

Inestabilidad compleja de la cabecera del río Aguas Zarcas

Complex instability of the headwaters of the Aguas Zarcas River

Giovanni Peraldo Huertas^{1*}, Elena Badilla Coto^{1,2}, Leonardo Quesada Román³

¹Universidad de Costa Rica (UCR), Escuela Centroamericana de Geología (ECG),
San José, Costa Rica

²Universidad de Costa Rica (UCR), Posgrado en Geología, Maestría de Gestión del Riesgo en
Desastres y Atención de Emergencias, San José, Costa Rica

³Universidad de Costa Rica (UCR), Escuela de Química, Laboratorio de Difractometría,
San José, Costa Rica

*Autor de contacto: marino.peraldo@ucr.ac.cr

(Recibido: 24/08/2024; aceptado: 10/09/2024)

ABSTRACT: In July 2023, a significant landslide occurred in the Pozo Verde sector of Juan Castro Blanco National Park, triggering a series of mudflows and debris that affected the population of Aguas Zarcas in various ways. This article integrates geological observations, historical data collected from oral accounts, mineral identification through diffractometry, and the geomorphological photointerpretation of aerial photographs from 1981. These analyses show that this is not the first time a major landslide has occurred in the area. Oral accounts indicate that the affected area had already shown signs of instability since the 1970s and 1980s. Additionally, photointerpretation of the aerial photographs analyzed in the Geomatics Laboratory of the Central American School of Geology at the University of Costa Rica (UCR) reveals a landscape characteristic of slope instability. The area directly impacted by the landslide shows scars from previous landslides, and three independent bodies of instability were identified. Along the Aguas Zarcas and Barroso rivers, evidence of debris flow deposits from various small landslides, still present in 1981, was observed. Furthermore, the diffractometric analysis carried out at the UCR School of Chemistry on soil samples collected from the landslide yielded interesting mineralogical results related to hydrothermally altered clay groups, including montmorillonite, an expansive clay, although the expansion percentage was not determined. All these aspects together indicate that the headwaters of the Aguas Zarcas River have been a site susceptible to large landslides, making it crucial to maintain constant monitoring of the area.

Keywords: landslides; mudflows; diffractometry; history; geomorphology; Aguas Zarcas.

RESUMEN: En julio de 2023 un deslizamiento de importantes proporciones, ocurrido en el sector de Pozo Verde del Parque Nacional Juan Castro Blanco, produjo un tren de flujos de lodo y escombros que afectó de diferente manera la población de Aguas Zarcas. En este artículo se integran las observaciones geológicas, los datos históricos recopilados a partir de oralidad, el reconocimiento mineral mediante difracción y la fotointerpretación geomorfológica de fotos aéreas de 1981. Estos análisis demuestran que no es la primera vez que un gran deslizamiento se manifiesta en el área. La oralidad señala que el área deslizada ya venía mostrando un proceso de inestabilidad desde los años setenta y ochenta del siglo pasado. Además, la fotointerpretación en las fotos aéreas



analizadas en el laboratorio de Geomática de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica (UCR), muestra un relieve característico de inestabilidad de laderas, y el área afectada directamente por el deslizamiento muestra cicatrices de antiguos deslizamientos, lográndose determinar la presencia de tres cuerpos independientes de inestabilidad. A lo largo de los ríos Aguas Zarcas y Barroso, se observan restos recientes para 1981 de depósitos de flujos de escombros provenientes de diversos deslizamientos pequeños. Asimismo, el análisis difractométrico llevado a cabo en la Escuela de Química de la UCR, de muestras de suelo tomadas en el deslizamiento, arrojó resultados mineralógicos interesantes relacionados con grupos de arcillas por alteración hidrotermal, tal como la montmorillonita, una arcilla expansiva, aunque no se logró conocer el porcentaje de expansión. Todos estos aspectos juntos señalan que el área de las cabeceras del río Aguas Zarcas ha sido un lugar susceptible a generar grandes deslizamientos, por lo que es importante que el sitio esté bajo vigilancia constante.

Palabras clave: deslizamientos; flujos; difracción; historia; geomorfología; Aguas Zarcas.

Introducción

Los deslizamientos representan uno de los eventos naturales o socio-naturales más comunes en términos de aumento del riesgo de desastres en nuestro país. Estos eventos pueden ser desencadenados por sismos, lluvias intensas o por deficiencias en la aplicación de políticas de ordenamiento territorial y gestión ambiental. Cada año, el país experimenta impactos considerables, ya sea directamente o de manera indirecta, debido a la ocurrencia de deslizamientos y flujos de lodo asociados.

Algunos deslizamientos son disparados por sismos cuyos epicentros coinciden con áreas montañosas propensas a la inestabilidad de laderas, como fue el caso del sismo de Patillos del 30 de diciembre de 1952, en las estribaciones del volcán Irazú, que desencadenó deslizamientos y resultó en la pérdida de casi veinte vidas (Montero y Alvarado, 1995).

El material desplazado puede caer en cauces, generando flujos de lodo que afectan poblaciones y actividades económicas ubicadas, en ocasiones, a considerables distancias del lugar del deslizamiento. Por ejemplo, en 1861, una serie de flujos de escombros en el río Agres, cuyo origen fueron grandes deslizamientos en los cerros de Escazú, afectó el centro de Escazú, resultando en pérdidas significativas, incluyendo 3 víctimas mortales y varios desaparecidos (González, 1994). Incidentes similares se han registrado en el macizo del volcán Barva, donde deslizamientos han provocado flujos de lodo a través de ríos de alta pendiente (Salazar et al., 2019).

