

EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL VOLCÁN MIRAVALLES, GUANACASTE, COSTA RICA

GEOMORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE MIRAVALLES VOLCANO, GUANACASTE, COSTA RICA

Daniela Castro Prado

*Escuela Centroamericana de Geología, UCR¹
daniela.castroprado@ucr.ac.cr*

Adriana Solís

Escuela Centroamericana de Geología, UCR²

Guillermo E. Alvarado Induni

Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo, CNE³

Resumen

Mediante datos de control terrestre de alta precisión (técnica satelital GNSS-Diferencial) generados en 2017, se logró contar con modelos de relieve de mucha precisión (curvas de nivel distanciadas entre 30 y 50 cm) de un área de 315 km² del volcán Miravalles y alrededores. Ello permitió reconocer estructuras antes no determinadas ni descritas, así como reconstruir de modo detallado las diferentes etapas de formación del macizo del Miravalles (83 km²) en el Pleistoceno Medio hasta el Holoceno. El Miravalles, el estratovolcán de mayor altitud (2028 m s.n.m) de la Cordillera Volcánica de Guanacaste, posee siete focos eruptivos (conos y cráteres), los cuales migraron de NE a SW, los cuales crearon numerosas estructuras (conos, campos de lavas, llanos piroclásticos, abanicos aluviales) que actualmente presentan un grado de erosión variable. En este trabajo se definen y describen los rasgos geomorfológicos de tres etapas principales de formación del volcán, iniciando con el volcán Zapote en el extremo NE y culminando con el Miravalles s.s., las cuales se vieron afectadas por varios eventos complejos de colapsos sectoriales del tipo avalancha de escombros volcánica (*debris avalanche*). Se reconoció un pequeño intracono dentro del cráter principal del Miravalles, desde donde se desprendieron las coladas más recientes (Holoceno Superior) de limitada extensión. También, se identificaron dos cráteres de

explosión hidrotermal en sus flancos (Holoceno Medio o Superior), en el sector de Las Hornillas. Asimismo, se delimita y describe el Abanico Guacalito (flanco Caribe), ubicado al NE del Miravalles, originado por el río homónimo que nace del cañón que drena el cráter desportillado del volcán Zapote. Se logró afinar la historia del Holoceno al integrar las dataciones radiométricas de la literatura. Contrario a lo esperado, las estructuras lineales (fallas) no se observan con el detalle esperado. En el caso de un reactivar del Miravalles, posiblemente ocurrirá en su cráter Principal o como un foco eruptivo secundario al SW.

Palabras clave: Cráteres hidrotermales, Avalancha de escombros volcánica, Estratovolcán, Geomorfología, Peligro volcánico, Volcanes, Volcán Miravalles, Vulcanología.

Abstract

Using high precision ground data control (Differential-GNSS satellite technique) generated in 2017, high precision relief models were achieved (contour lines spaced between 30 and 50 cm) of an area of 315 km² of the Miravalles Volcano and surroundings. This allowed to recognized structures that had not been previously determined or described, as well as to reconstruct in detail the different stages of formation of the Miravalles massif (83 km²) in the Middle Pleistocene to the Holocene. Miravalles is the highest altitude

¹ Universidad de Costa Rica

² Universidad de Costa Rica

³ Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias de Costa Rica.

stratovolcano (2028 m a. s.l.) of the Guanacaste Volcanic Range. It has seven eruptive foci (cones and craters), which migrated NE to SW. Currently, this foci are inactive, however, at the time they created numerous structures (cones, lava fields, pyroclastic plains, alluvial fans) that at the present time have a variable degree of erosion. In this work the geomorphological features of the three main stages of formation of the volcano are defined and described, initiating with the Zapote Volcano in the extreme NE and culminating with the Miravalles s.s, which were affected by several complex sectoral collapse events such as the volcanic debris avalanche (*debris avalanche*). A small intraconus was recognized within the main crater of Miravalles, from where the most recent flows (Upper Holocene) were released. Also, two hydrothermal explosion craters were identified on its flanks (Middle or Upper Holocene) in the Las Hornillas sector. Likewise, the Guacalito fan (Caribbean flank) is delimited and described, located NE of Miravalles, originated by the homonym river, which rises from the canyon that drains the chipped crater of the Zapote Volcano. Holocene history was refined by integrating radiometric dating from literature. Contrary to expected, linear structures (faults) are not observed with the expected detail. In the case of a Miravalles reactivation, it will possibly occur in its main crater or as an eruptive secondary focus to SW.

Keywords: Hydrothermal craters, *Debris avalanche*, Stratovolcano, Geomorphology, Volcanic hazards. Volcanoes, Miravalles volcano, Volcanology.

Introducción

El volcán Miravalles es un estratovolcán sin actividad eruptiva en tiempo histórico, el cual muestra únicamente actividad residual o secundaria que consiste en fumarolas, piletas de lodo y fuentes termales (Alvarado, 2009). Dicho edificio volcánico pertenece a la Cordillera Volcánica de Guanacaste y se encuentra dentro de la hoja topográfica Miravalles (1:50 000) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) e incluye la parte sur de la hoja topográfica Upala (1:50 000).

Las precipitaciones medias anuales en estas zonas son superiores a los 4000 mm y las condiciones de humedad relativa son excesivas debido a la presencia de neblina en las partes altas (Quesada, 2007). Esta nubosidad es un problema para la obtención de fotografías aéreas cercanas al área de estudio, por lo que generalmente la zona con nubes aparece como “parches” sin información en las bases de datos de fotografías, o del todo no es considerada en sobrevuelos para dicho fin. Como consecuencia de esto, los trabajos geomorfológicos del volcán suelen ser parciales. Para el presente trabajo se utilizaron datos fotogramétricos de muy alta resolución que permitieron efectuar un estudio geomorfológico detallado del volcán, esto con el objetivo de conocer el origen de las diversas geofomas en la zona.

