción conjunta de procesos constructivos y destructivos. El análisis morfológico y morfométrico de los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos (TUMEPO), ubicados en la Puna sobre el lineamiento Calama–Olacapato–El Toro, evidencia una evolución compleja. A partir de Modelos Digitales de Elevación (DEM) derivados de ALOS PALSAR se identificaron rasgos clave como cráteres, coladas y domos de lava, permitiendo caracterizar estos edificios. Los resultados indican que la morfología actual responde a la interacción entre factores eruptivos, estructurales y post-eruptivos, especialmente erosión y colapsos gravitacionales. Según la clasificación geomorfológica aplicada, los tres centros corresponden a subconos, aunque con diferencias marcadas: Tul Tul conserva una forma cónica regular con drenaje radial; Del Medio presenta una estructura más compleja influida por un cráter principal y centros cercanos; y Pocitos exhibe una morfología degradada atribuible a erosión intensa. Estas variaciones reflejan estilos eruptivos propios e interacciones espaciales y temporales dentro de la cadena TUMEPO. La presencia de domos post-eruptivos en Del Medio y la preservación de rasgos juveniles en Tul Tul apoyan la hipótesis de una evolución parcialmente simultánea. El estudio destaca la utilidad de los DEMs para el análisis geomorfológico y geodinámico de sistemas volcánicos, aunque subraya la necesidad de modelos de mayor resolución y más datos geocronológicos para afinar las interpretaciones. En conjunto, proporciona una base sólida para comprender la evolución de la cadena volcánica TUMEPO, resultado de la combinación del estilo eruptivo de cada volcán, la acción erosiva y el control tectónico regional.

Palabras clave: Modelos Digitales de Elevación; Morfometría volcánica; Pendiente; Evolución geomorfológica; TUMEPO.

ABSTRACT

Morphological and morphometric characterization of the Tul Tul, Pocitos, and Del Medio Volcanoes, Puna, Central Andes.

The morphology of volcanoes reflects the interplay of constructive and destructive processes acting over time. The morphometric characterization of the Tul Tul, Del Medio, and Pocitos (TUMEPO) volcanoes, located in the Puna region near the Calama–Olacapato–El Toro lineament, reveals a complex volcanic evolution. Digital Elevation Models (DEMs) derived from ALOS PALSAR data (12.5 m resolution) enabled identification of key features such as craters, lava flows, and domes, supporting a detailed morphological analysis. The current form of these volcanoes results from the combined influence of eruptive behavior, structural controls, and post-eruptive processes, including erosion and gravitational collapse. All three centers classify as sub-cones, though with distinct morphologies: Tul Tul retains a regular conical shape with radial drainage; Del Medio shows a more complex structure shaped by a large summit crater and nearby volcanic centers; and Pocitos presents a more degraded morphology linked to intense erosion. These variations reflect both the eruptive histories of each volcano and their spatial and temporal interactions. Evidence within the TUMEPO chain suggests that partially synchronous activity among adjacent centers contributed to their present morphologies. Post-eruptive domes at Del Medio and the preservation of youthful forms at Tul Tul support this interpretation. This study underscores the usefulness of DEMs for geomorphological and geodynamic analysis of volcanic systems, while highlighting the need for higher-resolution datasets,

field-based validation, and improved geochronological constraints. Overall, the results provide a robust framework for understanding the evolution of the TUMEPO volcanic chain and contribute to broader volcanic research in the region.

Keywords: Digital Elevation Models; Volcanic Morphometry; Slope; Morphological evolution, TUMEPO.

INTRODUCCIÓN

La morfología de un edificio volcánico representa la interacción entre sus etapas constructivas y destructivas (e.g., Thouret 1999; de Silva y Lindsay, 2015; Vörös et al. 2022). Es por esto que el estudio de la morfología volcánica y en específico, el análisis de Modelos Digitales de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) constituye una herramienta importante para comprender los relieves volcánicos y su historia evolutiva (e.g., Székely et al. 2004; Grosse et al. 2009; 2012; 2017; Bustos et al. 2020).

La interpretación e identificación de geoformas en el terreno se basa en la observación y evaluación sistemática de elementos básicos, como por ejemplo la topografía, el patrón de drenaje, la erosión, el tono de la imagen, la vegetación y las formas de acumulación (e.g., Lillesand et al. 2015). El mapeo geomorfológico en terrenos volcánicos constituye una técnica importante ya que permite definir el tipo y la distribución de formas, establecer su estado de conservación y definir su cronología permitiendo de este modo la reconstrucción de la evolución del paisaje, además de identificar áreas geomorfológicamente activas y de riesgo (e.g., Ventura et al. 2005; Tripodo et al. 2012; Di Traglia et al. 2013; Alcalá-Reygosa et al. 2016; Azzoni et al. 2017; Gabrielli et al. 2020). Además, los parámetros morfométricos obtenidos a partir de DEMs permiten revelar los estadios evolutivos de los diferentes tipos de aparatos volcánicos y la vinculación de los mismos con las estructuras tectónicas (e.g., Favalli et al. 2005; Pedersen y Grosse 2014; Gong et al. 2016; Casalbore et al. 2016; Grosse et al. 2009, 2012).

Los Andes Centrales (18-28°LS; Fig. 1) presentan una amplia variedad de formas volcánicas. La mayoría de los volcanes del Cenozoico superior en el noroeste de Argentina son de composiciones andesíticas y/o dacíticas y subordinadamente riolíticas, riodacíticas y/o basálticas cuyos depósitos asociados suelen ser coladas, domos e ignimbritas (e.g., Coira y Kay 1993; Coira et al. 1993; de Silva y Francis 1991; Petrinovic et al. 1999; Acocella et al. 2011). Las morfologías predominantes son cónicas siendo subordinadas las sub-có-

nicas y macizos (Grosse et al. 2017). En la región de la Puna, aledaña al lineamiento Calama-Olacapato-El Toro (COT; Baldis, et al. 1975), se emplazan numerosos edificios volcánicos resultado de las distintas etapas de evolución del arco y tras arco volcánico durante el Cenozoico superior (e.g., Petrinovic et al. 1999; Acocella et al. 2011). Hacia el sur del COT se encuentran los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos, entre los salares del Rincón y Pocitos (Fig. 1). Estos estratovolcanes andesíticos-dacíticos (Matteini 2001; Matteini et al. 2002a,b,c; Etcheverría 2003) poseen la particularidad de estar ubicados inmediatamente uno al lado del otro, proporcionando una oportunidad única para estudiar la morfología que se genera por la interferencia entre ellos.

Este trabajo tiene como objetivo realizar la caracterización morfológica y morfométrica de los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos en el entorno provisto por los Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés). Mediante el procesamiento y análisis de un DEM ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución espacial se caracterizó, tanto cualitativamente como cuantitativamente, la morfología de los estratovolcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos. Como resultado de este análisis se confeccionó un mapa geomorfológico de la zona de estudio integrando los datos adquiridos. Por otro lado, mediante los datos morfométricos se clasificaron los edificios volcánicos según Grosse et al. (2009; 2012). Los resultados obtenidos fueron comparados con otros volcanes compuestos de la región.

MARCO REGIONAL: VOLCANISMO DE LA PUNA

La Cordillera de los Andes es el resultado de la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana (e.g., James 1971). A lo largo de esta extensa cadena montañosa se desarrolla el arco volcánico andino que se encuentra dividido en varios segmentos en donde se concentra la actividad volcánica. Un segmento muy destacado es el de los Andes Centrales, que abarca partes de Perú, Bolivia, el

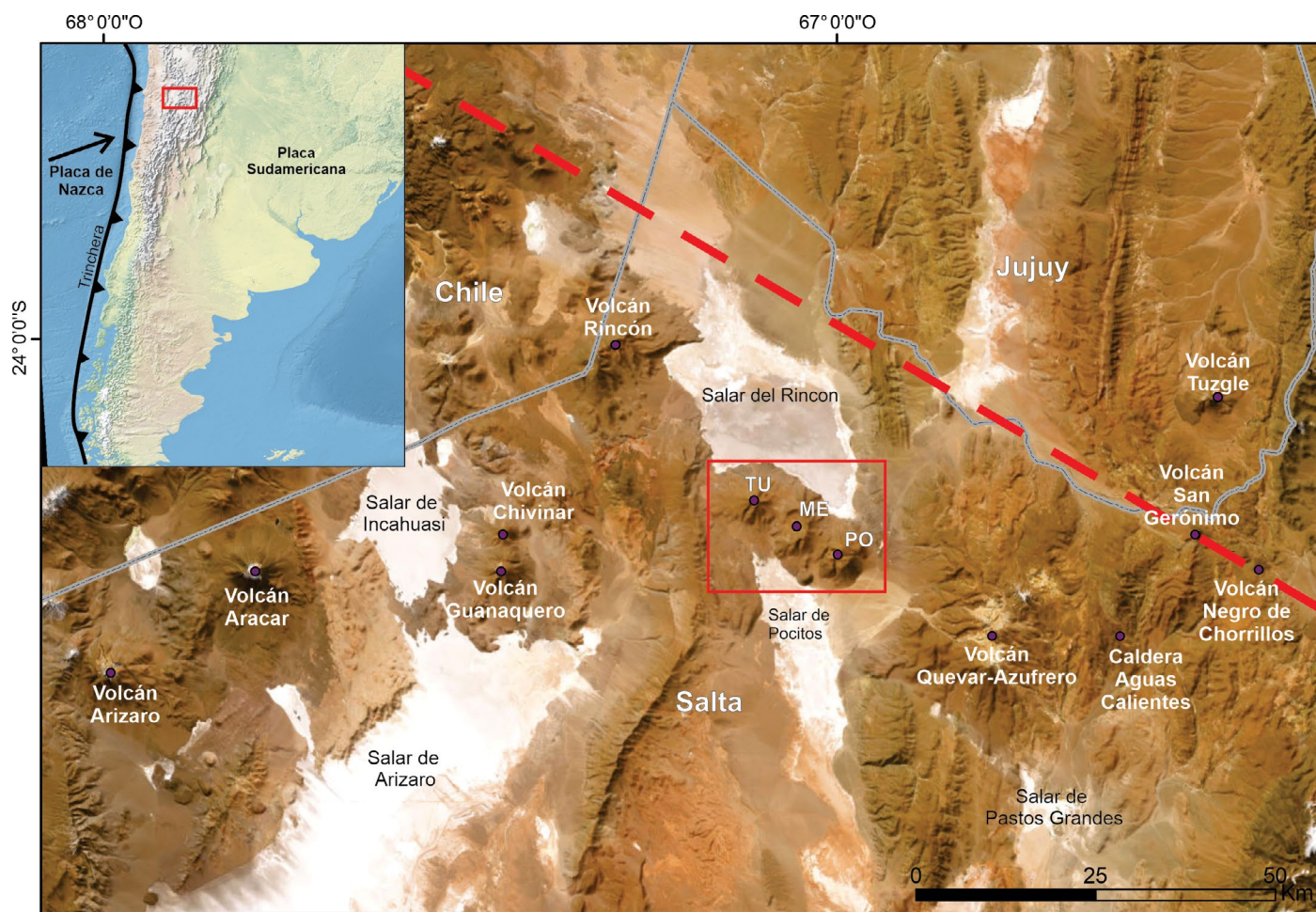


Figura 1. Ubicación de los volcanes Tul-Tul, Del Medio, Pocitos (TUMEPO, recuadro rojo) en el contexto del lineamiento regional Calama-Olacapato-El Toro (COT, línea punteada roja). Se muestran otros edificios volcánicos de la zona y salares. Base: imagen satelital Google Satélite.

norte de Chile y el noroeste de Argentina. El rasgo morfológico más destacable en los Andes Centrales es la altiplanicie conocida como la Puna Argentina-Altiplano Boliviano o *Plateau* Andino. Se habría formado a partir de acortamiento horizontal y engrosamiento predominantemente de la corteza, llegando a alcanzar 50 a 70 km de espesor (e.g., Heit et al. 2014). Al adquirir el máximo espesor cortical se formaron corrimientos paralelos al orógeno de rumbo N-S y zonas de fallas transcurrentes con orientación NO-SE conformando los lineamientos regionales que caracterizan la región de la Puna (e.g., Viramonte et al. 1984; Riller et al. 2001; Norini et al. 2013). A lo largo de estos sistemas de fallas tuvo lugar un importante volcanismo el cual dio origen a cadenas volcánicas transversales desarrolladas durante el Mioceno-Reciente (e.g., Viramonte et al. 1984; Riller et al. 2001; Matteini et al. 2002a, 2002b, 2002c; Acocella et al. 2011; Norini et al. 2013; Báez et al., 2023).

Alonso et al. (1984) propuso dividir a la Puna en dos sectores diferentes en base a sus características geológicas re-

gionales separados por el lineamiento Calama-Olacapato-El Toro (COT, Fig.1). Es una estructura que constituye un segmento principal de deformación cortical con una longitud total de más de 300 km y un ancho aproximado de 10 a 20 km (e.g., Acocella et al., 2011; Norini et al., 2013). La Puna Septentrional o Jujeña, cuyas rocas más antiguas aflorantes son de edad ordovícicas, y la Puna Austral o Salto-catamarqueña, la cual se caracteriza por la neotectónica, la presencia de numerosos estratovolcanes, conos y derrames de composición básica y por su basamento que corresponde a metamorfitas Precámbricas.