El deslizamiento de Aguas Zarcas ocurrió el día 17 de julio 2023, cuando transitó, a lo largo del río homónimo, un tren de flujos de lodo que afectó áreas urbanas de la ciudad de Aguas Zarcas de San Carlos, impactó la opinión pública tanto local como nacional y alteró la cotidianidad de los vecinos del área impactada y generó consternación y temor entre los vecinos de Aguas Zarcas. Circularon hipótesis sobre el origen del deslizamiento, quizá la más propagada fue la que relacionó el deslizamiento a la reactivación del volcán Platanar. El suceso de la generación del deslizamiento y los flujos de lodo asociados, generó, como siempre ocurre, un enorme movimiento de científicos, periodistas y personal de primera respuesta hacia el área de actividad geológica. Este artículo tiene su origen en dicho movimiento científico, con el fin de dar una explicación a uno de los deslizamientos más grandes de los últimos años en Costa Rica, quizás comparado con el deslizamiento de Arancibia del año 2000, el cual movilizó cerca de 12 millones de m³ de materiales hacia la quebrada Veracruz, causando cerca de 6 muertes y una intensa transformación en el terreno (Mora, 2000, Alvarado et al., 2003, Araya, 2004).

Históricamente, se han documentado otros deslizamientos de gran volumen. Peraldo y Rojas (2000) refieren para 1902 en la finca de Francisco Gutiérrez en el volcán Turrialba, un hundimiento de 55 hectáreas; también, en 1950, en San Antonio de San Ramón de Alajuela, un terreno quedó como en un remolino, en un área de cerca 18 hectáreas y generó un flujo por la quebrada La Máquina.

Peraldo y Badilla (2024) describen grandes deslizamientos en el cantón de Turrialba, que se generan en laderas de pendiente media a baja; además, analizan detalladamente el caso del deslizamiento de Jesús María, el cual, a pesar de haber destruido por completo la población homónima y de tener un área mayor que los deslizamientos de Aguas Zarcas y Arancibia, se ha movido por partes, lo cual no ha generado el mismo nivel de dramatismo mediático que estos últimos dos. Lo mismo sucede con el deslizamiento de Puriscal, el cual ha afectado la ciudad de Santiago de Puriscal por décadas (Peraldo y Molina, 1993).

El deslizamiento de Aguas Zarcas del 2023 tomó por sorpresa a la población homónima, quienes perciben este evento como algo inédito en la región. Sin embargo, los rasgos geomorfológicos del área, como el amplio abanico del río Aguas Zarcas, son evidencias sólidas de que estos procesos son recurrentes en la zona. La información histórica recopilada para este artículo, junto con los resultados del análisis realizado a partir de fotografías aéreas del año 1982, que revelaron evidencias de inestabilidad de laderas a principios de esa década, demuestran que este evento no fue el primero ni será el último en ocurrir en esta zona de estudio.

Todos los años, Costa Rica se ve impactada, en gran medida, por afectación directa o indirecta de la activación de deslizamientos y flujos de lodo asociados. En este artículo se analizará la historia, la fotointerpretación y la difracción de la zona de inestabilidad en las cabeceras del río Aguas Zarcas, ubicadas en una parte del Parque Nacional Juan Castro Blanco, administrada en parte por Coopelesca. La figura 1 muestra el contexto regional donde se ubica el área de estudio enmarcada en un recuadro negro. La figura 2 muestra su contexto local. Ambas figuras contienen los nombres de los elementos geográficos que se mencionan en el texto.

Metodología

La metodología trata de reunir información de diferente naturaleza, con el fin de integrarla y entender el área inestable.

1. **Visita al campo:** Los días 17 y 18 de agosto de 2023 se logró la visita a la cuenca alta del río Aguas Zarcas, y se recorrió el Sendero Pozo Verde, desde el puesto de la Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos (Coopelesca) en San Josecito de la Montaña, hacia la Laguna Pozo Verde. A lo largo de este sendero se desarrollaron la mayoría de las observaciones de campo que se analizan en el presente artículo, con el fin de obtener información de diferente naturaleza sobre los procesos de inestabilidad de laderas que se observaron durante julio de 2023. El recorrido tuvo como fin inspeccionar un área que presenta fuertes evidencias de inestabilidad de laderas, como fisuras abiertas y un deslizamiento pequeño que generó un flujo de lodo y escombros que afectó parcialmente la Laguna Pozo Verde. Se tomaron datos de direcciones y ancho de estas fisuras, en un tramo del sendero 300 metros antes de llegar a la laguna. Además, se tomaron muestras de suelo, con el fin de realizar análisis difraccionométricos para conocer la mineralogía que pueda asociarse a la inestabilidad de laderas. Se realizaron observaciones morfológicas que coadyuvaran la fase del análisis fotogeológico. Para ese fin, se tomó fotografías de los sitios de interés y se realizaron observaciones *in situ* de los diferentes relieves del área, con lo que se llega a identificar procesos de inestabilidad que tienen, en su mayoría, morfologías relacionadas. Finalmente, se llevó a cabo una recopilación de información histórica oral sobre eventos previos de inestabilidad, con el fin de conocer el historial de deslizamientos del área de estudio.