El grado de información digital con el que se contó fue de alta resolución (curvas de nivel entre cada 30 y 50 cm) de un área total aproximada de 1380 km² de datos, donde se logró realizar una reinterpretación geomorfológica detallada del área de estudio de 315 km² (Figura 1), por lo que esta investigación brinda múltiples aportes en el conocimiento del volcán Miravalles y su historia evolutiva. Por primera vez se logra identificar y describir la estructura dentro del cráter Principal del Miravalles, dos cráteres de explosión hidrotermal y el Abanico Guacalito, el cual corresponde a los depósitos erosionados del volcán Zapote. Cabe destacar que el volcán Miravalles no es una sola estructura, sino que tiene una forma compleja, con múltiples geofomas que evidencian los procesos o etapas de formación que dieron paso a la configuración actual de dicho macizo volcánico.

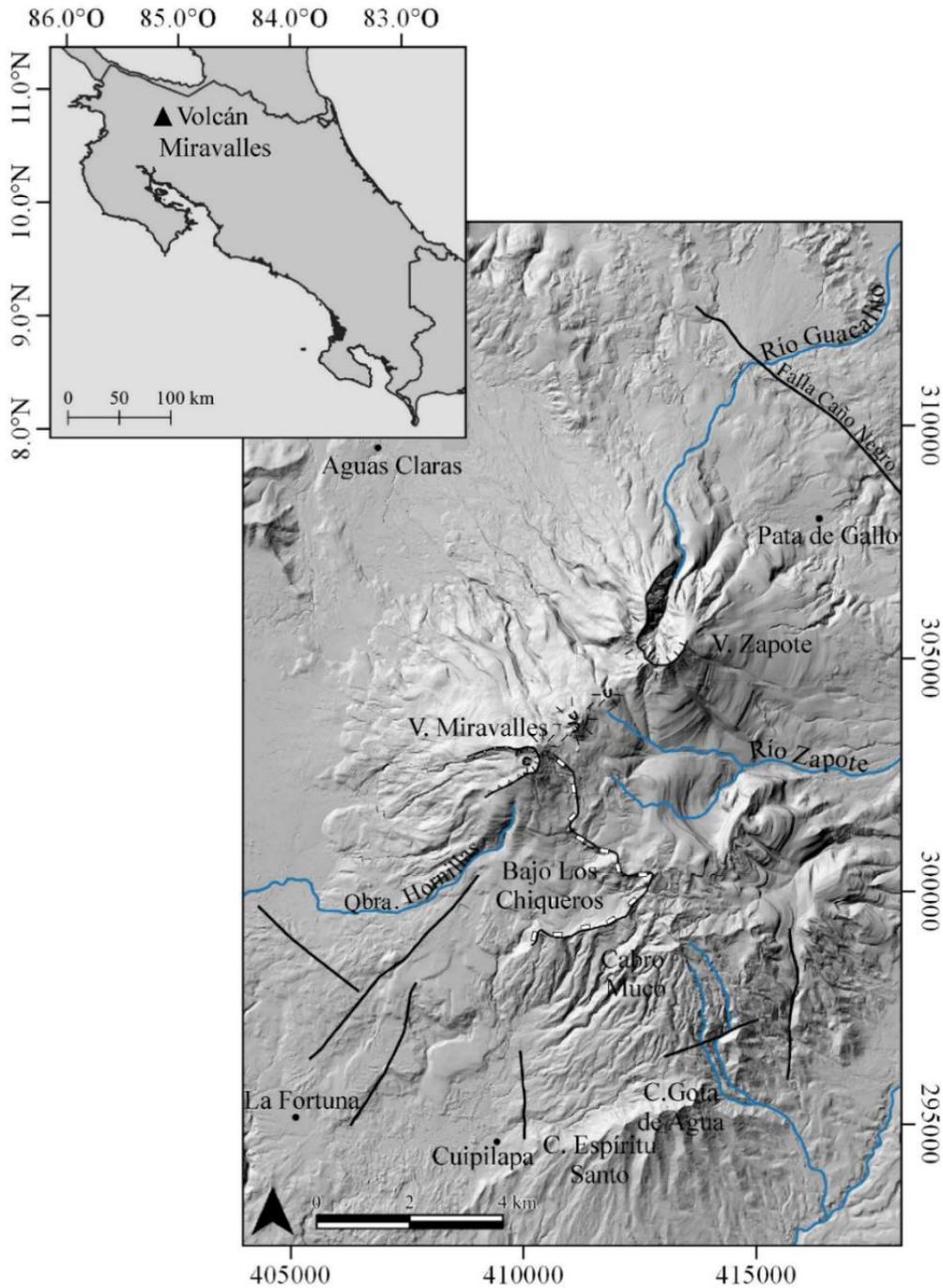


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Las líneas negras corresponden con fallas; los círculos indican poblados y las líneas azules representan ríos principales.

Antecedentes

El volcán Miravalles y sus alrededores ha sido objeto de numerosas investigaciones dentro de la geología moderna; una de las primeras es la de Bohnenberger (1968), quien elabora un estudio fotogeológico en la provincia de Guanacaste, donde incluye las zonas entre la Cordillera de Guanacaste y el río Tempisque. Posteriormente, Santana (1977) realiza descripciones tanto

geológicas como geomorfológicas de las hojas topográficas Miravalles y Tierras Morenas (1:50 000). Asimismo, en esta zona se ejecutaron diversos estudios por parte del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), con el objetivo de determinar la viabilidad de una planta de energía geotérmica en la década de 1970. Fernández (1984) estudió la geología y detalló la alteración hidrotermal en este campo geotérmico.

Maineri (1976) describe la evolución del sistema volcánico Miravalles-Guayabo, iniciando con la formación del volcán Guayabo de lavas basálticas y andesíticas; posteriormente este volcán entró en erupción, vaciando la cámara magmática con el hundimiento del antiguo volcán Guayabo, formando así una caldera múltiple. El estudio elaborado por Vargas y Barquero (1998) presenta una caracterización geológica y geomorfológica del flanco SW del volcán Miravalles y zonas circundantes, además, cuenta con un énfasis del marco tectónico en el que incluye información de sismicidad histórica y estructuras principales.

Aunado a esto, Alvarado (2009) y Cigolini et al. (2018) mencionan el desarrollo de un nuevo macizo llamado Cabro Muco-La Giganta; al norte de este edificio volcánico se dio el crecimiento del volcán Miravalles. Siguiendo la historia evolutiva, debido a las erupciones y al derrame de coladas de lava, hace 8200 años se generaron varias avalanchas y lahares que se acumularon dentro de la Caldera de Guayabo y, posteriormente, se depositaron sedimentos lacustres recientes que formaron los llanos locales. En el 2017, la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencia (CNE) generó un informe denominado “Los lahares del Volcán Miravalles”, para evaluar los efectos del Huracán Otto en la zona.