En el área donde se ubican los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos, fueron definidos dos ciclos eruptivos. El primer ciclo (17,15-5,3 Ma) fue el más extenso arealmente ya que se emplazaron estratovolcanes andesíticos-dacíticos, calderas de colapso, domos dacíticos-riolíticos y centros freatomagmáticos a lo largo del COT (Viramonte et al. 1984; de Silva et al. 2006; Acocella et al. 2011). El segundo ciclo (<1,5 Ma) de menor distribución, está representado por centros mono-

genéticos y centros freatomagmáticos (Acocella et al. 2011).

A lo largo del lineamiento COT se desarrolla una cadena volcánica transversal, dentro de la cual se reconocen volcanes compuestos, principalmente del Mioceno como Rincón, Chivinar, Guanaqueros, Tul-Tul, Del Medio, Pocitos, Quevar-Azufrero y la caldera Aguas Calientes (Fig.1; Viramonte et al. 1984; Viramonte y Petrinovic 1990; Matteini et al. 2002a, 2002b, 2002c; Grosse et al. 2017). También se destaca el volcanismo reciente, representado en la zona por el Volcán Tuzgle y los volcanes monogenéticos San Gerónimo y Negro de Chorrillos (e.g., Norini et al. 2014; Bustos et al. 2017; Fernández-Turiel et al. 2021).

La Figura 2 resume la geología de la zona (Blasco et al. 1996). El basamento del área está representado por sucesiones clástico-piroclásticas de la Formación Coquena (Ordovícico) que afloran al este de los volcanes estudiados y en la Sierra de Guayaos hacia el noroeste (Fig. 2). Los productos de los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos están mapeados como pertenecientes a la Formación Pucará y Formación Rumibola. La Formación Pucará agrupa a las dacitas y andesitas cuarcíferas con sus respectivos productos piroclásticos, de edad miocena (Fig. 2). La Formación Rumibola comprende andesitas hornblendíferas hipersténicas de edad pliocena (Fig. 2). Hacia el oeste, se reconoce la Formación Abra de Gallo, caracterizada por ignimbritas y tobas (Plioceno; Fig. 2). Por último, en el área de estudio también se han identificado depósitos aluviales y coluviales del holoceno con acumulaciones modernas de diverso origen, como abanicos aluviales, dunas, conos de deyección y salares (Salar del Rincón y Salar de Pocitos; Fig. 2).

A partir del Mioceno Superior, en la Puna se produjo un cambio en el estilo de deformación desde un acortamiento horizontal a un régimen de extensión longitudinal (Riller et al. 2001; Petrinovic et al. 1999; 2010). Este cambio tectónico habría favorecido el desarrollo de fallas subverticales con orientación de rumbo, las cuales podrían haber actuado como conductos para el ascenso del magma desde niveles profundos de la corteza media. Como resultado, se habrían configurado las condiciones estructurales que dieron lugar a las características tectono-magmáticas observadas durante el Mioceno Tardío (Riller et al. 2001; Acocella et al. 2011).

MARCO LOCAL: VOLCANES TUL TUL, DEL MEDIO Y POCITOS

Los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos, denominados en conjunto TUMEPO, son estratovolcanes andesíticos-dacíticos que conforman una cadena volcánica en sentido NO-SE

de 25 km de longitud (Fig. 2; Koukharsky y Munizaga 1990; Matteini et al. 2002b, 2002c). Forman parte de los principales estratovolcanes de retroarco desarrollados durante el Mioceno a lo largo del lineamiento COT (Matteini 2001; Matteini et al. 2002a, 2002b, 2002c; Grosse et al. 2017). Las edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ presentadas por Matteini (2001) y Matteini et al. (2002c) ubican la actividad volcánica de estos edificios en el Mioceno: Tul Tul ($8,1\pm0,3$; $5,1\pm1,1$ Ma), Del Medio ($5,7\pm0,3$ Ma) y Pocitos ($8,3\pm0,9$; $5,9\pm1,0$ Ma).

Las rocas presentan textura porfírica homogénea con fenocristales de plagioclasa y anfóbol con cristales subordinados de clinopiroxeno, ortopiroxeno y olivina (Matteini et al. 2002a). Geoquímicamente las composiciones son andesíticas y dacíticas con andesitas basálticas subordinadas para los volcanes Tul Tul y Del Medio. El volcán Pocitos está representado por composiciones andesíticas y dacíticas (Matteini et al. 2002b; Etcheverría 2003). Los volcanes muestran un esquema evolutivo donde los magmas se habrían originado a partir de mezclas con importante participación de fundidos del manto y fundidos corticales, además de cristalización fraccionada que habría actuado de forma subordinada (Etcheverría 2003).

Por otro lado, Matteini et al. (2002b) proponen un modelo geodinámico aplicable a la latitud de 24° en los Andes Centrales, desde el Mioceno Superior hasta el Reciente. A partir de características geoquímicas, isotópicas y modelado de elementos traza, concluyen que los magmas de la cadena TUMEPO reflejan una influencia fuerte de la corteza inferior máfica. Estos magmas se habrían generado por procesos tipo MASH en la base de la corteza, favorecidos por el adelgazamiento litosférico, el engrosamiento de la corteza inferior y el ascenso de astenosfera caliente.

METODOLOGÍA

El estudio morfológico y morfométrico se realizó en entorno GIS mediante el análisis de un DEM ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución espacial. Se utilizó un producto corregido radiométricamente generado por Alaska Satellite Facility que elimina las distorsiones geométricas y radiométricas inherentes al radar de apertura sintética (Laurencelle et al. 2015). El procesamiento y análisis de DEMs se realizó mediante la utilización de los programas ArcGis 10.8 y Envi 5.3. A partir de mapas temáticos se caracterizó la superficie de los volcanes por medio de la identificación de rasgos areales y lineales (Norini et al. 2004). Además, se calcularon los parámetros morfométricos utilizando el programa MORVOLC (Grosse et al. 2009; 2012).

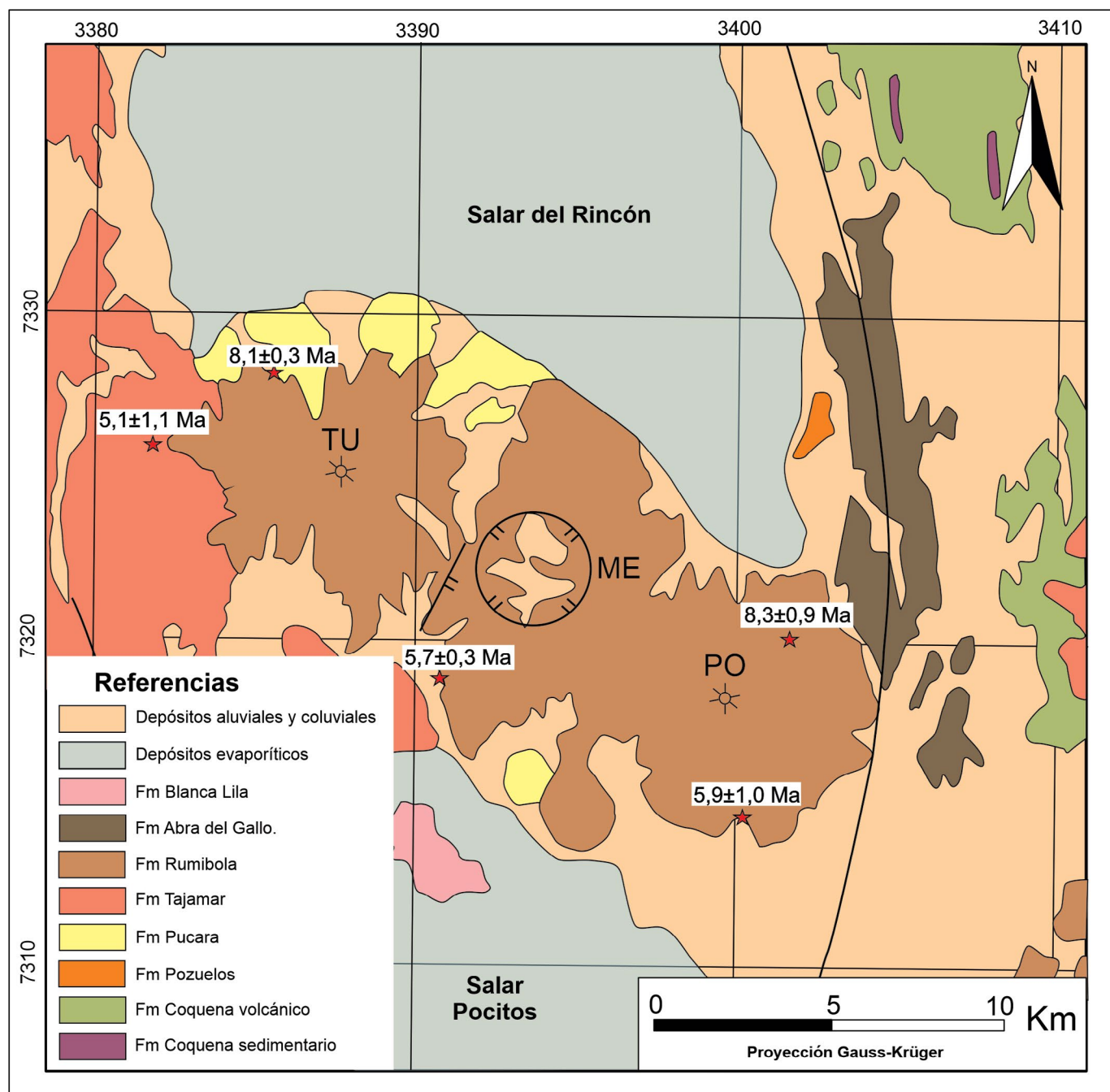


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio. Redibujado de Blasco et al. (1996). Se muestran las dataciones de Matteini (2001) y Matteini et al. (2002c).

Análisis morfológico

El análisis morfológico de los edificios volcánicos se realizó por medio de productos derivados del DEM, incluyendo imágenes de relieve sombreado, mapas de gradiente de pendiente y mapas de aspecto (dirección) de la pendiente. A partir de estos se identificó la red de drenaje, lineamientos, definición de los límites de los volcanes y la extracción de los rasgos geomorfológicos.

La red de drenaje fue delineada a partir de un DEM, me-

dante un análisis hidrológico basado en la dirección y acumulación del flujo superficial en GIS. Este proceso permitió identificar los cauces principales a partir de un umbral de escurrimiento, eliminando depresiones espurias y garantizando la continuidad del flujo. Finalmente, la red fue jerarquizada y convertida a formato vectorial para su análisis espacial.

A partir del DEM y sus productos derivados (mapas de pendiente, aspecto e imágenes de relieve sombreado), se delimitó manualmente el contorno de la cadena volcánica

TUMEPO considerando únicamente el relieve positivo asociado a los edificios volcánicos. Esta delimitación morfológica no refleja la extensión total de los productos eruptivos, sino que define el volumen constructivo (positivo) de los edificios volcánicos, siguiendo criterios propuestos por Smith y Clark (2005), Evans (2012) y Bustos et al. (2020). La identificación de los límites entre los tres edificios que componen la cadena se realizó mediante una inspección detallada del DEM y sus derivados, prestando especial atención a las transiciones morfológicas, rupturas de pendiente y frentes de coladas. Este análisis permitió definir con mayor precisión la extensión areal de los volcanes Tul-Tul y Pocitos, ubicados en los extremos de la cadena, y en consecuencia, delimitar el alcance del edificio central (Volcán del Medio). También se extrajeron los rasgos geomorfológicos de los volcanes (direcciones de las coladas de lava, crestas de presión, cráteres y domos volcánicos) siguiendo la metodología de Ventura et al. (2005) obteniéndose un mapa geomorfológico de la cadena volcánica en estudio.

Análisis morfométrico

La morfometría es la determinación cuantitativa de los parámetros geométricos del relieve. Los parámetros morfométricos de los tres edificios volcánicos estudiados (altura, área, volumen, pendiente, índice de elipticidad, índice de irregularidad, etc.) se extrajeron mediante el algoritmo MORVOLC desarrollado por Grosse et al. (2009; 2012). Esta consiste en: (1) preparación de los DEMs, es decir, la extracción de los productos derivados de estos, mediante un software de entorno GIS; (2) delimitación manual de los límites de los volcanes utilizando los productos derivados de DEMs, y para el caso particular del volcán Del Medio también se incluyó la delimitación del cráter; (3) cálculo de parámetros morfométricos aplicando el código MORVOLC.

Los resultados obtenidos de la ejecución del código MORVOLC se agrupan en parámetros de tamaño, de forma, de pendiente y de orientación que a su vez pueden caracterizar la forma en planta y en perfil de un edificio volcánico (Grosse et al. 2009; 2012).