2. **Recolección de información histórica del área:** La entrevista a profundidad no estructurada, a tres vecinos del área, aportó mucha información histórica de gran interés para la interpretación de las áreas inestables. Consistió en dos conversaciones grabadas, previo permiso de las personas entrevistadas. Los temas tratados fueron la actividad minera que se desarrolló en el pasado en esta área y la inestabilidad de laderas previa al evento del 17 de julio del 2023. La información puede clasificarse en observaciones directas del entrevistado y tradición oral familiar que demuestra que el área y el deslizamiento de julio, ya tenían fuertes evidencias de inestabilidad anterior. La tercera persona entrevistada es funcionaria de Coopelesca, quien durante el recorrido del Sendero Pozo Verde, refirió mucha información de relevancia para la historia de la inestabilidad de laderas del área.

3. **Análisis de topónimos:** son nombres de elementos geográficos que tienen relación con características del área de interés. Al observar el mapa Quesada 1:50000 del IGN, se leen varios nombres que son relacionados con las características geológicas y económicas del área, y apoyan la información histórica recolectada.

4. **Fotointerpretación:** se realizó en el Laboratorio de Cómputo de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, utilizando un estereoscopio de pantalla para el análisis de pares estereoscópicos de fotografías aéreas digitales, generados mediante el programa ILWIS. Dada la escala idónea de las fotos aéreas usadas, se realizó al detalle el catálogo de formas relacionadas con procesos de inestabilidad de laderas. Para el análisis morfológico se usaron las fotos aéreas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) del año 1981, rollo 180, línea3, fotos número 25617, 25618, 25619 y 25620 a escala 1:20 000.

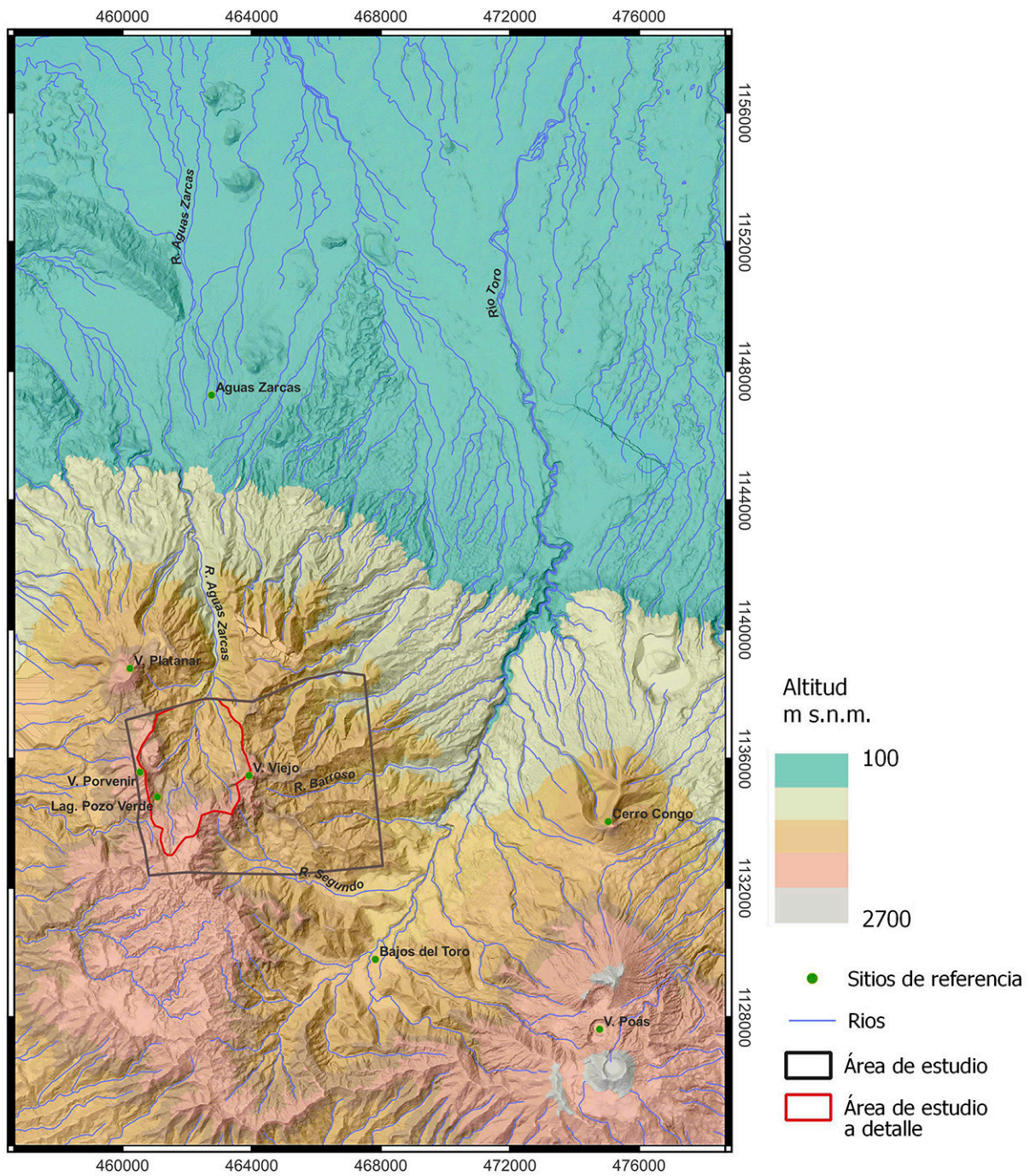


Fig. 1: Mapa del contexto regional donde se ubica el área de estudio dentro de un recuadro negro. (Instituto Geográfico Nacional (IGN), proyección CRTM05 – elipsoide WG 584 – Datum CR05).