Finalmente, Alvarado et al., (2019), Alvarado y Denyer (2019) y Denyer, Soto, Alvarado y Chavarría (2019) realizan una síntesis y actualización de la geología del volcán Miravalles, su caldera y áreas circunvecinas a 1:50 000.

Metodología

El presente trabajo es una continuación del proyecto denominado “Estudio geomorfológico detallado del Neo-Miravalles y sus alrededores” elaborado para el curso Práctica Geológica (G-4116) de la Universidad de Costa Rica durante el 2020. La fuente primaria de información para esta

investigación fueron los datos de control terrestres de alta precisión tomados durante el 2017 por la empresa *GeoInn Geospatial Innovations* en asociación con la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, para evaluar los impactos generados por el Huracán Otto.

Cabe destacar que estos datos proporcionados por la CNE pertenecen al proyecto “Puntos de control terrestres de apoyo fotogramétrico satelital”, el cual consistió en la implantación de una red geodésica de alta precisión, cuyos puntos de control se ubicaron a una distancia de 2500 y 3000 m entre sí. Las curvas de nivel en algunos sectores del área de estudio poseen una separación promedio entre sí cada 30-50 cm (Figura 2).

Se procesaron estos datos fotogramétricos mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), como QGIS e ILWIS, en los cuales se generaron modelos de elevación digital con el objetivo de delimitar de manera centimétrica las geoformas que componen el área estudiada. La interpretación se complementó con el análisis de la hoja topográfica Miravalles (1:50 000) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y los mapas geológicos escala 1:50 000 de la hoja Miravalles (Alvarado et al., 2019) y Upala (Denyer et al., 2019).

Se reinterpretó la información recopilada de todos los estudios disponibles que han sido efectuados en el volcán Miravalles. Además, se efectuó una visita al campo los días 22-24 de enero del 2020, en la cual se realizaron inspecciones visuales de la zona y se recolectaron muestras de mano para su posterior análisis macroscópico.

También, se utilizaron las fotografías aéreas proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional para estudiar el cuadrante Miravalles. Dichas imágenes pertenecen a los proyectos Stamp (escala 1:40 000), Carta II (escala 1:25 000) y PRCR (escala 1:25 000).

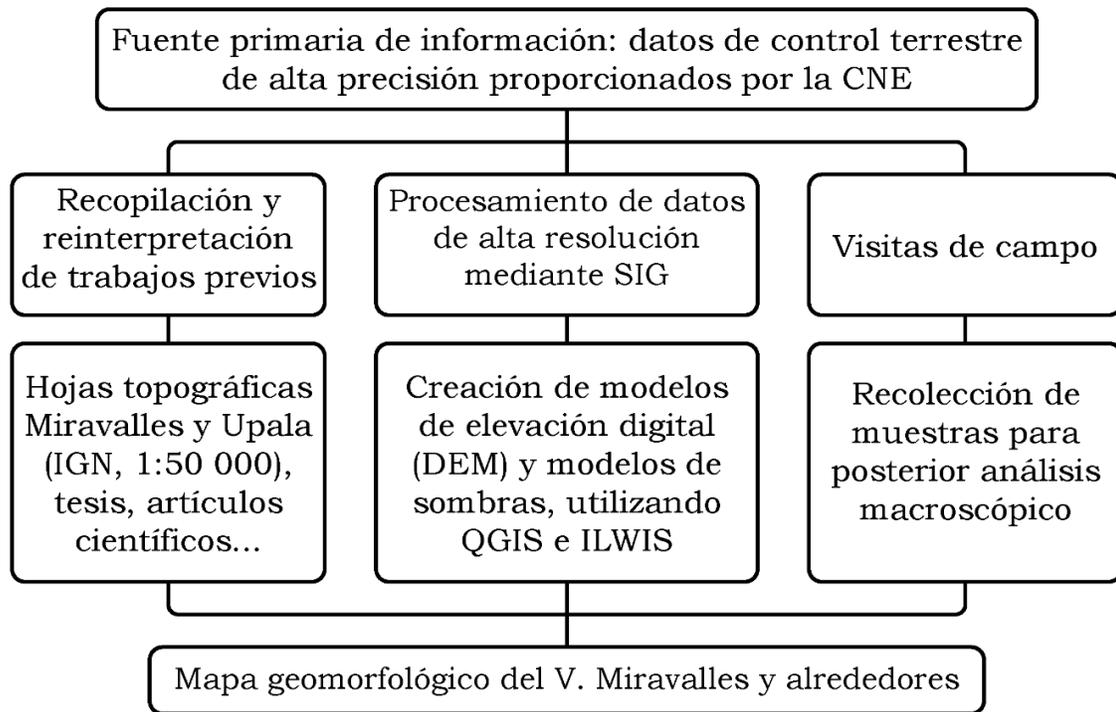


Figura 2. Flujo de trabajo para la investigación.

Marco teórico

A continuación, se presenta una descripción de las unidades geomorfológicas de mayor relevancia identificadas en el área de estudio (ver Figuras 3 y 4):

Borde de la Caldera Guayabo

La formación de esta estructura se remonta a eventos explosivos acaecidos en el volcán Guayabo (Proto-Miravalles), cuyas coladas de lava datan hace 1,17 Ma (Alvarado y Gans, 2012). El vaciado acelerado que experimentó la cámara magmática de dicho volcán, producto de la generación de flujos piroclásticos, provocó la subsidencia de este, por ende, la creación de la depresión volcánica llamada Caldera Guayabo entre 1,1 y 0,6 Ma.

El borde de la caldera que aflora a lo largo de una falla circular, posee una composición lávica (Alvarado y Denyer, 2019). El evento caldérico de subsidencia está representado por los cerros La Montañosa y Mogote al occidente, mientras que los cerros Espíritu Santo-Gota de Agua conforman el borde sur de esta estructura (Cigolini et al., 2018; Alvarado y Denyer, 2019).