La forma en planta de los volcanes se caracteriza mediante dos índices independientes: el índice de elipticidad (*ie*) que cuantifica la elongación de las curvas de nivel y el índice de irregularidad (*ii*) que considera la complejidad del contorno del volcán (Grosse et al. 2009). El *ie* es igual a 1 para un círculo y aumenta con el alargamiento, mientras que el *ii* es igual 1 para un círculo y aumenta con el incremento de la complejidad del contorno. Este conjunto de datos puede considerarse como la huella dactilar de un volcán (Grosse et al. 2012). Estos índices se calculan para las curvas de nivel cerradas

dentro del área del volcán estudiado.

MORVOLC calcula la altura y el volumen del volcán mediante dos métodos distintos (e.g., Grosse et al., 2012, 2014). Por un lado, estima una altura y un volumen máximos considerando una base horizontal situada al nivel del punto de menor elevación del edificio volcánico. Por otro lado, emplea una superficie basal tridimensional ajustada al contorno más bajo del edificio utilizando el método de ponderación por distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés, *inverse distance weighting*), a partir del cual se obtienen una altura IDW y un volumen IDW. La diferencia entre los valores de altura y volumen calculados por ambos métodos dependerá de la pendiente y la irregularidad del terreno sobre el que se asienta el edificio volcánico. Grosse et al. (2014) señalan que, en casos donde los edificios volcánicos se superponen, como en el presente estudio, los valores más realistas de altura y volumen serán intermedios entre los valores máximos y los calculados mediante IDW.

Para caracterizar la forma del perfil de los volcanes se utilizan valores de pendientes, promedios, máximos y mínimos, también se usa promedio de la pendiente en función de la altura. Por otro lado, se tienen en cuenta las relaciones altura/ancho de base (H/W_B) y ancho de cumbre/ancho de base (W_S/W_B) (Grosse et al. 2009). Para el caso particular del volcán Del Medio se delimitó manualmente su cráter y se incluyó en el análisis con MORVOLC obteniéndose los parámetros para esta morfología particular.

RESULTADOS

Análisis morfológico

La morfología de los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos se estudió desde un punto de vista cualitativo mediante el análisis de DEM (Fig. 3). De los tres edificios volcánicos, Tul Tul es el más puntiagudo, sin evidencias de cráter en su cima. De igual manera, el volcán Pocitos no muestra indicios de un cráter bien definido. En contraste, la zona cumbre del volcán del Medio se distingue por la presencia de un cráter de gran tamaño. Además, en los flancos de este último se identifican varios domos lávicos emplazados (Fig. 3).

Con el objetivo de representar todas las geoformas de la cadena volcánica TUMEPO se extrajeron tanto los rasgos epivolcánicos como los volcánicos con la ayuda de las imágenes obtenidas de los DEMs (imágenes de relieve sombreado, mapa de aspecto, mapa de pendiente; Fig. 4). La integración de los resultados obtenidos se representa en el mapa geomorfológico generado (Fig. 3). En una primera instancia se identificaron los abanicos aluviales distribuidos alrededor de

los volcanes. La mayor concentración de abanicos aluviales se ubica en las laderas sur de los volcanes, lo que se corresponde con las zonas en donde se registran las mayores pendientes (Figs. 3, 4). Utilizando los mapas de pendiente y las imágenes de relieve sombreado con distintos ángulos de iluminación derivadas de los DEMs, se identificaron las direcciones relativas de flujo de las coladas lávicas identificadas en los volcanes (Fig. 3). Esto fue posible en los flujos lávicos con mejor estado de conservación, ya que en otros el grado de erosión elevado, dificulta determinar tanto los límites como su dirección de flujo. Las coladas del volcán Tul Tul preservan las direcciones de flujo originales, además de algunas crestas de presión que se disponen de manera perpendicular al flujo (Fig. 3). También se delimitaron los domos volcánicos en el volcán Del Medio y en el volcán Pocitos (Fig. 3).

El mapa de aspecto y su histograma muestran que los volcanes tienen una mayor superficie con laderas de orientación norte y noreste (Fig. 4a). Además, las orientaciones de las laderas restantes presentan extensiones relativamente similares entre sí. En el volcán Tul Tul, las pendientes más elevadas coinciden con frentes de coladas lávicas que se ubican radialmente desde la cima y también con zonas de quebradas importantes (flanco sur del edificio, Figs. 3 y 4). Hacia la base,

principalmente en el flanco norte del volcán, las pendientes son más suaves (Figs. 3 y 4). En el interior del cráter del volcán Del Medio preponderan las orientaciones noroeste y sur (Fig. 4a). El mapa de pendiente muestra una predominancia de pendientes elevadas en zonas del cráter, en regiones que indican frentes de coladas principalmente en la zona norte del volcán y laderas de domos. También se asocian a laderas escarpadas y profundas hacia el sur del volcán (Figs. 3 y 4). Se destaca una zona de baja pendiente en el interior de su cráter, rasgo que lo diferencia de los demás (Figs. 3 y 4). El volcán Pocitos, por otro lado, posee pendientes moderadas a altas (20° - 40°) las cuales se concentran en la zona sur del volcán. Las pendientes más elevadas se registran hacia el oeste y sur del edificio, en concordancia con la zona más irregular del volcán y a la identificación de frentes de coladas de lavas (Figs. 3 y 4).

La extracción de rasgos lineales, es decir, el mapeo de lineamientos, se realizó de forma manual utilizando las diferentes imágenes de relieve sombreado derivadas del procesamiento de los DEMs (Fig. 5). El reconocimiento de lineamientos también fue respaldado con el uso de las imágenes de aspecto y de pendiente. Los lineamientos obtenidos en cada imagen de relieve sombreado con distinta dirección de

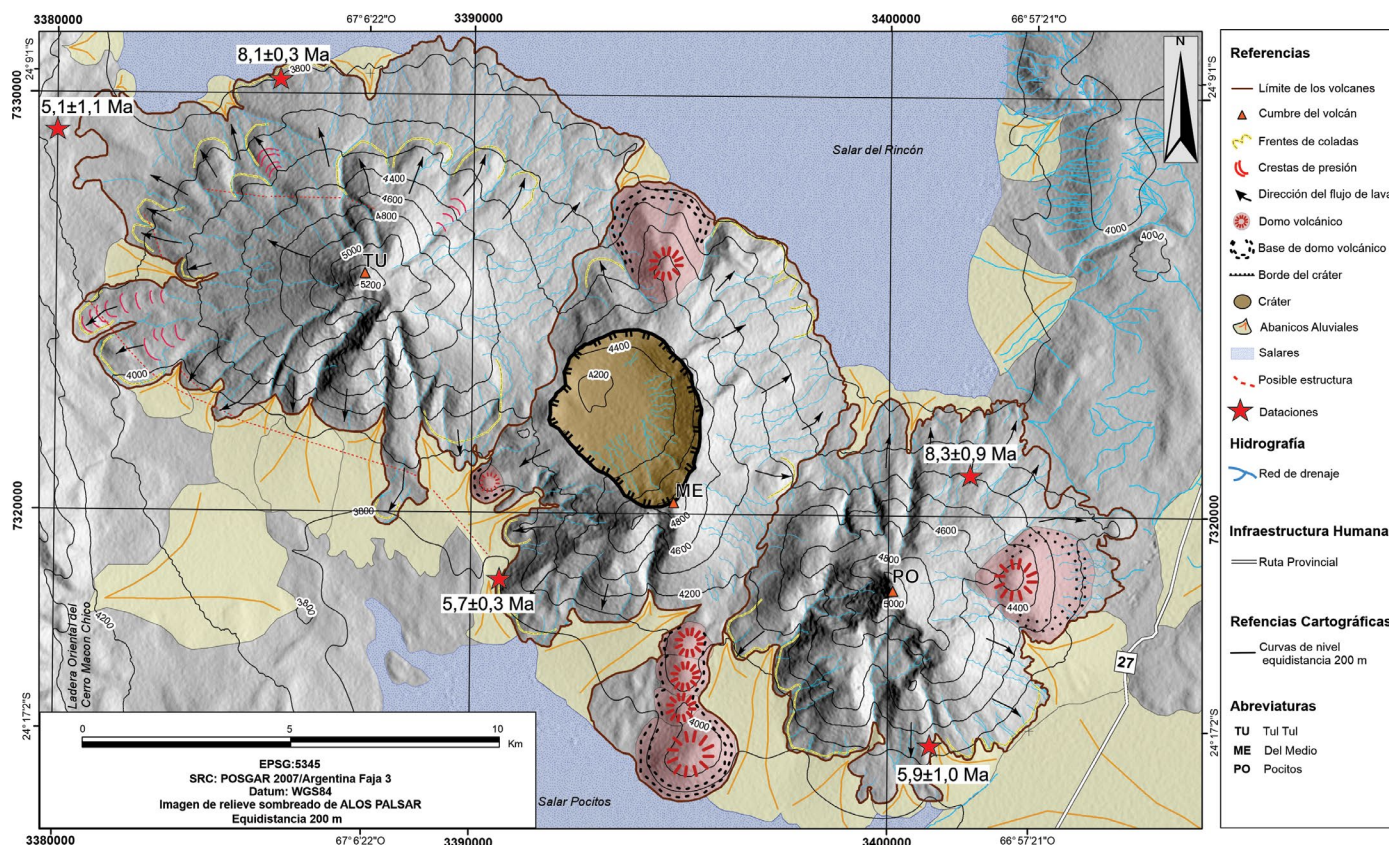


Figura 3. Mapa geomorfológico del área de la cadena volcánica TUMEPO. Las estrellas indican las dataciones radiométricas de Matteini (2001) y Matteini et al. (2002c).

iluminación fueron integrados en un solo archivo para confeccionar un mapa de lineamientos (Fig. 5). Del análisis estadístico del azimuth de los lineamientos se desprende que existen dos modas principales que son en sentido NNO-SSE y NNE-SSO (diagrama de rosas en Fig. 5).

El DEM ALOS de 12.5 m de resolución espacial, permitió extraer una red de drenaje muy detallada para la zona en estudio (Fig. 6). En general, los cauces fluviales siguen un patrón radial desde la cima de los volcanes lo que le confiere una red de tipo radial (típica de estratovolcanes o de escudos) (Figs. 3 y 6). El volcán Tul Tul se caracteriza por una red de drenaje radial homogénea con quebradas profundas y empinadas en el flanco sur, con orientaciones NNE-SSO y NNO-SSE, y longitudes que oscilan entre 1 y 3 km (Figs. 3 y 6). En el cráter del volcán Del Medio se desarrolla un patrón de drenaje anular y centrípeto. Hacia los límites con los volcanes adyacentes, la red de drenaje muestra una distorsión que sigue de manera paralela los contornos entre los edificios, en una dirección aproximada N-S. En el flanco sur del volcán Del Medio se destaca una quebrada profunda de orientación

NNE-SSO, con una longitud cercana a 1 km (Fig. 6). Por su parte, el volcán Pocitos presenta también una red de drenaje radial, aunque menos regular que la del Tul Tul. En su flanco norte se observan quebradas importantes de orientación N-S dispuestas de forma paralela, mientras que en el flanco sur predominan crestas y quebradas con dirección principalmente NNE-SSO (Figs. 3 y 6).