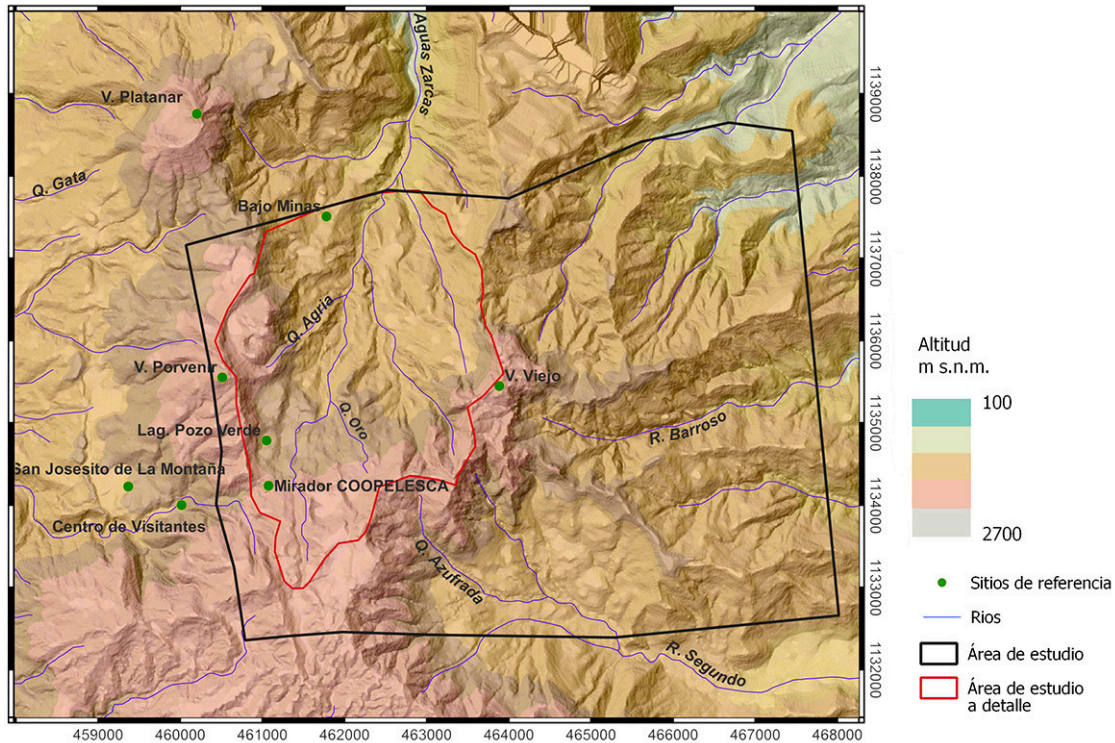


Fig. 2: Contexto local del área de estudio. Área donde ocurrió el evento de inestabilidad de laderas de julio de 2023 y donde se realizó la fotointerpretación mostrada en las Figs. 4 y 6.

El mapa geomorfológico resultante fue analizado e integrado en la discusión que aporta evidencias para coadyuvar a la construcción de un modelo de inestabilidad del área de estudio.

5. **Difractometría:** se realizó una toma de muestras de suelo, tres muestras distribuidas a lo largo del camino a la Laguna Pozo Verde y la cuarta fue tomada del centro del deslizamiento denominado en este trabajo A.Z.3 a 100 metros de la corona (Cuadro 1 y Fig.6). Cada muestra se secó en el horno del Laboratorio de Geotecnia e Hidrogeología de la Escuela Centroamericana de Geología a 105 grados, para luego reducir las a un polvo lo más fino posible, esto permite que los rayos X tengan similar posibilidad de incidir en los cristales minerales que se distribuyen de manera aleatoria. Posteriormente, llevarlas al Laboratorio de Difractometría de la Escuela de Química, para realizar el proceso mediante la toma de un volumen determinado de material que se fija en una galleta que tiene un pequeño receptáculo en su centro donde se pone la muestra de suelo, se comprime para colocarla en el difractómetro, este emite rayos X hacia la muestra y al incidir sobre las superficies de los cristales ocurre reflexión y refracción del rayo, que permite distinguir el tipo mineral que existe en la muestra. Las muestras fueron procesadas en un difractómetro marca Bruker D8 Advance ECO, con fuente de cobre ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) con potencia de 1000 W y filtro de Ni. El rango de medición (2θ) es: $5^\circ - 65^\circ$. El tamaño del paso es de $0,02^\circ$ y su tiempo de paso o exposición es de 10,00 s, para una rotación de 15 RPM. La difractometría es usada, entre otras aplicaciones, en la evaluación de deslizamientos para identificar los minerales presentes y entender de mejor manera el proceso de activación de una ladera, para lo que se busca la existencia de minerales arcillosos, que tengan la capacidad de expansión que generan presiones extras en la masa inestable. Álvarez – Gutiérrez et al. (2015) realizaron difractometría en muestras tomadas de un área deslizada en Antioquía, Colombia, con el fin de conocer las arcillas presentes y su actividad.

Cuadro 1

Ubicación de sitios de muestreo de suelos para ensayos difractométricos.

Coordenadas CRTM05	Número de muestra
x: 461076,1 y: 1134740,11	1
x: 461003,2 y: 1134299,9	2
x: 461018,5 y: 1134257,9	3
Centro del deslizamiento AZ3	4

A veces, cuando la muestra está meteorizada, se produce a lo largo de la base del gráfico difractométrico un espacio a lo largo del gráfico donde los rayos X tienen un comportamiento caótico, debido a que los rayos X inciden en masas amorfas y suele llamarse ruido de fondo. En los gráficos de las muestras 1, 2 y 3, este ruido de fondo es significativo, pues son muestras de unidades volcánicas meteorizadas y convertidas en un suelo. La muestra 4, por el contrario, fue tomada en el área de la superficie de ruptura del deslizamiento, lo que implica que está más sana en cuanto a la meteorización, por lo que en el diagrama correspondiente, el ruido de fondo no es tan evidente.