Paleo-Miravalles (Cabro Muco)

Posteriormente, producto de una reactivación del vulcanismo, se edifica el volcán Cabro Muco-La Giganta, con una edad de 0,57-0,28 (?) Ma (Alvarado y Gans, 2012), sistema volcánico que comprende el denominado Paleo-Miravalles. Esta zona se ha visto afectado por colapsos asociados, explosiones volcánicas, erosión y tectonismo (Vega et al., 2005; Cigolini et al., 2018).

Neo-Miravalles

Estructura compleja eruptiva de menos de 300 ka de antigüedad (Alvarado y Gans, 2012; Alvarado y Denyer, 2019). Para comprender la formación de esta estructura hasta el sistema volcánico que se conoce en el presente, es necesario detallar los diversos estadios de actividad que dieron paso a esta estructura (Figuras 3 y 4):

i) Volcán Zapote: El primer episodio de actividad corresponde con el crecimiento en el sector noreste del volcán Zapote (MV-1), el cual posee una forma cónica bastante bien conservada, que según Alvarado y Denyer (2019) pudo formarse hace aproximadamente 280000 años o menos. Tiene un cráter desportillado o abierto hacia el NE con un diámetro actual promedio de 990 m. El volcán cubre un área de 38 km² y sus pendientes

normales (sin efecto de la erosión intensa) varían entre 25 y 35°; presenta un patrón de drenaje radial, profundizado en su cráter abierto.

Además, las coladas más antiguas de esta estructura se caracterizan por ser más extensas; por ejemplo, algunas lenguas de lava recorrieron distancias desde su centro eruptivo de hasta 7 km, contrario a las coladas emanadas durante la terminación de su construcción, las cuales son más espesas y cortas. La colada de mayor extensión ubicada en el sector NE, posee un *levée*, con dimensiones de hasta 50 m de ancho, cubierta parcialmente por el abanico.

ii) Volcán Miravalles s.s.: A partir de la formación del volcán Zapote, se inicia una migración de la actividad eruptiva en dirección NE-SW, la cual concuerda con la dirección de debilidad cortical principal en la zona. Luego se edifica la estructura MV-2; en esta parte del volcán se reconocen cinco conos volcánicos alineados. El cono eruptivo 2 presenta un cráter direccionado hacia el NE y siguiendo la migración al SW, encontramos los conos 3 y 4, ambos conos dobles. Posteriormente, se generaron varias coladas muy extensas, como la colada Río Peje o Pretil (MV-3b), sin embargo, el foco eruptivo de donde estas coladas emanaron quedó cubierto por los eventos eruptivos posteriores.

Por último, la actividad eruptiva más reciente corresponde con el crecimiento de la fase efusiva más reciente con la formación de un cono intracrático (MV-3c). En esta porción se identifica un cono en forma de herradura con abertura hacia el este. Posiblemente, los vientos intensos provenientes del ENE generaron un efecto muy fuerte al ingresar a la depresión del cráter principal, al momento de la formación del cono, ya que los piroclastos no se pudieron depositar en su sector oriental. La figura 5 muestra como de este cono se emitieron coladas de hasta 3,2 km de largo por 1,4 km de ancho, las últimas fueron menos extensas (900 x 200 m).

Cerro Hinchado ¿domo o relicto volcánico?

Se ubica en el flanco sur del Neo-Miravalles, posee un área de 0,12 km². La morfología de este cerro andesítico es abultada y elongada en dirección NE-SW. Una de las posibilidades es que este cuerpo lávico corresponda con un domo, como consecuencia de una reactivación volcánica posterior al segundo colapso de la avalancha volcánica, sin embargo, en el presente trabajo se interpreta como un remanente erosionado de Cabro Muco (Figuras 3 y 5).

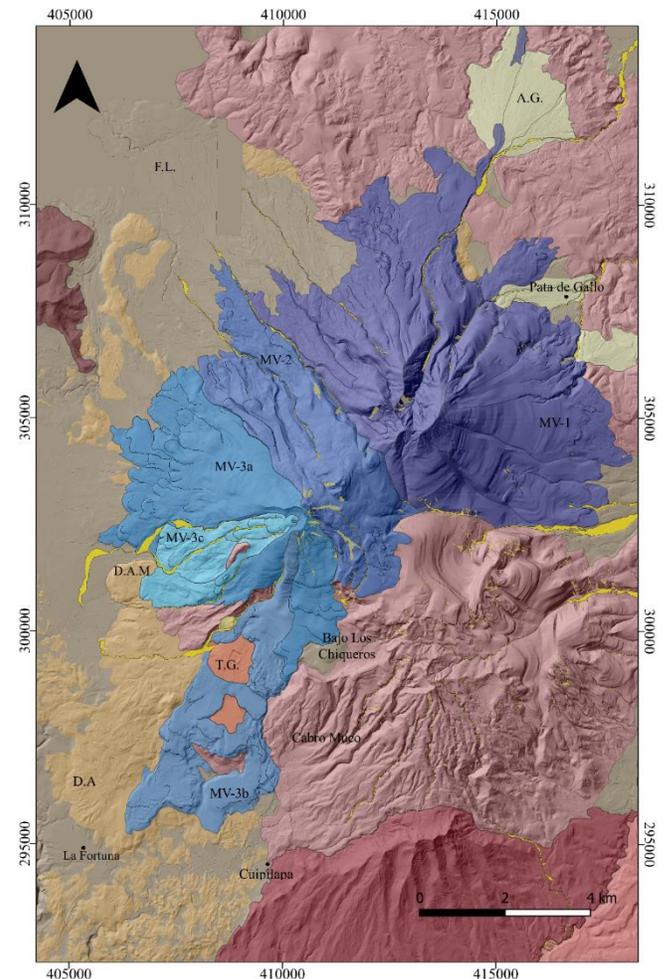


Figura 3. Mapa geomorfológico del área de estudio (complementar con figura 4). V. Zapote (MV-1); Colada Río Peje/Pretil (MV-3b); Abanico de Guacalito (A.G.); Tajo Gris (T.G.); Avalancha de escombros (D.A.); Las Mesas (D.A.M); Neo-Miravalles (MV-3c); Fluvialacustre (F.L.).