Análisis morfométrico

Volcán Tul Tul. El edificio volcánico tiene una altura máxima de 1.559 m (cota: 5.276 m s.n.m.) desde la base hasta la cumbre y una mínima de 1337 m (Tabla 1), siendo el edificio más alto de la cadena TUMEPO. El ancho medio de la base es 10.439 m, con un área de 85,59 km² y un volumen de máximo de 40 km³ y mínimo de 23 km³ (Fig. 7a; Tabla 1). La forma en planta está caracterizada por valores bajos de los índices de irregularidad (valor promedio de 1,21) y de elipticidad (valor promedio de 1,64) comparando a los tres volcanes en estudio. Los valores del índice de irregularidad se mantienen constantes hasta la altura de 5.100 m s.n.m. donde disminu-

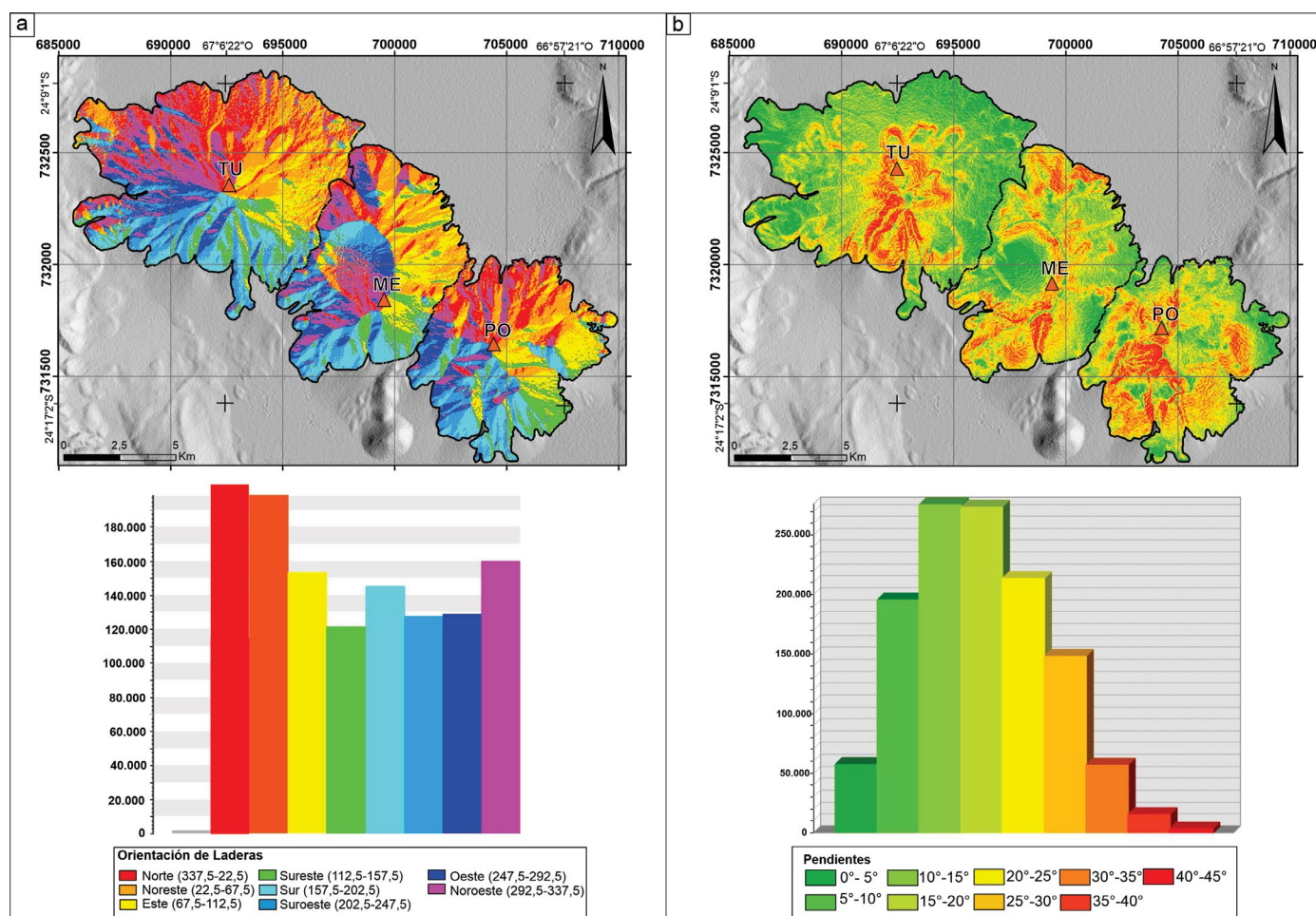


Figura 4. Imágenes derivadas del DEM ALOS PALSAR. a) Mapa de aspecto y su histograma de frecuencia. b) Mapa de pendiente y su histograma de frecuencia.

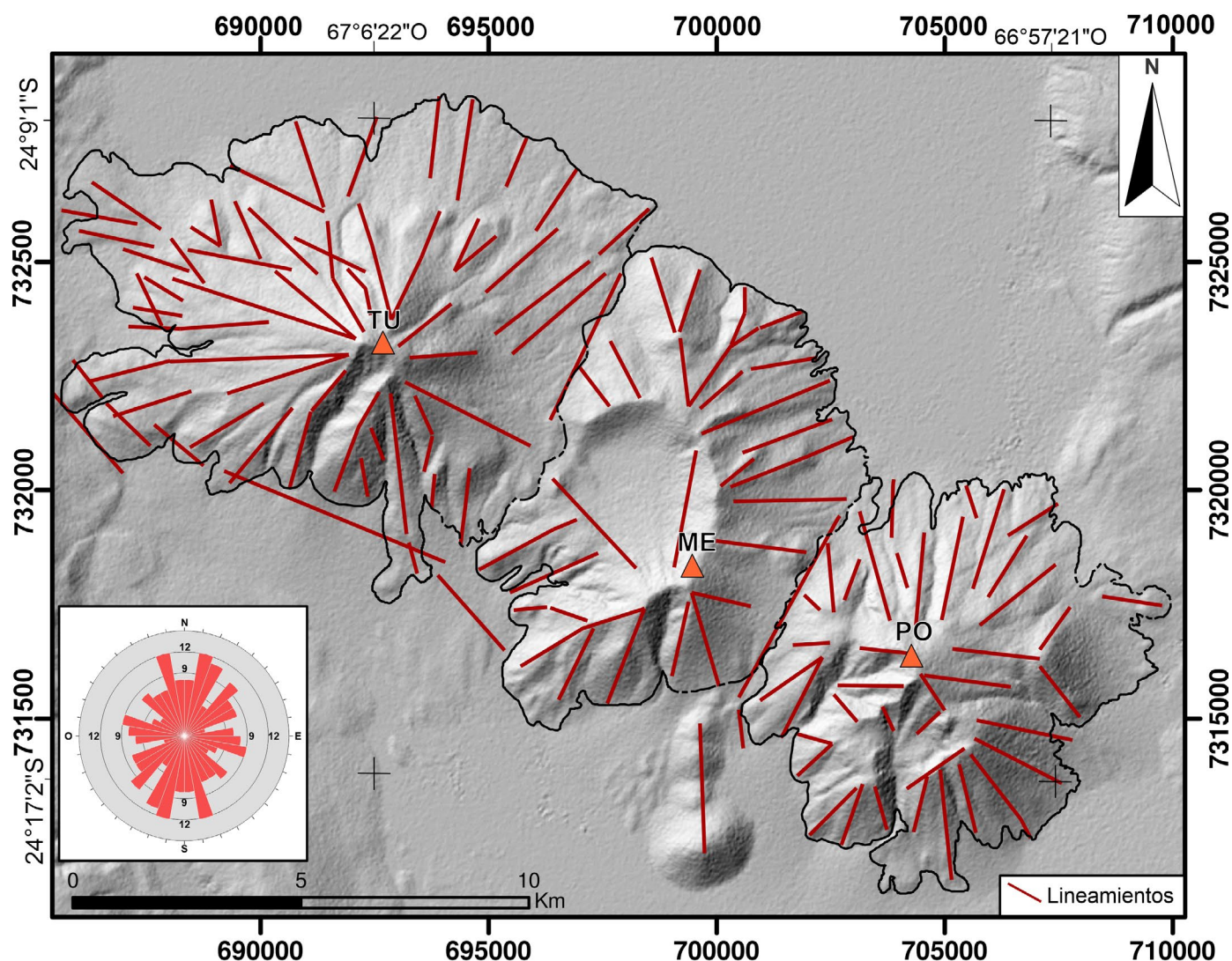


Figura 5. Lineamientos de la cadena volcánica TUMEPO. Inserto diagrama de frecuencia del azimut de los lineamientos. El contorno corresponde al utilizado para aplicar el código MORVOLC. La imagen de fondo es una imagen de relieve sombreado derivado del DEM ALOS PALSAR.

yen hasta llegar a 1,03 a los 5.300 m s.n.m. (Fig. 7a). El índice de elipticidad se mantiene alrededor de 1,5 entre las alturas de 4.300 y 4.900 m s.n.m. y aumenta entre 2 y 2,5 para alturas mayores a 5.000 m s.n.m. (Fig. 7a). El edificio presenta relación altura/ancho de base ($H/W_B = 0,13$) media y relación ancho de cumbre/ancho de base ($W_s/W_B = 0,016$) baja tomando como referencia los valores presentados por Grosse et al. (2012). El volcán Tul Tul tiene una pendiente media de 15° . Los valores de pendiente aumentan constantemente desde la base hasta los 5.000 m, llegando hasta los 25° . Después de los 5.000 m s.n.m. disminuye llegando hasta los 20° a los 5.100 m s.n.m. Finalmente, por encima de los 5.100 m s.n.m. aumenta hasta 30° en regiones de la cumbre (Fig. 7a).

Volcán Del Medio. El volcán Del Medio tiene una altura máxima de 1.178 m (cota: 4.842 m s.n.m.) y mínima de 847

m. El ancho medio de su base es de 8.381 m y su área es de 55,17 km² con un volumen máximo de 30 km³ y mínimo de 14,5 km³ (Fig. 7b; Tabla 1). Tiene valores muy altos del índice de elipticidad (ei promedio=2,17) e intermedios del índice de irregularidad (ii promedio=1,06) indicando una forma en planta elongada e irregular. El índice de irregularidad se mantiene constante hacia la cumbre (Fig. 7b). Por otro lado, el índice de elipticidad aumenta hasta un valor máximo de 4 a los 4.800 m s.n.m. El cálculo de los parámetros morfométricos excluyendo el cráter arroja una relación altura/ancho de base ($H/W_B = 0,108$) y ancho de cumbre/ancho de base ($W_s/W_B = 0,034$) muy baja (Fig. 7b). La pendiente media es de 18° y su pendiente promedio máxima alcanza los 24° . En este edificio volcánico la pendiente comienza con 15° y aumenta progresivamente desde su base hasta los 4.100 m s.n.m.,

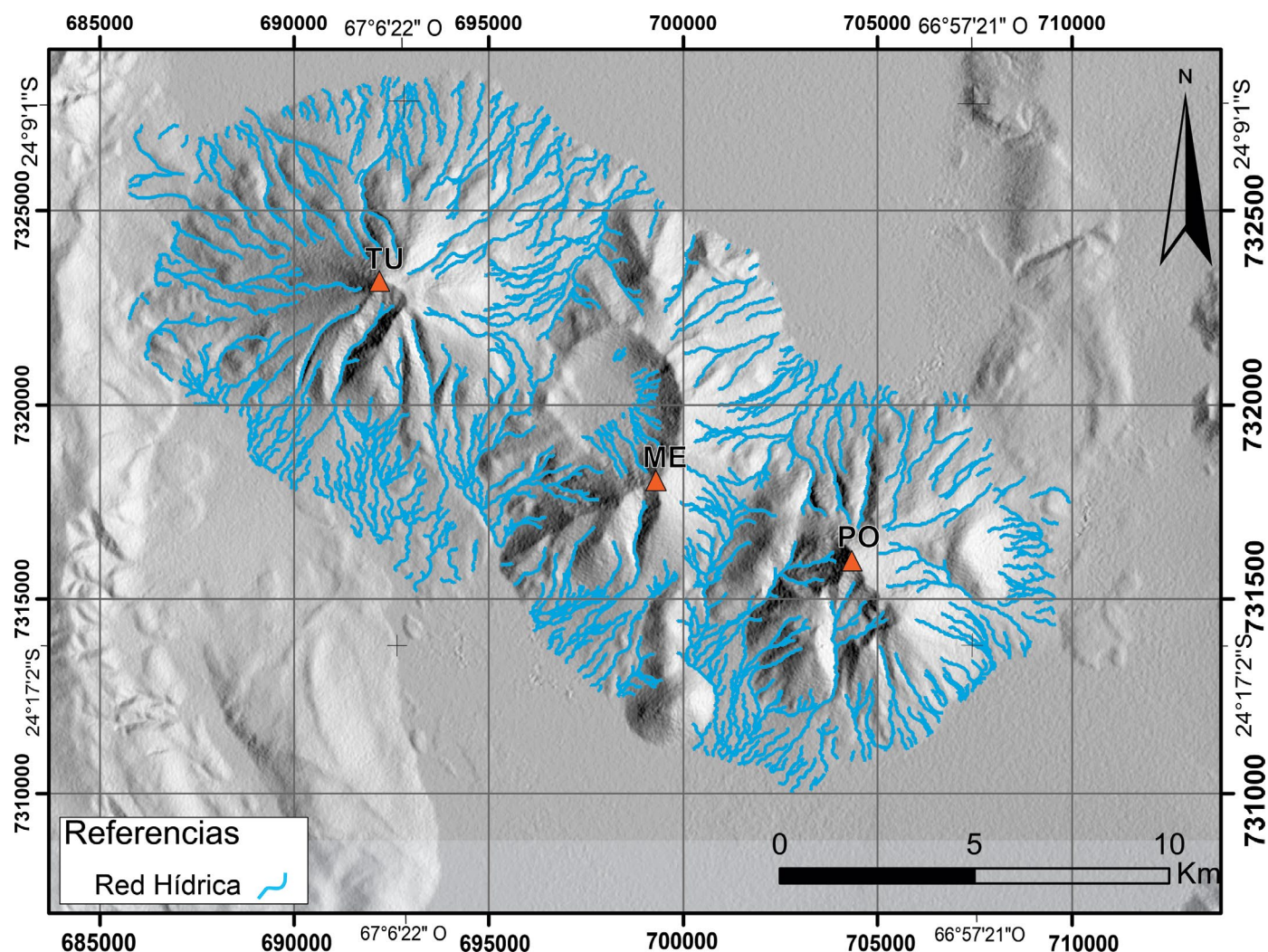


Figura 6. Red de drenaje derivada del DEM. La imagen de fondo es una imagen de relieve sombreado derivado del DEM ALOS PALSAR.

llegando hasta unos 20° , luego comienza una disminución abrupta hasta los 4.200 m s.n.m. alcanzando nuevamente 15° . Por encima de los 4.200 m s.n.m., la pendiente va en incremento otra vez llegando hasta 25° a los 4.800 m s.n.m., luego comienza a disminuir hasta su cumbre. Se calcularon los parámetros morfométricos del cráter otorgando un ancho de 3595 m, una profundidad máxima de 642 y mínima de 322 m, volumen máximo 4,6 y volumen mínimo de 1,7 km^3 (Tabla 2). La relación ancho de cráter/ancho basal del edificio es de 0,43 y relación ancho de cráter/ancho basal de la cima es de 12,5 (Tabla 2).