Geología del área

En el área de estudio, se reconoce un primer informe de Dóndoli (1950) que visitó el área para el estudio de los yacimientos de azufre, reconoce una capa de cenizas y arenas volcánicas y suyaciendo aparece la cobertura lávica andesítica. Describe una roca grisácea – azulada que pudo corresponder a una arenisca profundamente arcillitificada dentro del cual existen dispersos cristales de pirita, y dentro de esa unidad, es donde están los yacimientos de azufre. Refiere Dóndoli que el yacimiento principal no es grande y explotable mediante técnicas caseras, pero los yacimientos se repiten, lo que le hizo pensar en acumulaciones. Refiere que estos afloramientos pudieron generarse a partir de la acción mineralizante [sic] de aguas termo minerales que produjeron cambios químicos y físicos profundos. Huapaya et al. (2021) indican que en el área afloran las siguientes unidades volcánicas: la unidad más antigua, que data del Pleistoceno medio a superior, es la Unidad paleo Platanar, formada por coladas de basaltos y andesitas, con presencia de tobas, lahares, y flujos piroclásticos. La unidad presenta alteración hidrotermal con formación de sulfuros, pirita, calcopirita y azufre volcanogénico. La otra unidad importante del área de estudio es la Unidad Depósitos de deslizamientos, del Holoceno, constituida por depósitos caóticos de materiales clásticos, posiblemente de erosión intensa de la unidad paleo Platanar, bloques polimícticos embebidos en una matriz arcillosa y tobácea.

Estas unidades geológicas inciden en la geomorfología y en el comportamiento difractométrico de muestras de suelo del área, como se verá más adelante.

Información histórica

Se indagó sobre el historial de deslizamientos a partir de una entrevista a profundidad no estructurada. De dicha entrevista se recolectaron datos de interés para el área deslizada en la cabecera del río Aguas Zarcas, a partir del 17 de julio de 2023. Se indicó que ese sector tiene movimiento importante desde inicio de la década de 1980. Pero no es el único sitio con evidencias de inestabilidad, pues el entrevistado refirió que, del paraje denominado Bajo Minas, dos kilómetros aguas abajo del río Aguas Zarcas, margen oeste, existe un sector de laderas que está deslizando desde los años de 1980, cuya dirección de movimiento es hacia el río Aguas Zarcas. El terreno constantemente se agrieta, el entrevistado indica que “...las piedras se van abriendo...”. También refiere que en julio de 2023 ocurrió un primer deslizamiento que obstruyó el río Aguas Zarcas. Comenta que “...ese sector se desliza, [se ven] pelonazos bastante interesantes”.

En el sector del gran deslizamiento de julio del 2023, la quebrada Oro aún conserva su cauce, pero el 3 de julio ya el deslizamiento había movilizado material hacia dicha quebrada y ésta ya tenía bastante sedimento. Hay sectores del río Aguas Zarcas que están represados por materiales desalojados por los deslizamientos de sus márgenes. Las personas que circulan a lo largo de ellas pueden hundirse dado el espesor de los depósitos. El entrevistado recomienda apoyarse en varillas o palos para “*tantear el suelo*”, llevar cuerdas con el fin de no hundirse en el fango suave.

Además, el entrevistado comenta que a su padre, cuando niño, lo enviaban a entregar almuerzo por un sendero que comunicaba a un lugar llamado Río Segundo. En este caso se está haciendo referencia a las décadas de 1930 y 1940. Este lugar se localiza hacia el ESE del área deslizada. El sendero se extendía donde actualmente está el Mirador de Coepelesca, en el Sendero Pozo Verde. Cuando se llegaba a un empalado usado para bajar al río Segundo, se pasaba cerca de una laguna. Cuando el entrevistado era adolescente, en la década de 1980, quiso localizar la laguna que conoció su padre, sin embargo, nunca la localizaron. El entrevistado especula que posiblemente el sector de la laguna se deslizó y pudo afectar varias fincas de los alrededores, tal como la mitad de la finca de “*los Huertas*” y la de “*los Millos arriba*”.

En la década de 1970 a 1980 ingresó al área la compañía minera “Eurospect” que abrió el camino para la explotación de azufre, previamente denunciado por el Sr. Ricardo Massey (Dóndoli, 1950) y de oro. Ramírez (1968) hizo un reportaje periódico en donde entrevistó al director de la Dirección de Geología, Minas y Petróleo, el Dr. César Dóndoli sobre minería en el país, y se hace referencia a la existencia de azufre en el área que se estudia en Aguas Zarcas “*En la zona del Cerro Platanar y curso superior del río Aguas Zarcas, de todas es la zona que se conoce más y en donde se han hecho grandes trabajos de exploración*”, en la noticia se informa que el Dr. Dóndoli visitó el área en 1951 (realmente 1950) y generó el primer reconocimiento del azufre denunciado por un señor de apellido Massey “*estas, son las que ofrecen mayores perspectivas para explotaciones futuras de gran envergadura...*” (La República, 1968, p. 6). Para esa época, el entrevistado recuerda que había movimientos de laderas relativamente lentos, que no describe en su informe técnico de 1950. Después que salió la compañía, el terreno empezó a moverse más; la evidencia de esto es el corrimiento del camino, se desplazaba cerca de un metro o dos, entonces había que caminar en dirección al río Aguas Zarcas para volver a retomar el camino. Pero después de un tiempo ya era imposible bajar tanto para retomar el camino corrido, entonces se abandonaba el tramo afectado y se realizaba uno nuevo para conectar con el tramo no movido del otro lado del área en movimiento. El área del deslizamiento referido coincide con el sector donde actualmente ocurrió el deslizamiento de julio. Interesante el dato de que, en esa época de movimiento de la ladera, no fueron observadas fisuras y la explicación que ofrece el entrevistado es la dificultad de formación de fisuras por la abundancia de la “*arcilla volcánica*”. “*Entonces se hizo un sendero por la parte baja (posiblemente cerca del pie del actual deslizamiento), había un árbol que al formarse una grieta este se partió en dos y quedó unido en la copa. Esta grieta ocurrió como al centro de lo que se deslizó recientemente. Cambió la morfología y se formaron lagunas*”. Esto lo ubica el entrevistado cerca del año 2000. La compañía se fue del sitio no por el proceso de deslizamiento sino por problemas originados en los movimientos populares que no querían minería en el área. El entrevistado señaló que “*...es tan arcillosa el área que cuando la compañía estaba haciendo el camino, se hundió hasta el techo un tractor*”.