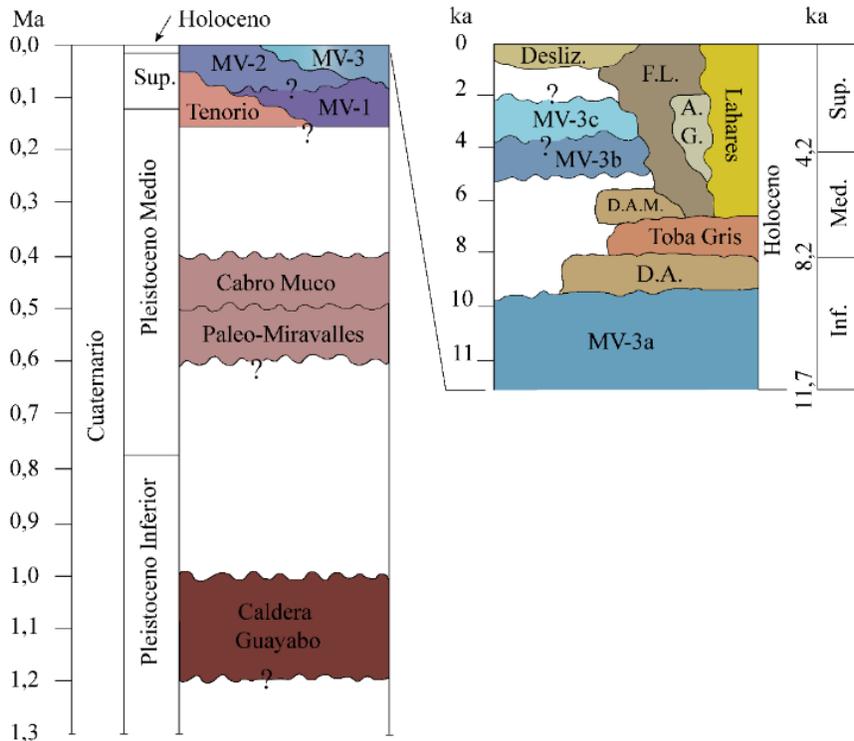


Figura 4. Columna morfoestratigráfica del volcán Miravalles y alrededores.

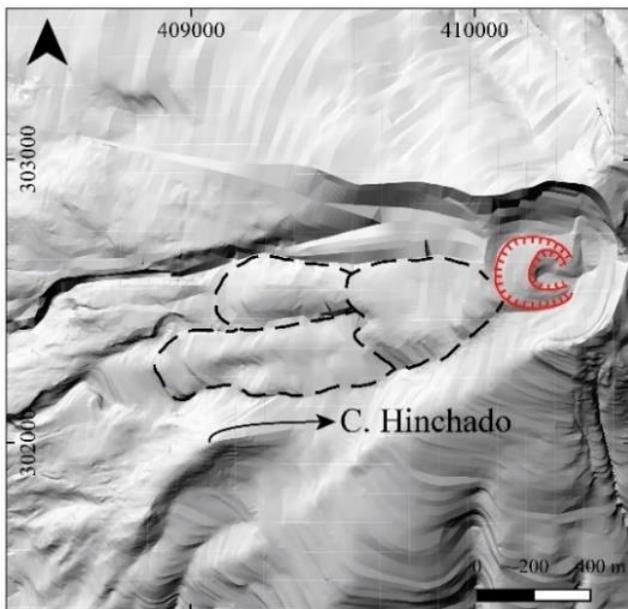


Figura 5. Detalle del cráter Principal del Miravalles. Las líneas rojas delimitan el cono intracraterico; las líneas punteadas negras marcan las últimas coladas emitidas.

Depósitos epivolcaniclásticos

Durante el emplazamiento de las estructuras anteriormente descritas, ocurrieron avalanchas de escombros volcánicos (*volcanic debris avalanche*), también, lahares llamados flujos de escombros

(*debris flows*). La avalancha de escombros volcánica del Miravalles se extiende al sur, hasta el caserío de San Bernardo (Vargas y Barquero, 1998). Se interpreta como un evento múltiple, segmentado en al menos dos colapsos distintos. El primer colapso volcánico genera el Bajo Los Chiqueros, provocando una topografía escarpada con laderas casi verticales. Resulta importante recalcar que la estructura MV-2 posiblemente estaba inactiva al momento de la avalancha; esto se deduce a partir de la terminación abrupta de las coladas de lava, las cuales no descienden por dicho escarpe (Figuras 3 y 4).

La segunda gran avalancha genera el colapso de una parte considerable de la estructura MV-3, sin embargo, esta continuó activa y cubrió con extensas coladas parte del escarpe de avalancha, dando paso a una topografía heredada.

Se identifican números *hummockys* de distintas dimensiones, principalmente en el sector SW del volcán Miravalles. Estos se pueden encontrar como montículos dispersos o alineaciones, en su mayoría longitudinales, una de estas estructuras se muestra en la figura 8C. Un ejemplo de un depósito a modo de bloque de esta avalancha es el Cerro Los Caballos, el cual alcanza una altitud de 792 ms.n.m. y posee una altura de 60 m. La formación de esta estructura se deduce a partir de

la composición polimíctica del mismo, es decir, fragmentos de lavas de diversos tamaños y disposición caótica. Esto difiere de Santana (1977), quien lo describe como un cono de salpicaduras de lava, un tipo de cono generado por la salida de escorias dentro de una colada de lava. Sin embargo, Alvarado, et. al. (2004) lo describen como depósitos de tipo *debris avalanche*, los cuales se componen por bloques de lava, pedernales o pómez distribuidos de manera errática; las escorias no abundan ni ningún tipo de material piroclástico indicador de un cono secundario.

i) Avalancha Las Mesas: Las Mesas se localiza al SW del volcán Miravalles. Esta geoforma posee un área de aproximadamente 2,3 km² y un volumen de 0,23 km³, presenta una topografía plana a levemente ondulada y se encuentra rodeada por ríos. En la literatura este evento se describe como un depósito producido por una avalancha de escombros volcánica, dado que se describen facies andesíticas y brechosas, en parte alteradas hidrotermalmente, atribuibles al deslizamiento (99 m de espesor máximo registrado), sobreyaciendo a facies de lutitas arenosas con ramas vegetales (15 m de espesor) con una ligera inclinación a favor de la pendiente general del flanco del volcán (Vargas y Barquero, 1998). Al parecer el depósito de la avalancha Las Mesas se encuentra sobre la avalancha de La Fortuna y del flujo piroclástico de Santa Rosa (Alvarado et al., 2004). Según Alvarado, et. al. (2004), esta avalancha posee un área alrededor de 3 km², con un volumen 0,10-0,25 km³, constituida por componentes del depósito del flujo piroclástico de Santa Rosa, cenizas grises con cristales de plagioclasa y fragmentos lávicos, además por sedimentos aluviales y pómez anaranjada mezclada entre las diferentes capas.