Volcán Pocitos. La altura máxima del volcán Pocitos es de 1.303 m (cota: 5.036 m s.n.m.) y la mínima es de 1095 m. El ancho medio es de 8.140 m, un área de la base de 52 km^2 y un volumen máximo de 27 km^3 , y mínimo de 17 km^3 (Fig. 7c; Tabla 1). Los valores de los índices de elipticidad (ie promedio=1,95) y de irregularidad (ii promedio=1,39) son

intermedios. El índice de irregularidad aumenta desde la base hasta los 4.550 m s.n.m. a un valor de 1,79 y luego disminuye hacia la cumbre llegando a 1,10 en el punto más alto (Fig. 7c). El índice de elipticidad tiene un comportamiento similar al índice de irregularidad hasta los 4.600 m s.n.m. con un valor de 2,28 para luego disminuir a 1,74; continúa aumentando hasta un valor de 2,74 a los 4.800 m s.n.m. donde comienza a disminuir hasta la cumbre (Fig. 7c). El edificio posee relación altura/ancho de base ($H/W_B = 0,136$) intermedia y ancho de cumbre/ancho de base ($W_S/W_B = 0,041$) muy baja, al igual que Tul Tul (Tabla 1). El volcán Pocitos tiene una pendiente media de 20° y su pendiente promedio máxima es de 26° . Los valores de la pendiente aumentan desde 8° en la base hasta los 4.400 m s.n.m. con 24° . A mayores alturas los valores de pendiente disminuyen y se mantienen entre los 19° y 22° hasta los 4.850 m s.n.m. donde incrementan hasta su valor máximo (Fig. 7c).

Tabla 1. Datos morfométricos de los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos.

	Altura del edificio máxima (m)	Altura del edificio IDW (m)	Ancho de base (m)	Área (km ²)	Volumen máximo (km ³)	Volumen IDW (km ³)	Índice de elipticidad medio (ie)	Índice de irregularidad medio (ii)	Altura/Ancho de la base (H/Wb)	Ancho de cumbre/Ancho de base (Ws/Wb)	Pendiente media (°)	Pendiente promedio máxima (°)
Tul Tul	1559	1337	10439	85,5	40	23	1,63	1,21	0,13	0,016	15	28
Del Medio	1178	847	8381	55	29	14,5	2,17	1,06	0,10	0,034	18	24
Pocitos	1303	1095	8140	52	27	17	1,95	1,39	0,14	0,041	19,5	26

DISCUSIONES

Mapeo Geomorfológico de la cadena volcánica TUMEPO

El análisis morfológico de la cadena volcánica estudiada revela la presencia de tres edificios parcialmente superpuestos, entre los cuales destaca un amplio cráter en la zona de cima del volcán Del Medio, que constituye una estructura prominente desde el punto de vista morfológico (Fig. 3, Fig. 7). Esta morfología sugiere una actividad eruptiva explosiva de gran magnitud o un posible episodio de colapso en este edificio. En los tres volcanes se identificaron formas lobuladas asociadas a frentes de coladas lávicas, cuya distribución radial respecto a la cima de cada edificio sugiere un patrón de emisión centrado y sostenido probablemente alimentadas desde los conductos principales (Fig. 3). Este arreglo geométrico permite inferir la existencia de fases efusivas significativas, posiblemente asociadas a una baja viscosidad del magma en los momentos de emisión, característica de volcanes compuestos en fases intermedias de su evolución. El volcán Tul Tul conserva los flujos lávicos mejor preservados, dentro de los cuales se reconocen crestas de presión orientadas perpendicularmente a la dirección de avance de las coladas (Fig. 3). Este notable estado de conservación podría atribuirse a una menor antigüedad relativa de las efusiones asociadas a este edificio (ver próximo apartado), así como a una menor exposición a procesos erosivos, posiblemente vinculada a condiciones post-eruptivas más estables. La identificación de formas dómicas en el entorno del volcán Del Medio, así como hacia el sector oriental del volcán Pocitos (Fig. 3), sugiere episodios eruptivos con magmas de mayor viscosidad, posiblemente de composición más evolucionada. La coexistencia de flujos extensos y estructuras dómicas en una misma cadena volcánica podría indicar una evolución composicional del sistema magmático o una dinámica eruptiva compleja a lo largo del tiempo como fue propuesto por Matteini et al. (2002b).

En los flancos sur de los volcanes se observan quebradas de pendiente pronunciada con direcciones dominantes

NNO-SSE y NNE-SSO (Figs. 3 y 6). Asociados a estas zonas de fuerte pendiente, se desarrollan abanicos aluviales bien definidos, los cuales fueron mapeados principalmente en las laderas ubicadas al sur de los edificios volcánicos (Figs. 3 y 4). La coincidencia espacial entre los abanicos aluviales y las zonas de máxima pendiente sugiere una dinámica fluvial activa controlada tanto por la topografía volcánica como por factores estructurales. En este sentido, el análisis de los lineamientos de la zona permitió identificar dos direcciones principales, también con sentido NNO-SSE y NNE-SSO (Fig. 5), que coinciden notablemente con las orientaciones predominantes de las quebradas. Esta correlación sugiere un fuerte control tectónico en la organización del drenaje, posiblemente relacionado con sistemas de fracturas regionales que condicionaron tanto la erosión diferencial como la distribución del patrón fluvial. En términos generales, la red de drenaje en los tres edificios volcánicos presenta una configuración radial, coherente con el desarrollo típico de estructuras volcánicas. Sin embargo, se identifica una distorsión significativa en la zona de interferencia entre los edificios, donde los cauces adoptan trayectorias más alargadas en dirección NNE-SSO, en contraste con los drenajes más cortos y desconectados hacia el este y oeste (Fig. 6). Esta asimetría sugiere que la superposición de los edificios volcánicos ha modificado la red de drenaje original, generando zonas de acumulación y reorganización fluvial.

Las fuertes pendientes, así como las crestas y escarpas identificadas en distintos sectores de la cadena volcánica, podrían estar asociadas a procesos de colapso de los edificios volcánicos (e.g., Bernard et al. 2021). Este tipo de morfologías ha sido documentado en numerosos sistemas volcánicos donde eventos gravitacionales modifican de manera abrupta la estructura original del edificio (e.g., Bernard et al. 2021; Bustos et al. 2024). No obstante, el grado actual de preservación de estas formas no permite confirmar su origen únicamente a partir del análisis morfológico remoto. Para avanzar en esta interpretación, sería necesario complementar con estudios de campo detallados que incluyan análisis estratigráficos, identificación de depósitos de avalancha y caracterización de es-

estructuras asociadas al colapso. Es importante destacar que la actividad volcánica de la zona en estudio se circunscribe al Mioceno. Desde ese tiempo, los procesos modeladores del paisaje, como la erosión eólica y fluvial y su depositación modifican la forma original de los volcanes y de sus productos.

Es fundamental resaltar la importancia de los DEMs como herramientas clave para la elaboración de mapas geomorfológicos (e.g., Reddy 2018; Quesada-Román et al. 2023; Zangana et al. 2023). No obstante, es importante también señalar que se podría obtener un mapa geomorfológico de mayor precisión y detalle en la zona de estudio mediante el uso de un DEM de mayor resolución (como aquellos obtenidos a través de vehículos aéreos no tripulados) y mediante trabajos de campo (e.g., Garova et al. 2025).

Evolución geomorfológica de la cadena volcánica TUMEPO

Los datos de volumen y altura obtenidos en este trabajo fueron representados en el diagrama de clasificación morfológica propuesto por Grosse et al. (2009) (Tabla 1; Fig. 8). En dicho gráfico se plotearon los valores de altura y volumen estimados mediante el método IDW, incluyendo tanto los valores mínimos (indicados con una estrella en la Fig. 8) como el rango completo de valores (representado mediante barras). Los tres edificios analizados se ubican dentro del campo de los subconos, según esta clasificación, con el volcán Del Medio emplazado en el límite con el campo de los macizos, y el volcán Tul Tul cercano al campo de los conos (Fig. 8). Se observa una tendencia al aumento tanto en la altura como en el volumen desde el volcán Del Medio hacia el volcán Tul Tul, siendo el volcán Pocitos intermedio en ambos parámetros (Tabla 1; Fig. 8). La morfología del volcán Tul Tul sugiere una actividad predominantemente efusiva, sostenida en el tiempo, desde un centro de emisión central, lo cual habría dado lugar a una forma cónica regular y de perfil agudo (Figs. 3, 7a). En contraste, el volcán Del Medio presenta una marcada depresión en su cumbre asociada a un cráter de gran tamaño, lo que sugiere la ocurrencia de una erupción explosiva de gran magnitud que pudo haber truncado el edificio original, reduciendo su altura (Figs. 3, 7b). Este rasgo lo distingue claramente de los volcanes adyacentes. El pasaje de una actividad efusiva a un comportamiento explosivo se relaciona a la inte-

racción de múltiples factores, por lo que puede ser muy complejo (e.g., Sparks 1978; Giordano et al., 2021). El volcán Pocitos, aunque también clasifica como un sub-cono, presenta una morfología más irregular en comparación con Tul Tul (Fig. 3, 7c). Esta irregularidad podría estar asociada a una evolución eruptiva inicialmente localizada desde un conducto central, pero posteriormente modificada por procesos de colapso y/o erosión significativa de la cumbre. Es relevante considerar que los campos de clasificación morfológica de Grosse et al. (2009) se construyeron a partir de volcanes jóvenes. En consecuencia, los valores obtenidos para esta cadena volcánica podrían estar afectados por procesos post-eruptivos, como la erosión diferencial y/o colapsos gravitacionales, procesos que han sido documentados en otros centros volcánicos de la región (e.g., Norini et al. 2014; Bustos et al., 2024).

La morfología de los volcanes compuestos del sector del COT se distribuye principalmente en los campos de conos, subconos y macizos, según la clasificación morfológica propuesta por Grosse et al. (2009) (Fig. 8). Dentro del campo de los conos se ubican los volcanes Chivinar y Tuzgle, mientras que en el campo de los subconos se encuentran, además de los tres volcanes analizados de la cadena TUMEPO, los volcanes Chimpa y Guanaquero. Por último, los volcanes Rincón y Quevar se clasifican como macizos (Fig. 8). La mayoría de los edificios volcánicos de la región se agrupan dentro del campo de los subconos, lo cual no necesariamente indica una evolución hacia la morfología de macizos. Esta aparente migración en el diagrama puede estar influenciada por la presencia de irregularidades morfológicas que no reflejan un crecimiento lateral del edificio, sino que podrían ser consecuencia de procesos de degradación posteriores a la actividad volcánica. En particular, la erosión diferencial sufrida desde el Mioceno, así como la ocurrencia de colapsos gravitacionales, podrían haber modificado la morfología original de varios de estos edificios, desplazándolos hacia el campo de los macizos en el diagrama sin que ello refleje una evolución eruptiva real en ese sentido. Es relevante destacar que, hacia los flancos sur de la cadena TUMEPO, se identifican profundas quebradas y el desarrollo de abanicos aluviales, posiblemente como respuesta a la actividad tectónica regional. Estas estructuras geomorfológicas no solo evidencian una intensa dinámica exógena, sino que también podrían haber contri-

Tabla 2. Datos morfométricos del cráter del volcán Del Medio.