En el 2007, la ladera que se deslizó en el año 2023 se acercó mucho al otro margen del río Aguas Zarcas, y dejó un espacio angosto para que discurriera el agua del río. En esa oportunidad se llamó a la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE, por sus siglas históricas), pero el 3 de junio la abertura se hizo más angosta y no permitía que pasara una persona, escasas 5 o 6 pulgadas de ancho y detrás se habían formado unas lagunas debido al levantamiento del frente del deslizamiento al chocar con el otro margen del río Aguas Zarcas.

Entre el 2010 y 2015 se volvió a mover la tierra, desplazó la ruta de acceso y se tuvo que hacer otro trillo, según recuerda el entrevistado, se formaron lomas en el área, luego la tierra se alzó, pues se tenía que subir una cuesta para llegar a la quebrada (del Oro?). La quebrada fue afectada por el movimiento porque dice que si se veía a la quebrada hacia la montaña discurría a la derecha, pero luego hizo un nuevo cauce que se acercó al área levantada. Este levantamiento puede interpretarse como un deslizamiento con una componente rotacional.

En el 2020 ocurrió un deslizamiento en el talud rocoso, y las grietas del terreno se hicieron más grandes, el área levantada se alzó un poco más y en marzo y abril de 2023 la quebrada (¿?) salía más abajo de donde tiene la confluencia hoy. La quebrada (¿?) en la actualidad está muy sucia. Luego está la quebrada Gata que tiene su confluencia más abajo. De la quebrada Gata se tomaba el agua para el campamento minero, porque el agua de la otra quebrada es ácida (¿Quebrada Agría?).

Los cimientos del antiguo campamento minero están fuera del área recientemente deslizada, el sitio no se mueve porque ahí es donde está lo que los vecinos denominan “*ciudad blanca*”, en donde la litología original, posiblemente piroclástica, presenta fuerte alteración hidrotermal silícea que permite que la roca tenga una apariencia de porcelana blanca y sea muy dura. El Sendero Pozo Verde está lastrado con dicha roca.

La otra persona entrevistada, doña Bernardita Varela Quirós, tiene historias interesantes del área. Son historias que estuvieron posiblemente en la percepción y el conocimiento popular de los primeros habitantes. Según la entrevistada, “*toda esa parte que se fue [el deslizamiento Aguas Zarcas] es un volcán porque cuando hace doscientos años hizo erupción el Poás, que habían como fumarolas*”. Es muy posible que la erupción de la referencia, sea la generada en 1834 (Peraldo y Rodríguez, 2001), extraña que se recuerde aún la tradición de esa erupción, cuando prácticamente estuvo olvidada en los recuentos históricos de erupciones para el volcán Poás. Podría ser que el área ya estuviera colonizada para ese año y la tradición se pasara por vía oral a las nuevas generaciones. Sin embargo, el primer entrevistado refiere que nunca ha visto fumarolas en el sector.

En el catálogo de deslizamientos históricos elaborado por Peraldo y Rojas (2000) no se reflejan datos sobre deslizamientos para el área de estudio. Esto implica que en los periódicos que fueron revisados por los autores no apareció ningún dato para el área de interés.

Topónimos

La Real Academia de la Lengua Española, actualizada al 2023, refiere que la toponimia es la rama de la onomástica que estudia el origen de los nombres propios de los lugares, así como el significado de sus étimos que son sus raíces o vocablos que proceden de otros y el topónimo es el nombre propio del lugar. Garita (1995) refiere que los topónimos son los nombres geográficos en su más amplio sentido. Entonces la toponimia es entender la génesis del nombre asignado a un rasgo geográfico. En este particular, la toponimia de un área muchas veces refleja los procesos naturales que son constantes y que transforman el paisaje. Las personas dan nombres a rasgos geográficos a partir de las características particulares que observan en esos rasgos o de hechos históricos o cotidianos en sus alrededores.

La geología es clave para entender los topónimos recopilados para el área de estudio, pues cada nombre recuerda procesos de mineralizaciones, contaminación con minerales existentes, explotación minera, o bien relacionados con procesos erosivos. Para el sector de estudio, existen varios nombres que son reunidos en el mapa Quesada, a esc. 1:50 000 del IGN. Llama poderosamente la atención los reunidos en el cuadro 2 y ubicados en las figuras 1 y 2.