Sin embargo, la morfología de las Mesas emula a una colada de lava espesa, debido a su forma y topografía, por lo que quizás se trate de un bloque torea (megabloque estratificado de avalancha) de un parte del macizo del volcán que se deslizó de modo coherente, conservando en parte la forma de un campo de coladas de lava y otros productos eruptivos.

ii) Abanico Guacalito: Al noreste de la zona de estudio se observa un abanico aluvial, denominado el Abanico Guacalito. En estudios previos esta zona no fue delimitada como un abanico, pero sí fue reconocida como una zona de depósitos laháricos y depósitos de la paleocordillera y de

coladas de lava (Alvarado et al., 2019). Esta unidad posee un área superficial aproximada a los 5 km² y una pendiente moderada que no supera los 9-14° (figuras 4 y 5). Algunas laderas de los cauces poseen pendientes más empinadas hasta paredes casi verticales y en otros sectores que pueden variar desde los 14°.

Dicha estructura presenta 3 fases de actividad, evidenciados por la profundidad de los cauces, la densidad de drenajes, la altura a la que se encuentre y por la erosión del terreno. Debido a su morfología puede clasificarse como un abanico aluvial, ya que estos pueden tener varias zonas de inundación que se extienden sobre la superficie del abanico (en este caso se pueden observar tres de estas zonas) y la extensión de este puede variar entre 3100 a 2000 m.

La formación de esta morfología inicia con la depositación de la sección AG- I, la cual corresponde con la parte más antigua del abanico, alcanzando un área de 2,2 km². Posteriormente, una colada de lava proveniente del volcán Zapote cubre esta zona y provoca a la vez, una migración de la zona activa del abanico hacia el oriente. Sigue con la reconstrucción y se deposita la sección AG-II y, por último, AG-III. Dicho sector cuenta con un área aproximada de 0,8 km² (figura 6), además corresponde con la zona activa del abanico y el sector de sedimentación más reciente con acción.

El cañón de alimentación del Abanico Guacalito posee una longitud aproximada de 5,1 km y cuenta con pendientes que, en mayoría, son superiores a 30-37°. El relleno de este procede de la erosión del volcán Zapote, ya que por las condiciones climáticas y por las pendientes empinadas de dicho sector, resulta muy favorable que se den remociones de masa. Aunque se puede observar que hay una mayor cantidad de deslizamientos en la parte SE de la zona de estudio, en el sector NE igual se pueden contar un mínimo de 70 deslizamientos, lo cuales evidencian una zona propensa a este tipo de proceso.

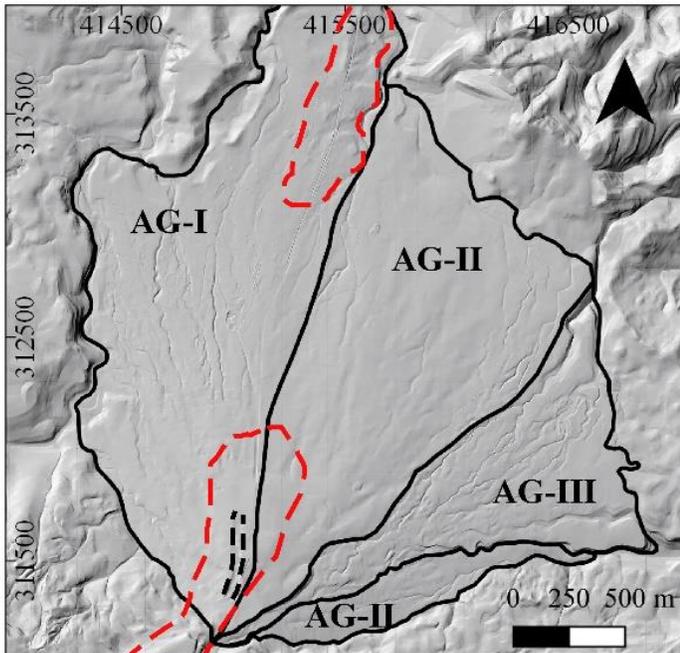


Figura 6. Modelo de elevación digital del abanico Guacalito. Las líneas negras delimitan el abanico, las líneas rojas punteadas marcan una colada de lava proveniente del volcán Zapote y las líneas punteadas negras marcan un levée.

Cráteres de explosión hidrotermales

En la zona de estudio se han ubicado dos posibles cráteres de explosión hidrotermal debido a su forma y a su posición geográfica cerca a zonas de actividad fumarólica activa y fósil. Según el *Bulletin Volcanologique* (1951), el 14 de setiembre de 1946, debido a la existencia de fluidos geotérmicos en el subsuelo, se dio una pequeña explosión hidrotermal, la cual proyectó detritos a 100 m de altura, en el flanco SW del Miravalles, cerca de "Las Hornillas", generando así, un cráter con un diámetro de 20 m. No se han encontrado otros documentos que describan con más detalle este hecho particular.

Ambos posibles cráteres se ubican dentro del depósito de avalancha de escombros volcánica. En el caso del primer cráter, ubicado dentro de una zona recreativa llamada Las Hornillas, abarca un área de aprox. 0,9 hectáreas, además, se encuentra en una zona cuyas pendientes varían desde 5° hasta las 14°. Dicha depresión posee una longitud máxima de 140 m y una mínima de 80 m, además, cuenta con una profundidad de 21 m. Como se observa en la figura 8D dentro de este, se puede observar gran cantidad de azufre, al igual

que rocas hidrotermalmente alteradas. La pared del cráter, remanente de la explosión, posee una pendiente fuerte, en donde principalmente varía entre 22-31°, pero también hay sectores donde son >37°. Es posible que la explosión no haya sido del todo vertical, sino con un ángulo, ya que no se puede observar la parte noroeste de su circunferencia. El borde del segundo cráter se ubica a los 256 m aproximadamente del primero y se encuentra formando un lago de agua fría artificial. Posee una forma ovalada en el cual su lado más largo mide 260 m y el lado corto de su circunferencia 150 m, además posee una profundidad aproximada de 15 m. Al igual que el primer cráter, se encuentra en una zona con pendientes que varían desde 5° hasta 14°.