	Ancho medio del cráter (m)	Profundidad del cráter máximo (m)	Profundidad del cráter IDW (m)	Volumen máximo (km ³)	Volumen IDW (km ³)	Ancho cráter/ Ancho de la base (Wc/ Wb)	Ancho cráter/ Ancho de cima (Wc/Ws)	Pendiente media (°)	Pendiente promedio máxima (°)
Cráter Del Medio	3595	642	322	4.6	1.7	0.43	12.5	15	43

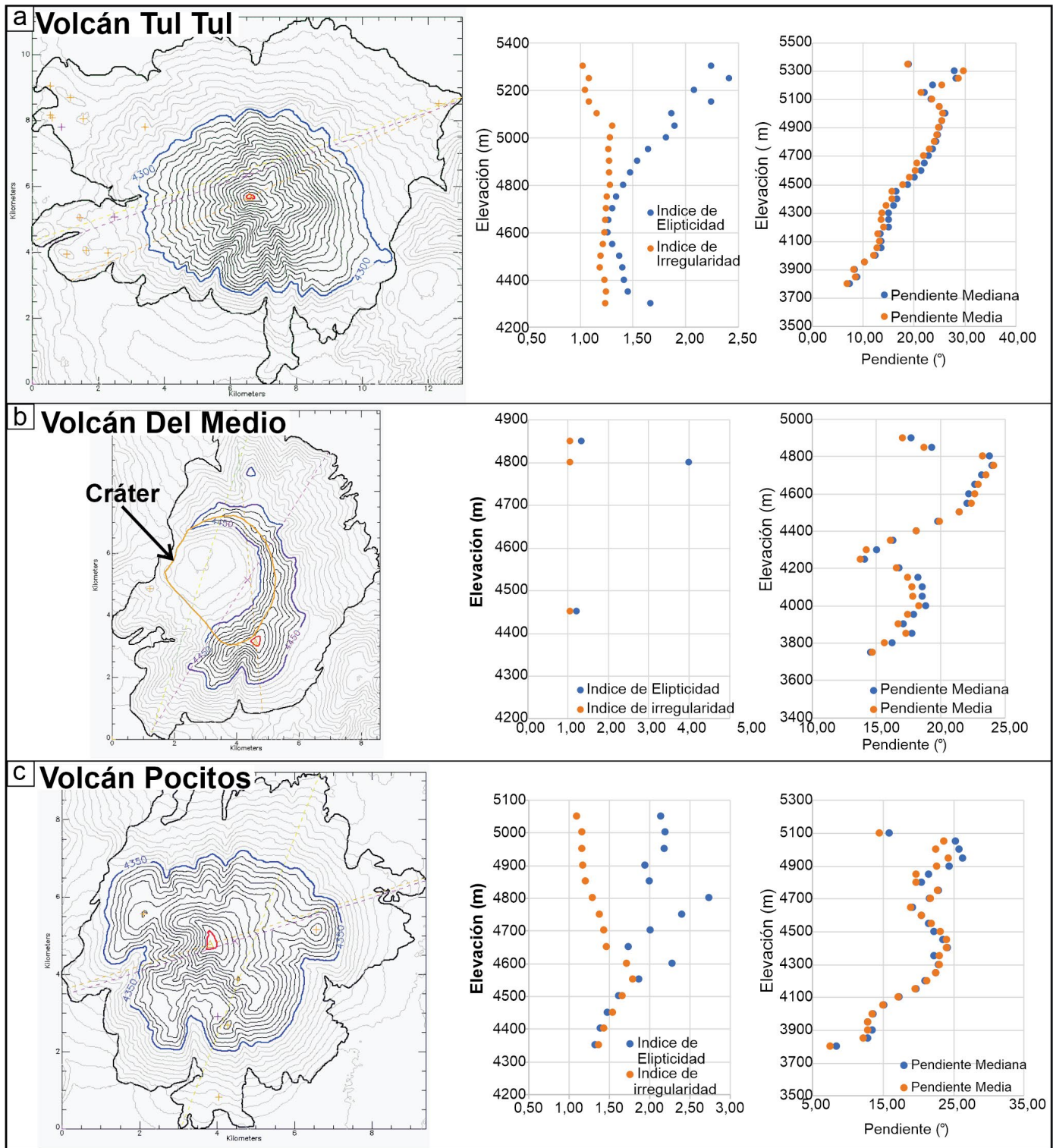


Figura 7. a) Imagen resultado del procesamiento de MORVOLC para el volcán Tul Tul. El contorno negro muestra la base del edificio. La línea azul indica la curva de nivel más baja dentro del edificio. Líneas grises: contornos de elevación. Contorno rojo: curva de nivel que marca el comienzo de la región de la cumbre. Triángulo naranja: la cumbre. Línea discontinua naranja: diámetro basal máximo que pasa por la cima. Línea púrpura discontinua: diámetro máximo que pasa por el centroide del contorno del edificio. Línea amarilla discontinua: diámetro máximo del contorno del edificio. Cruces naranjas: cimas secundarias. Cruces púrpuras: depresiones secundarias. Representación gráfica de la variación de los índices de elipticidad y de irregularidad con la altura. Representación gráfica de los valores de media y mediana de la pendiente en grados vs. la altura del edificio. b) Resultados para el volcán Del Medio. c) Resultados para el volcán Pocitos.

buido la erosión de los edificios volcánicos, disminuyendo su altura y afectando así su clasificación morfológica actual. En términos generales, la progresión desde conos hacia subconos y macizos en los diagramas de clasificación morfológica

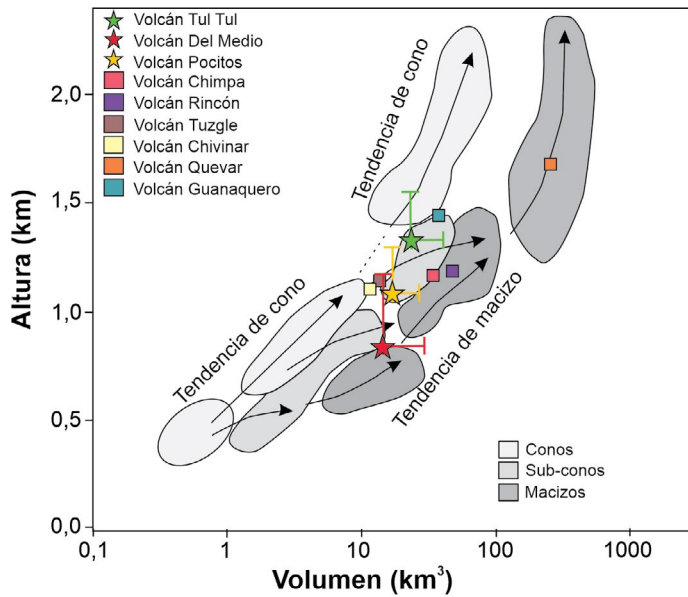


Figura 8. Diagrama de altura vs. volumen mostrando la clasificación de los edificios volcánicos ubicados en cercanías al lineamiento COT. Gráfico tomado de Grosse et al. (2009). Parámetros tomados de Grosse et al. (2017).

suele interpretarse como un reflejo de volcanes que migran su actividad eruptiva y comienzan a crecer lateralmente, desarrollando estructuras más complejas y superpuestas. Este patrón sí es observable en volcanes como Quevar y Rincón, los cuales presentan morfologías de macizos bien definidos con múltiples centros eruptivos parcialmente solapados (Fig. 8).

Para describir la forma del perfil de los edificios volcánicos analizados, se graficaron las relaciones H/W_B y W_s/W_B (Fig. 9a). Los volcanes Tul Tul y Pocitos presentan valores similares de H/W_B , entre 0,11 y 0,14, lo que sugiere perfiles relativamente empinados y comparables entre ambos. En particular, el perfil del volcán Tul Tul podría reflejar una actividad eruptiva concentrada en un único conducto central, con un crecimiento sostenido y sin interferencias por colapsos o actividad lateral, lo cual favoreció el desarrollo de un edificio con forma simétrica y bien definida. Por otro lado, el volcán Pocitos muestra un perfil ligeramente más empinado que Tul Tul, aunque con una base más ancha que el resto de los volcanes de la cadena, lo que podría estar asociado a procesos de acumulación con más extensión areal, eventos con mayor dispersión lateral de productos, y a procesos erosivos y/o de colapso. En contraste, el volcán Del Medio exhibe los valores más bajos de H/W_B entre los tres volcanes, lo que se interpreta como el resultado de la formación de un cráter de grandes dimensiones que redujo la altura relativa del edificio (Fig. 9a). Esta característica se refleja también en la relación W_s/W_B , donde el cráter del volcán Del Medio muestra un valor significativamente mayor en comparación con los otros dos volcanes, debido a la amplitud del cráter respecto a su base (cráter Del Medio en Fig. 9a).

En cuanto a la forma en planta de los edificios volcánicos (Fig. 9b), el volcán Tul Tul presenta la geometría más regu-

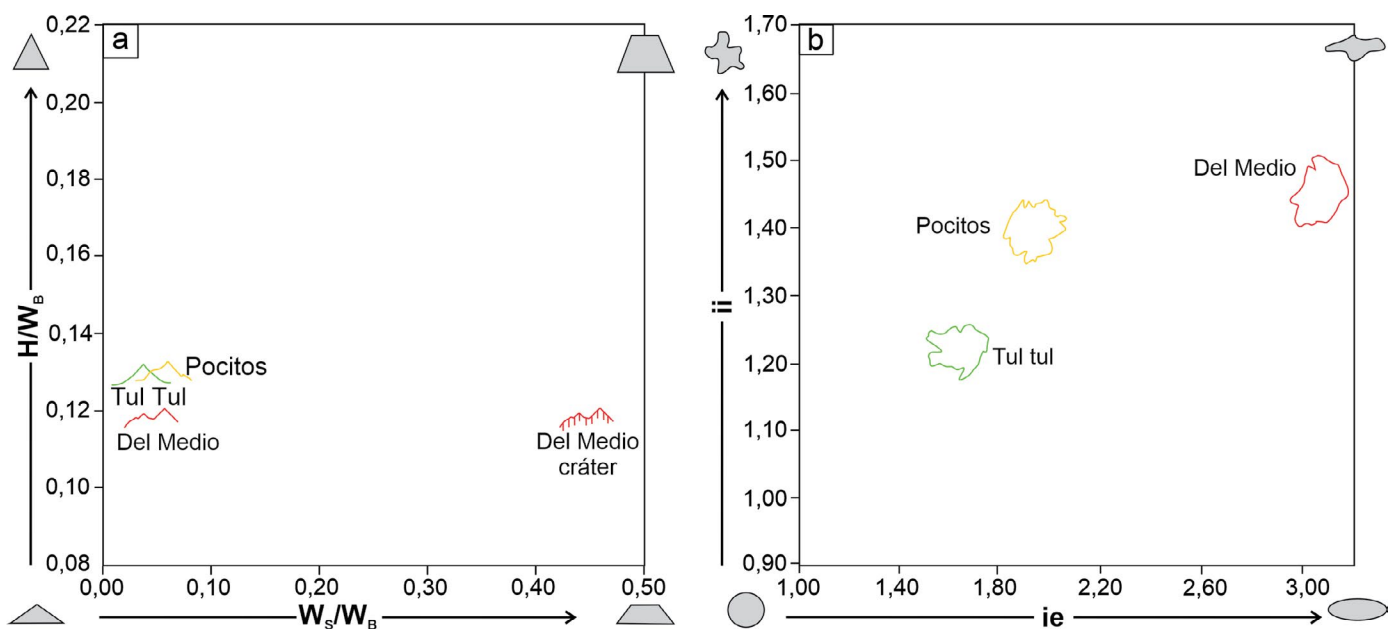


Figura 9. a). Relación de la altura/ancha basal (H/W_B) vs. relación ancho de cumbre / ancho de base (W_s/W_B) de los edificios volcánicos de la cadena TUMEPO ilustrando la forma de sus perfiles. Figura adaptada de Grosse et al. (2012). Se muestran los perfiles N-S atravesando la cima de los volcanes. b). Diagrama de los índices de elipticidad (ie) vs. índices de irregularidad (ii) de los contornos de elevación para los edificios volcánicos de la cadena TUMEPO. Figura adaptada de Grosse et al. (2012). Las vistas en planta corresponden al contorno de elevación cerrado más bajo dentro del edificio.

lar y circular, consistente con una evolución centrada y poco perturbada. En oposición, el volcán Del Medio muestra una planta más compleja y elíptica, lo que podría estar vinculado a procesos de colapso o erosión y también al crecimiento limitado por los dos volcanes colindantes (Fig. 9b). El volcán Pocitos exhibe valores intermedios de irregularidad y elipticidad, reflejando una morfología más heterogénea que Tul Tul, pero menos alterada que Del Medio (Fig. 9b).

La posición colindante de los tres volcanes que conforman la cadena TUMEPO hace importante valorar su morfología con respecto a la interferencia entre los edificios volcánicos. Las edades publicadas para los edificios de la cadena volcánica TUMEPO sugieren un desarrollo concomitante entre los distintos centros (Matteini et al., 2002c; Figs. 3 y 10). Las etapas iniciales de construcción de los volcanes Tul Tul y Pocitos se sitúan alrededor de los 8 Ma. En particular, el volcán Pocitos habría evolucionado entre aproximadamente 8 y 6 Ma, mientras que Tul Tul muestra un rango similar, con actividad registrada entre ~8 y ~5 Ma. Por su parte, el único dato cronológico disponible para el volcán Del Medio corresponde a una edad de 5,7 Ma, localizada hacia su periferia. Si bien la limitada cantidad de edades radiométricas dificulta establecer con certeza una secuencia evolutiva precisa, el solapamiento de los rangos temporales sugiere que los tres edificios habrían estado activos en lapsos coincidentes. Esta superposición cronológica resulta consistente con la hipótesis de crecimiento concomitante propuesta en este trabajo, la cual plantea que la actividad eruptiva simultánea de los volcanes adyacentes habría inducido un efecto en el desarrollo geomorfológico del volcán Del Medio.