El dar la importancia a los topónimos coadyuva en entender los procesos tanto naturales como históricos ocurridos en el área de estudio. En el caso de la toponimia del sector, es claro que los nombres asignados por la población a rasgos geográficos fijos, corresponden a lo que ha sido común para cada rasgo y los topónimos reunidos en el cuadro 2 recuerdan los procesos naturales y económicos del área. Por ejemplo, con relación a la quebrada Agria, Dóndoli (1950) refiere que el barro existente en la unidad mineralizada con pirita, presenta un sabor ácido [sic] y este material pudo darle el sabor a la mencionada quebrada.

Cuadro 2

Topónimos de interés recolectados en el área de inestabilidad de la cabecera del río Aguas Zarcas.

Coordenadas CRTM05	Topónimo	Elemento geográfico	Percepción
x: 461049,8 - y: 1134748,7	Pozo Verde	Laguna	Agua verde, se podría pensar que dicho color se debe a la contaminación con azufre.
x: 463198,8 - y: 1133896,5	Azufrada	Quebrada	Contaminación con azufre.
x: 462099,8 - y: 1134827,6	Oro	Quebrada	Se localiza cerca de una mina abandonada en donde se explotó oro.
x: 461200,9 - y: 1135898,5	Agria	Quebrada	Agua con ese sabor, posiblemente por contaminación con sulfuro de hidrógeno.
x: 464249,9 - y: 1134995,4	Barroso	Río	Se pensaría en barro que contamina el agua. En las fotos aéreas de 1981, dicha quebrada presenta un flujo de escombros bien definido.

Información de campo

Se realizó el recorrido desde el Centro de Visitantes de Coepelesca, en San Josecito de la Montaña, siguiendo un sendero turístico hacia la Laguna Pozo Verde. Una morfología interesante fue la observada en el tramo del sendero entre el Centro de Visitantes de Coepelesca y el Mirador. Corresponde con un lahar que relleno el área de nacientes del río La Vieja (Fig. 3, A), creando un relieve bastante plano ondulado, de 10 grados de inclinación aproximadamente al SW. Tiene acumulaciones de bloques lávicos decimétricos subredondeados, pero todo el suelo del relleno está salpicado de bloques lávicos decimétricos a métricos. En esa morfología se han formado cárcavas incipientes ocupadas por arroyos que conforman las cabeceras del río La Vieja (Fig. 3 B). También se observa reptación de varias laderas ocupadas por potreros (Fig. 3C). Al margen oeste del relleno hay un cauce mayor de una quebrada cuyo margen derecho muestra evidencias de erosión intensa. El relleno tiene un ancho de aproximadamente 80 a 100 m y un largo de hasta 200 metros.

Otro rasgo peculiar prueba de la intensa actividad de inestabilidad de las laderas, es la existencia de troncos bastante bien preservados que surgen de un suelo que presenta bloques líticos centimétricos irregulares, denotando deslizamientos recientes (Fig. 3 F). Cerca de las áreas que han generado movimientos en masa en el pasado, se observan bosques de jaúl, que no parece que sean de plantación, pues su disposición es caótica en la ladera. Según Villanueva Najarro (2001) el jaúl es una especie que ayuda a la regeneración de suelos degradados.

Desde el Mirador, al norte, se observa una depresión ocupada por bosque incipiente en regeneración, pues el cambio de uso de producción agropecuaria a conservación es reciente (Fig. 3 D). El área del Mirador es la divisoria entre las cuencas de los ríos La Vieja y Aguas Zarcas. El tramo de sendero que está en la cuenca del río Aguas Zarcas está fuertemente agrietado, lo que denota la inestabilidad del terreno. Fisuras abiertas de 3 cm hasta 20 cm muestran rumbos SE-NW y EW, con una dirección de movimiento al NE y N hacia el cauce del río Aguas Zarcas. Esta depresión es limitada al oeste por una fila empinada de divisoria angosta bien definida, que tiene laderas inestables de muy fuerte pendiente. La Laguna Pozo Verde fue impactada por un flujo de lodo y rocas en el 2023 producto de un deslizamiento de parte de la ladera de dicha fila. El flujo bajó por una pequeña quebrada tributaria a la laguna y afectó como una cuarta parte del área lagunar (Fig. 3 E).

De la litología se logró identificar depósitos de piroclastos de caída que presentan granos no mayores de 2 mm inmersos dentro de una textura de arena gruesa (Fig. 3 G). El depósito tiene variaciones laterales a brechas más gruesas bastante meteorizadas de hasta 2 m de espesor visible. Se observa una brecha gruesa de bloques lávicos andesíticos desde 30 cm hasta centimétricos, meteorizados, rodeados de matriz parda y laminillas milimétricas rojizas endurecidas posiblemente por acumulación de oxidación de hierro. No hay contacto entre granos. Además, bloques centimétricos a métricos de lavas andesíticas con diferentes grados de meteorización y litologías brechosas, algunas con alteración hidrotermal y todo el conjunto muy meteorizado, lo que impide su descripción detallada. Estas litologías afloran en el tramo del sendero desde el Centro de Visitantes de Coepelesca hasta el Mirador, punto en donde se empieza a bajar hacia el río Aguas Zarcas.