Es posible observar todo el borde de este cráter, el cual se parece tener un mayor relieve, el cual posee una altura máxima de aprox. 6 m, por lo tanto, podría tratarse de material acumulado durante la erupción, a modo de un anillo de brecha. Actualmente, este posible cráter de explosión hidrotermal se encuentra relleno con agua fría, formando así un lago artificial.

Browne y Lawless (2001) mencionan a nivel mundial, que los cráteres hidrotermales se forman por una explosión, en la cual, deriva su energía de la pérdida de calor y los cambios de fase en un sistema convectivo de agua caliente o de un sistema hidrotermal dominado por vapor. De acuerdo con Fytikas y Marinello (1976), la profundidad del foco de la erupción se puede correlacionar con el diámetro de la depresión, asimismo se puede tratar de calcular la profundidad de reservorios explotables. Tomando en cuenta lo anterior, Fytikas y Marinello (1976) calculan la profundidad de explosión por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} * d \quad (1)$$

Donde d es el diámetro del cráter. Como dichas depresiones no tienen forma de un círculo perfecto, se utilizó el diámetro del lado más largo para obtener una aproximación de dichas profundidades, las cuales serían inferiores a la longitud del diámetro por un poco más del 10 %. Para el cráter Las Hornillas es de 120 m y para el segundo es de 220 m. Se puede hablar de profundidades del reservorio geotermal que provocó la explosión entre 100 y 200 m.



Figura 7. Detalle de los cráteres de explosión hidrotermal.

Conclusiones

El volcán Zapote posee dos tipos de coladas, las más antiguas se caracterizan por ser más extensas, contrario a las coladas emanadas durante la terminación de su construcción, estas finalizan de manera abrupta y son más espesas. El relleno del Abanico Guacalito procede de la meteorización y la erosión del volcán Zapote; además, esta estructura presenta 3 fases de actividad, evidenciados por la profundidad de los cauces, la densidad de drenajes, la altura a la que se encuentre y por la erosión del terreno, por lo que se determinó una migración hacia el oriente de su cauce activo (Figura 8).

Asimismo, la evolución del volcán Miravalles es compleja, asociada a múltiples colapsos, seguido del rejuvenecimiento de la actividad volcánica. En el caso del Cerro Los Caballos, se describe como un cerro conformado por fragmentos de lava polimícticos, asociado con el colapso sectorial del Miravalles. El sitio de Las Mesas ha sido descrito como uno de los principales depósitos producidos por avalanchas volcánicas en Costa Rica y el Miravalles (Vargas, y Barquero, 1998; Alvarado et al., 2004), pero según su forma y topografía, aún persiste la duda de si dicha geoforma más bien corresponda con una colada de lava (Figura 8).

Por primera vez se logra distinguir 2 depresiones, los cuales poseen formas que se podría relacionar con explosiones hidrotermales (Figura 8). Dichas estructuras se encuentran próximas al volcán y en especial una de ellas, todavía es el foco de intensa actividad hidrogeotérmica (fumarolas, fuentes termales, pozas de lodo hirviente).

Resultó interesante que cada tipo de metodología utilizada (fotografías aéreas, Google Earth, mapas de sombras, mapas topográficos aportaba aspectos y geoformas que en una se observaban mejor que en otras, a veces incluso independientemente del grado de resolución. Por ejemplo, la resolución digital muy detallada con la que se contó (curvas de nivel cada 30 cm y en otros sectores cada 50 cm), a veces no dejaba observar aspectos evidentes en las fotografías aéreas. Lo anterior evidencia, que la mejor forma para una interpretación geomorfológica (y sus estructuras y geoformas asociadas) es utilizar varias técnicas de estudios, desde las fotografías aéreas tradicionales, hasta las técnicas modernas de mapas digitales, obtenidos de diversos tipos de tecnologías.

Finalmente, se pueden realizar algunos comentarios generales sobre el peligro volcánico. La evolución geomorfológica de los focos eruptivos recientes evidencia no solo una migración de estos hacia el SW, como varios trabajos previos lo habían establecido, sino que el cráter Principal del Miravalles fue el foco de la actividad más reciente del volcán con la formación del intracono y sus coladas de lava. En el caso de un reactivar del Miravalles, va a ser este cráter o un foco eruptivo nuevo satelital el que se va a formar sobre su flanco SW, siguiendo esta evolución y migración eruptiva. Por otro lado, en los sectores donde existe hidrotermalismo, está latente la posibilidad de que se dé una explosión hidrotermal similar o más pequeña a los dos cráteres de explosión propuestos, que, aunque las probabilidades son bajas, no son nulas, pero resulta difícil de prever o establecer su ubicación, magnitud y temporalidad.