El grado de erosión y la irregularidad descrita para el volcán Pocitos hace dificultosa la identificación de rasgos geomorfológicos preservados por lo que podría ser el volcán más antiguo de la cadena volcánica. La red de drenaje es radial, está bien desarrollada pero no es homogénea, como por ejemplo en el volcán Tul-Tul (Fig. 6). Los datos morfométricos indican que es un subcono (Fig. 8) con una forma en planta de valores intermedios del índice de irregularidad y elipticidad (Fig. 9b). La pendiente media del volcán Pocitos es similar al volcán Tul-Tul y mayor que el volcán Del Medio, con un área pequeña en la cima como en todos los edificios volcánicos de la cadena (Fig. 7a, Tabla 1). Su forma de subcono estaría relacionada a la erosión y también a probables eventos de colapso que podrían estar enmascarados (Matteini et al. 2002c; Etcheverría 2003). Las edades radiométricas indican que el volcán Tul Tul se construyó simultáneamente con el volcán Pocitos. El volcán Tul Tul posee una pendiente moderada a alta en todo el edificio que aumenta hacia la región de la cumbre (Fig. 7a). Presenta una red de drenaje radial

homogénea sin interferencias con el volcán adyacente hacia el este (Fig. 6), su forma aguda clasificando como subcono en el límite con el campo de los conos (Fig. 8) y forma regular en planta (Fig. 9b). Las características morfológicas de este volcán indican una actividad continua desde un conducto central que construyó un cono sin perturbaciones posteriores (por ejemplo, tectónicas, conductos secundarios o construcción de domos). La preservación de frentes de coladas y crestas de presión asociadas indicarían que la actividad volcánica registrada en este volcán es la más joven de la cadena volcánica. En el volcán Del Medio, la red de drenaje se observa claramente perturbada, desviándose hacia el norte, debido a la interferencia con los volcanes adyacentes (Fig. 6). Corresponde morfológicamente a un subcono con un cráter de grandes dimensiones con una red de drenaje de tipo anular (Fig. 3). La forma en planta es más compleja y elíptica con elongación NE-SO, como respuesta a la interferencia con los volcanes adyacentes y el desarrollo de domos en sus laderas norte y sur (Fig. 9b).

No obstante, es importante destacar que la escasez de dataciones absolutas en esta cadena volcánica representa una limitación significativa. La interpretación de una evolución sincrónica se basa en un conjunto reducido de datos, con una resolución temporal insuficiente para distinguir con precisión los intervalos de construcción, pausas eruptivas o posibles fases de sobreposición. En este sentido, se deberían contar con nuevas dataciones radiométricas en diferentes sectores de cada edificio volcánico, para refinar el marco temporal y validar con mayor solidez los patrones de crecimiento espacial y cronológico propuestos.

La Figura 10 propone una evolución morfológica esquemática para la cadena volcánica TUMEPO, basada en las relaciones entre morfología actual y las edades publicadas. La cadena volcánica TUMEPO inició alrededor de los 8 Ma con el crecimiento de los volcanes Pocitos y Tul Tul (Fig. 10a). El desarrollo se habría iniciado alrededor de los 8 Ma con la construcción de los volcanes Pocitos y Tul Tul (Fig. 10a). Posteriormente, se habría emplazado el volcán Del Medio, ubicado entre ambos, aunque no se descarta que su evolución haya sido parcialmente contemporánea, dado que la única edad disponible ($5,7 \pm 0,3$ Ma) corresponde a un afloramiento periférico (Fig. 10b). Esta ambigüedad cronológica, sumada a su ubicación intermedia, permite plantear la hipótesis de un crecimiento sincrónico o solapado con los otros dos edificios (Fig. 10b).

Durante la etapa siguiente, se habría producido un crecimiento concomitante de los tres volcanes, principalmente a través de actividad efusiva, lo que condujo al desarrollo de las principales morfologías actuales (Fig. 10c). En esta fase,

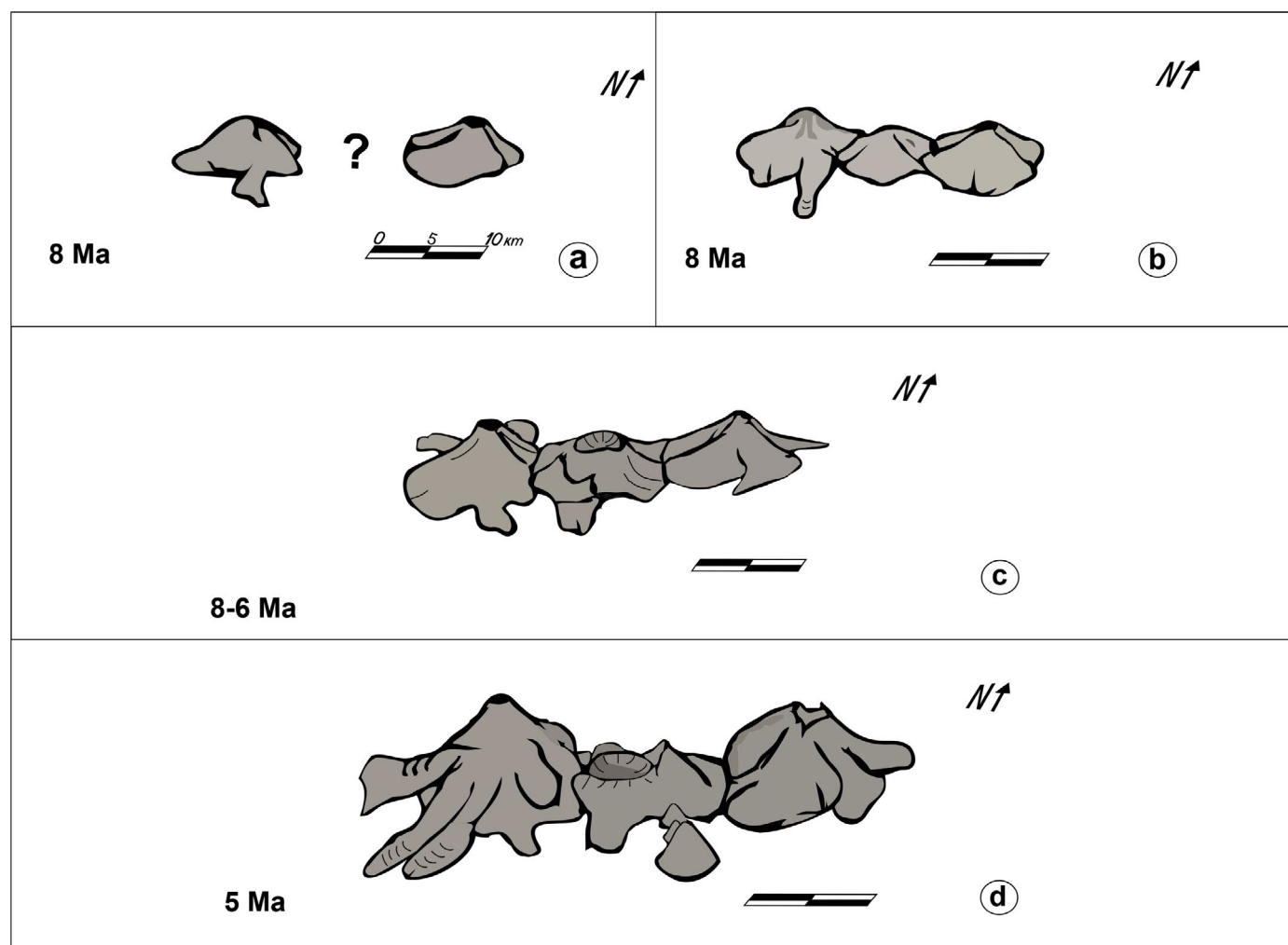


Figura 10. Modelo de evolución morfológica de los volcanes Tul Tul, Del Medio y Pocitos.

el volcán Del Medio habría experimentado una transición hacia una dinámica eruptiva más explosiva, evidenciada por la formación de un cráter de gran tamaño en su sector central. Esta característica lo distingue morfológicamente dentro de la cadena y sugiere un cambio en las condiciones magmáticas, posiblemente asociado a un aumento en el contenido de volátiles o a una modificación en el sistema de alimentación (Fig. 10c). En una etapa final, mientras continuaba la actividad en los volcanes Pocitos y Tul Tul, se emplazaron una serie de domos volcánicos alineados en dirección N-S en el volcán Del Medio (Fig. 10d). Asimismo, se formaron las coladas lávicas asignadas al volcán Tul Tul, posiblemente de edad más joven, por la conservación de frentes de coladas y crestas de presión bien definidas.

CONCLUSIONES

El análisis morfológico de la cadena volcánica revela una

evolución compleja caracterizada por la superposición de edificios volcánicos, fases eruptivas de distinta naturaleza y una red de drenaje fuertemente influenciada por factores estructurales y tectónicos. La identificación de un cráter, coladas lávicas, formas dómicas y estructuras asociadas a posibles colapsos sugiere una dinámica volcánica variada que combina eventos efusivos y explosivos, probablemente vinculados a cambios en la composición y viscosidad del magma a lo largo del tiempo.

La aplicación del esquema de clasificación morfológica propuesto por Grosse et al. (2009) permitió ubicar los tres edificios volcánicos dentro del campo de los subconos, aunque con variaciones entre ellos. El volcán Tul Tul se destaca por su morfología cónica regular y aguda, indicativa de una actividad efusiva centrada y sostenida. En contraste, el volcán Del Medio exhibe una marcada depresión en su cumbre, asociada a un gran cráter, que sugiere una erupción explosiva de gran magnitud posiblemente relacionada con un aumento en el contenido de volátiles del magma. El volcán Poci-

tos presenta características intermedias, con una morfología más irregular que podría deberse a colapsos parciales o a una intensa erosión post-eruptiva. El patrón regional también muestra que la mayoría de los volcanes del COT se agrupan dentro del campo de los subconos, lo cual, más que reflejar una evolución hacia macizos, podría deberse a la degradación morfológica post-eruptiva. Procesos como la erosión y los colapsos gravitacionales, probablemente activos desde el Mioceno, habrían modificado significativamente la morfología original de los edificios volcánicos.

En el caso específico de la cadena TUMEPO, la proximidad espacial entre los volcanes y la superposición de sus rangos cronológicos respaldan la hipótesis de un desarrollo concomitante, en el cual la actividad eruptiva simultánea entre los centros habría condicionado la morfología final de cada edificio. La presencia de domos post-eruptivos en el volcán Del Medio, así como la conservación de morfologías juveniles en Tul Tul, refuerzan este modelo. Sin embargo, la escasa cantidad de dataciones absolutas disponibles representa una limitación clave para validar con mayor precisión las secuencias evolutivas propuestas. Se concluye que la actual morfología de la cadena volcánica TUMEPO es el resultado de una interacción entre múltiples factores: la dinámica eruptiva particular de cada volcán, la interferencia espacial entre los centros, los procesos post-volcánicos (colapsos, erosión) y las condiciones tectónicas regionales.

En términos de la técnica utilizada, los resultados destacan la eficacia del uso de DEMs para el mapeo geomorfológico y la evaluación de las características morfométricas volcánicas, las cuales proporcionan una visión detallada de los procesos eruptivos y de erosión que han moldeado la región. Sin embargo, se sugiere que un DEM de mayor resolución, combinado con trabajos de campo, podría proporcionar datos aún más precisos, mejorando la resolución de los mapas y la interpretación de las geoformas.

Finalmente, los datos obtenidos permiten inferir una evolución compleja y dinámica de la cadena volcánica TUMEPO, con procesos de construcción volcánica, erosión y colapso que se han dado de manera concomitante a lo largo del tiempo. Este estudio ofrece una base sólida para futuros trabajos sobre la actividad volcánica y sus implicancias en la geodinámica de la región.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de la Tesis Profesional “Sistemas de Información Geográfica como herramienta para la caracterización morfológica de los volcanes Tul-Tul, del Medio y

Pocitos. Puna Central” de Mauricio Elio López, dirigida por E. Bustos y M. Arnosio de la Carrera de Geología (Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta) defendida en 2024. Se agradecen las revisiones realizadas por el Dr. P. Grosse y un revisor anónimo que mejoraron sustancialmente el trabajo presentado. También se agradece el manejo editorial del Dr. W. Báez y Dr. R. Astini.

REFERENCIAS

- Acocella, V., Gioncada, A., Omarini, R., Riller, U., Mazzuoli, R. y Vezzoli, L. 2011. Tectonomagmatic characteristics of the back-arc portion of the Calama–Olacapato–El Toro Fault Zone, Central Andes. *Tectonics* 30(3).
- Alcalá-Reygosa, J., Palacios, D. y Zamorano Orozco, J.J. 2016. Geomorphology of the Ampato volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Maps* 12(5): 1160-1169.
- Alonso, R., Viramonte, J.G. y Gutiérrez, R. 1984. Puna Austral – Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna Argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 43-63, San Carlos de Bariloche.
- Azzoni, R.S., Zerboni, A., Pelfini, M., Garzonio, C.A., Cioni, R., Meraldi, E. y Diolaiuti, G.A. 2017. Geomorphology of Mount Ararat/Ağrı Dağı (Ağrı Dağı Milli Parkı, Eastern Anatolia, Turkey). *Journal of Maps* 13(2): 182-190.
- Báez, W., Bustos, E., Chiodi, A., García, H.P.A., Álvarez, O., Simón, V. y Folguera, A. 2023. Reviewing the geodynamic impact of aseismic ridges subduction on the tectonic-magmatic evolution of the Southern Puna plateau. *Journal of South American Earth Sciences* 129: 104520.
- Baldis, B.J., Viramonte, J. y Salfity, J. 1975. Geotectónica de la comarca comprendida entre el Cratógeno Central Argentino y el borde austral de la Puna. 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Acta 4: 25-44, Buenos Aires.
- Bernard, B., Takarada, S., Andrade, S.D. y Dufresne, A. 2021. Terminology and strategy to describe large volcanic landslides and debris avalanches. *Volcanic debris avalanches: From collapse to hazard*: 51-73.
- Blasco, G., Zappettini, E.O. y Hongn, F.D. 1996. Hoja Geológica 2566-I San Antonio de los Cobres. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Buenos Aires.
- Bustos, E., Báez, W., Norini, G., Chiodi, A., Groppelli, G. y Arnosio, M. 2017. Using optical imagery data for lithological mapping of composite volcanoes in high arid Puna Plateau: Tuzgle volcano case study. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74(3): 357-371.
- Bustos, E., Arnosio, M., Báez, W., Norini, G., Suzaño, N.O. y Viramonte, J.G. 2020. Geomorphological evolution of the Chimpa stratovolcano in the back-arc region of the Central Andes. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)* 364: 107251.
- Bustos, E., Norini, G., Báez, W.A., Grosse, P., Arnosio, M. y Capra, L. 2025. A new remote-sensing-based volcanic debris avalanche database of Northwest Argentina (Central Andes). *Landslides* 22(2): 353-372.

- Casalbore, D., Bosman, A., Romagnoli, C., Di Filippo, M. y Chiocci, F.L. 2016. Morphology of Lipari offshore (Southern Tyrrhenian Sea). *Journal of Maps* 12(1): 77-86.
- Coira, B. y Mahlburg Kay, S. 1993. Implications of Quaternary volcanism at Cerro Tuzgle for crustal and mantle evolution of the Puna Plateau, Central Andes, Argentina. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 113: 40–56.
- Coira, B., Kay, S.M. y Viramonte, J.G. 1993. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna. A model for changing subduction geometry. *International Geology Review* 35(8): 677-720.
- de Silva, S.L. y Francis, P.W. 1991. *Volcanoes of the Central Andes*. Springer-Verlag, 213 p., New York.
- de Silva, S. y Lindsay, J.M. 2015. Primary volcanic landforms. En: Sigurdsson, H. (ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press: 273–297.
- de Silva, S.L., Zandt, G., Trumbull, R., Viramonte, J., Salas, G. y Jimenez, N. 2006. Large ignimbrite eruptions and volcanotectonic depressions in the Central Andes: a thermomechanical perspective. En: de Natale, G., Troise, C. y Kilburn, C. (eds.), *Mechanisms of Activity and Unrests at Large Calderas*. Geological Society of London Special Publication 269, Capítulo 3: 47–63.
- Di Traglia, F., Pistolesi, M., Rosi, M., Bonadonna, C., Fusillo, R. y Roverato, M. 2013. Growth and erosion: The volcanic geology and morphological evolution of La Fossa (Island of Vulcano, Southern Italy) in the last 1000 years. *Geomorphology* 194: 94-107.
- Etcheverría, M. 2003. *Geología y petrología de los volcanes cenozoicos Pocitos, Del Medio y Tul Tul, provincia de Salta, Argentina*. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 162 p., Buenos Aires.
- Evans, I.S. 2012. Geomorphometry and landform mapping: what is a landform? *Geomorphology* 137: 94–106.
- Favalli, M., Karátson, D., Mazzuoli, R., Pareschi, M.T. y Ventura, G. 2005. Volcanic geomorphology and tectonics of the Aeolian archipelago (Southern Italy) based on integrated DEM data. *Bulletin of Volcanology* 68(2): 157-170.
- Fernandez-Turiel, J.L., Saavedra, J., Perez-Torrado, F.J., Rodriguez-Gonzalez, A., Rejas, M., Guillou, H. y Aulinas, M. 2021. New ages, morphometric and geochemical data on recent shoshonitic volcanism of the Puna, Central Volcanic Zone of Andes: San Jerónimo and Negro de Chorrillos volcanoes. *Journal of South American Earth Sciences* 109: 103270.
- Gabrielli, S., Spagnolo, M. y De Siena, L. 2020. Geomorphology and surface geology of Mount St. Helens volcano. *Journal of Maps* 16(2): 585-594.
- Garova, E., Chadromtsev, B., Pedanov, A., Grebennikov, P., Iltuganov, I., Lobanov, P., Ponomarjovs, P., Draesner, F. y Fuchs, S. 2025. A general methodological framework for hazard assessment in remote mountain areas combining geomorphological mapping with UAV survey. *Journal of Mountain Science* 22(3): 763-775.
- Giordano, D., Russell, J.K. y Dingwell, D.B. 2021. Explosive volcanism: The interplay of magma rheology and volatile content. *Nature Reviews Earth & Environment* 2(8): 503–519.
- Gong, L., Li, N., Fan, Q., Zhao, Y., Zhang, L. y Zhang, C. 2016. Mapping the topography and cone morphology of the Dalinor volcanic swarm in Inner Mongolia with remote sensing and DEM data. *Frontiers of Earth Science* 10(3): 578-594.
- Grosse, P., De Vries, B.V.W., Petrinovic, I.A., Euillades, P.A. y Alvarado, G.E. 2009. Morphometry and evolution of arc volcanoes. *Geology* 37(7): 651-654.
- Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Euillades, P.A., Kervyn, M. y Petrinovic, I. 2012. Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology* 136: 114-131.
- Grosse, P., Euillades, P.A., Euillades, L.D. y van Wyk de Vries, B. 2014. A global database of composite volcano morphometry. *Bulletin of Volcanology* 76(1).
- Grosse, P., Guzmán, S. y Petrinovic, I. 2017. Volcanes compuestos cenozoicos del noroeste argentino. *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA* (Muruaga, C. y Grosse, P.): 484-517.
- Heit, B., Bianchi, M., Yuan, X., Kay, S.M., Sandvol, E., Kumar, P., Kind, R., Alonso, R.N., Brown, L.D. y Comte, D. 2014. Structure of the crust and the lithosphere beneath the southern Puna plateau from teleseismic receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters* 385: 1-11.
- James, D.E. 1971. Plate tectonic model for the evolution of the Central Andes. *Geological Society of America Bulletin* 82(12): 3325–3346.
- Koukharsky, M. y Munizaga, F. 1990. Los volcanes Guanaquero, Chivinar, Tul Tul, del Medio y Pocitos, provincia de Salta, Argentina. *Litología y edades K/Ar*. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 64-67, San Juan.
- Laurencelle, J., Logan, T. y Gens, R. 2015. ASF radiometrically terrain corrected ALOS PALSAR products. *ASF – Alaska Satellite Facility* 1: 12.
- Lillesand, T., Kiefer, R.W. y Chipman, J. 2015. *Remote sensing and image interpretation* (7a ed.). John Wiley y Sons.
- Matteini, M. 2001. Evolución petrológica, geoquímica y evaluación de los mecanismos eruptivos en los Complejos Volcánicos Tul Tul, Del Medio y Pocitos, Puna Argentina: el rol del lineamiento Calama-Olapapato-EI Toro. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales (inédita), 132 p., Salta.
- Matteini, M., Mazzuoli, R., Omarini, R., Cas, R. y Maas, R. 2002a. The geochemical variations of the upper Cenozoic volcanism along the Calama–Olapapato–EI Toro transversal fault system in Central Andes (24°S): petrogenetic and geodynamic implications. *Tectonophysics* 345: 211-227.
- Matteini, M., Mazzuoli, R., Omarini, R., Cas, R. y Maas, R. 2002b. Geodynamical evolution of Central Andes at 24°S as inferred by magma composition along the Calama–Olapapato–EI Toro transversal volcanic belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 118(1): 205-228.
- Matteini, M., Omarini, R., Mazzuoli, R. y Handler, R. 2002c. New 40Ar/39Ar ages for the Tul Tul, Del Medio y Pocitos volcanic complex

- (Puna, Central Andes, 24°S): geodynamic implications. En: Cabaleri, N., Cingolani, C.A., Linares, E., López de Luchi, M.G., Ostera, H.A. y Panarello, H.O. (eds.), *Actas del 15° Congreso Geológico Argentino*, Artículo N° 134: 6 pp, El Calafate.
- Norini, G., Groppelli, G., Capra, L. y De Beni, E. 2004. Morphological analysis of Nevado de Toluca volcano (Mexico): New insights into the structure and evolution of an andesitic to dacitic stratovolcano. *Geomorphology* 62(1–2): 47–62.
- Norini, G., Baez, W., Becchio, R., Viramonte, J., Giordano, G., Arnosio, M. y Groppelli, G. 2013. The Calama–Olacapato–El Toro fault system in the Puna Plateau, Central Andes: Geodynamic implications and stratovolcanoes emplacement. *Tectonophysics* 608: 1280–1297.
- Norini, G., Cogliati, S., Baez, W., Arnosio, M., Bustos, E., Viramonte, J. y Groppelli, G. 2014. The geological and structural evolution of the Cerro Tuzgle Quaternary stratovolcano in the back-arc region of the Central Andes, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 285: 214–228.
- Pedersen, G.B.M. y Grosse, P. 2014. Morphometry of subaerial shield volcanoes and glaciovolcanoes from Reykjanes Peninsula, Iceland: effects of eruption environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 282: 115–133.
- Petrinovic, I.A., Mitjavila, J., Viramonte, J.G., Martí, J., Becchio, R., Arnosio, M. y Colombo, F. 1999. Geochemistry and Geochronology descriptions of the Back-arc Neogene volcanic sequences in the eastern border of the Quevar Transversal Volcanic Range (NW Argentine). *Acta Geologica Hispanica* 34 (2–3): 243–255.
- Petrinovic, I.A., Martí, J., Aguirre-Díaz, G.J., Guzmán, S., Geyer, A. y Paz, N.S. 2010. The Cerro Aguas Calientes caldera, NW Argentina: an example of a tectonically controlled, polygenetic collapse caldera, and its regional significance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 194 (1): 15–26.
- Quesada-Román, A. y Peralta-Reyes, M. 2023. Geomorphological mapping global trends and applications. *Geographies* 3: 610–621.
- Reddy, G.O. 2018. Remote sensing and GIS for geomorphological mapping. *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management*: 223–252.
- Riller, U., Petrinovic, I., Ramelow, J., Strecker, M. y Oncken, O. 2001. Late Cenozoic tectonism, collapse caldera and plateau formation in the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 188: 299–311.
- Smith, M.J. y Clark, C.D. 2005. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping. *Earth Surface Processes and Landforms* 30 (7): 885–900.
- Sparks, R.S.J. 1978. The dynamics of bubble formation and growth in magmas: A review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 3 (1–2): 1–37.
- Székely, B. y Karátson, D. 2004. DEM-based morphometry as a tool for reconstructing primary volcanic landforms: examples from the Börzsöny Mountains, Hungary. *Geomorphology* 63: 25–37.
- Thouret, J.C. 1999. Volcanic geomorphology: an overview. *Earth-Science Reviews* 47 (1): 95–131.
- Tripodo, A., Casella, S., Pino, P., Mandarano, M. y Rasà, R. 2012. Geomorphological map of the Lipari volcanic island (Aeolian Archipelago–Italy). *Journal of Maps* 8 (1): 107–112.
- Ventura, G., Vilardo, G., Bronzino, G., Gabriele, G., Nappi, R. y Terranova, C. 2005. Geomorphological map of the Somma-Vesuvius volcanic complex (Italy). *Journal of Maps* 1 (1): 30–37.
- Viramonte, J.G. y Petrinovic, I.A. 1990. Calderas asociadas a megafracturas transcurrentes en los Andes Centrales del Sur. *XI Congreso Geológico Argentino, Actas II*: 369–372, San Juan.
- Viramonte, J.G., Galliski, M.A., Araña Saavedra, V., Aparicio, A., García Cacho, L. y Martín Escorza, C. 1984. El finivulcanismo básico de la Depresión de Arizaro, provincia de Salta, República Argentina. *IX Congreso Geológico Argentino, Actas III*: 234–254, San Carlos de Bariloche.
- Vörös, F., van Wyk de Vries, B., Guilbaud, M.N., Görüm, T. y Karátson, D. 2022. DTM-based comparative geomorphometric analysis of four scoria cone areas: suggestions for additional approaches. *Remote Sensing* 14 (23): 6152.
- Zangana, I., Otto, J.C., Mäusbacher, R. y Schrott, L. 2023. Efficient geomorphological mapping based on geographic information systems and remote sensing data: an example from Jena, Germany. *Journal of Maps* 19 (1): 2172468.