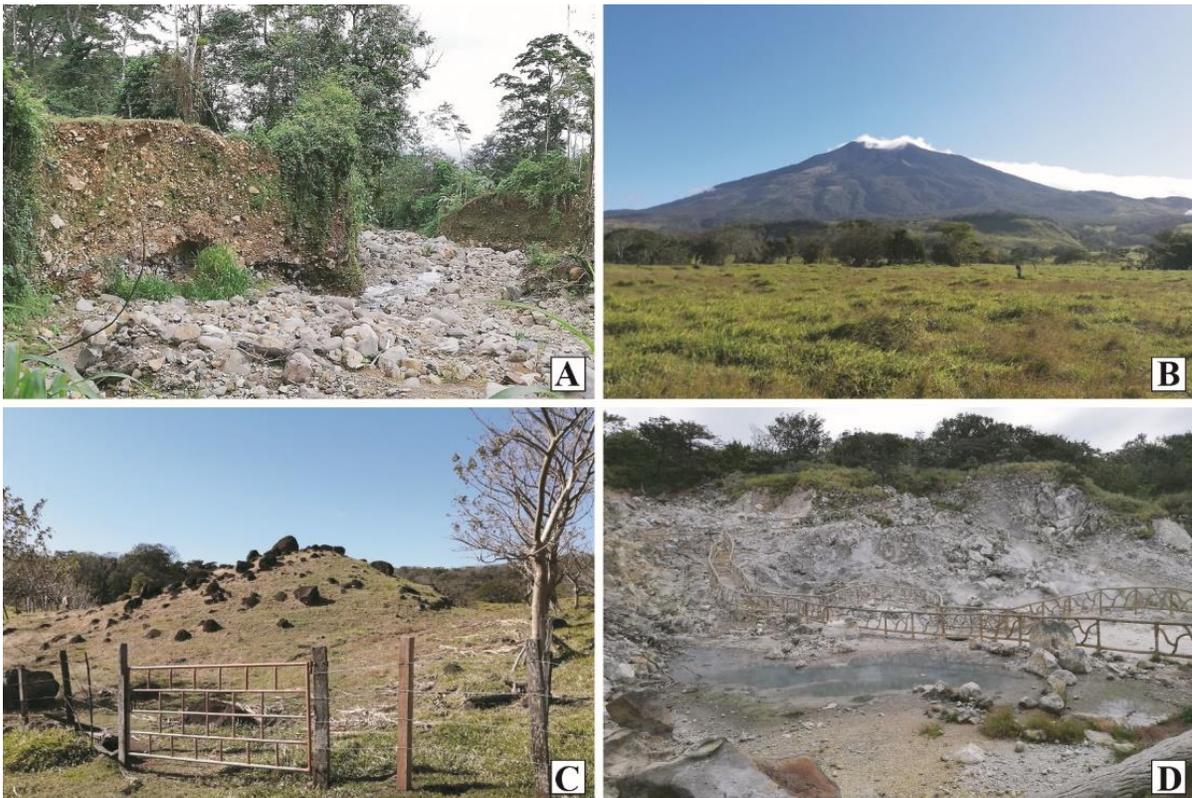


Figura 8. A) Sección transversal del Abanico de Guacalito. B) Vista frontal del Neo-Miravalles. C) Morfología tipo hummocky. D) Vista oblicua del cono de explosión hidrotermal Las Hornillas.

Agradecimientos

A los geólogos Lidier Esquivel Valverde y Blas Sánchez Ureña por el apoyo brindado en la oficina y a Olivier Badilla Quesada por su colaboración en la gira de campo al cerro Los Caballos. La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias proporcionó la base de datos de “Puntos de control terrestres de apoyo fotogramétrico satelital” necesaria para la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Alvarado, G. (2011). *Los volcanes de Costa Rica: Geología, historia, riqueza natural y su gente*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Alvarado, G., Fallas, B., Vargas, A., Vega, E., Bakkar, H. y Barrantes, G. (2017). Los lahares del Volcán Miravalles. Disparados por el huracán Otto (24 de noviembre del 2016), Costa Rica: Meteorología, sedimentología, periodos de recurrencia, alerta temprana y recomendaciones. [Informe Interno] San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad.
- Alvarado, G., Montero, W., Denyer, P., Soto, G., Chavarría, M. y Vega, E. (2019). Mapa geológico de la hoja Miravalles. En *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica: historia, evolución y cartografía*. San José, Costa Rica: EUCR.
- Alvarado, G., Vega, E., Chaves, J. y Vásquez, M. (2004). Los grandes deslizamientos (volcánicos y no volcánicos) de tipo *debris avalanche* en Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*. (30), 83–99.
- Alvarado, G. y Denyer, P. (2019). Estratigrafía volcánica. En Denyer, P. (Ed.), *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica: historia, evolución y cartografía*. San José, Costa Rica: EUCR.
- Alvarado, G. y Gans, P. (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. *Rev. Geol. Amér. Central*. (46), 7-122.
- Bohnenberger, O. (1968). *Reconocimiento fotogeológico del área de Guanacaste entre la Cordillera Volcánica y el Río Tempisque* [Informe Técnico 16] San José, Costa Rica: SENAS.
- Browne, P. y Lawless, J. (2001). Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth Sc. Rev.* (52), 299-331.
- Cigolini, C., Taticchi, T., Alvarado, G., Laiolo, M. y Coppola, D. (2018). Geological, petrological and geochemical framework of Miravalles-Guayabo caldera and related lavas, NW Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (358), 207–227.
- Bulletin Volcanologique (1951). *Mittelamerika*. Ser 2 Nápoles, (11), 170-173.
- Denyer, P., Soto, G., Alvarado, G. y Chavarría, M. (2019). Mapa geológico de la hoja Upala, escala 1:50 000. En *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica: historia, evolución y cartografía*. San José, Costa Rica: EUCR.
- Fernández, E. (1984). *Geología y Alteración Hidrotermal en el Campo Geotérmico Miravalles; provincia de Guanacaste, Costa Rica* [Tesis de Licenciatura] Universidad de Costa Rica.
- Fytikas, M. y Marinelli, G. (enero de 1976). Geology and geothermics of the Island of Milos (Greece). International Congress on Thermal Waters, Geothermal Energy and Volcanism of the Mediterranean Area. Atenas, Grecia.
- Mainieri, A. (1976). *Proyecto geotérmico de Guanacaste* [Informe interno] San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad.
- Quesada, R. (agosto de 2007). Los Bosques de Costa Rica. *IX Congreso Nacional de Ciencias*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado de <https://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>
- Santana, A. (1977). *Geología de un área de las hojas Miravalles y Tierras Morenas* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Vargas, J. y Barquero, R. (1998). *Estudio geológico para la construcción de la casa de máquinas del Proyecto Geotérmico Miravalles III, Bagaces, Guanacaste* [Informe interno] San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad.
- Vega, E., Chavarría, L., Barrantes, M., Molina, F., Hakanson, E. y Mora, O. (abril de 2005). Geologic model of the Miravalles geothermal field, Costa Rica. *Proceedings World Geothermal Congress*. Antalya, Turquía. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/281035894_Geologic_Model_of_The_Miravalles_Geothermal_Field_Costa_Rica