Geomorfología

En términos generales, el mapa geomorfológico desarrollado a partir de la fotointerpretación de las fotografías aéreas de 1981, muestra gran cantidad de morfologías relacionadas con deslizamientos, evidencia de un fuerte proceso erosivo que modela constantemente el relieve, especialmente en el sector oeste del mapa (Fig. 4). Ese sector muestra un relieve rugoso de menor pendiente; sin embargo, su rugosidad es alta debido a la cantidad de eventos de deslizamiento que han cortado otros más antiguos. Se observan colinas alargadas que se interpretan como restos de antiguas coronas de deslizamiento, que fueron cortadas por movimientos posteriores. Se identifican áreas muy planas como evidencia de ciénagas, asociadas a sistemas lagunares desarrollados en áreas deslizadas. Las divisorias presentan morfologías redondeadas. El patrón de drenaje es dicotómico que se orienta al norte siendo su colector principal el río Aguas Zarcas. Al sur el sistema de drenaje es dicotómico orientado al este.

En términos particulares, en el sector oeste la existencia de la Laguna Pozo Verde sugiere un bloque basculado por deslizamiento en donde se acumuló agua posiblemente de niveles freáticos cortados por el proceso de basculamiento y también por escorrentía superficial. En este sector los cauces son irregulares, tienden a divagar en áreas más planas y a diferencia de los cauces del sector este del área, no muestran valles profundos.



Fig. 3. Diferentes aspectos observados en el recorrido en el Parque Nacional Juan Castro Blanco. A. Sector de relieve plano, que corresponde con el relleno producto de un lahar. B. Cerca del área de arranque del lahar, se observan cárcavas angostas. C. Laderas que muestran reptación. D. Depresión en la cuenca alta del río Aguas Zarcas. E. Laguna Pozo Verde muestra el material que relleno un sector de la laguna en 2023. F. Flecha señala un tronco que sobresale en el suelo. G. Muestra de roca piroclástica.

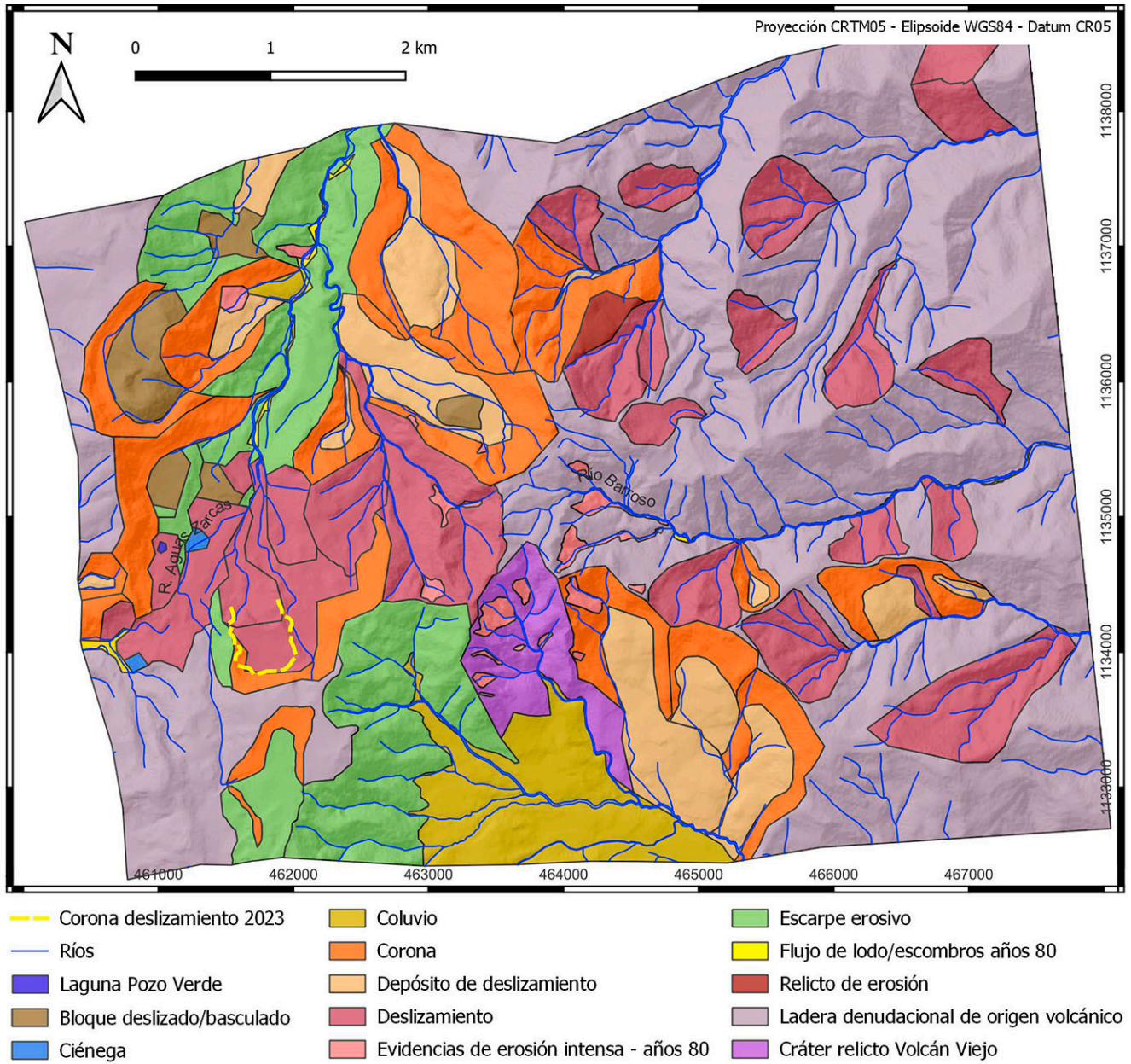


Fig. 4: Mapa geomorfológico del área de estudio, según fotos aéreas del IGN de 1981, rolo 180, L3, # 25617, 25618, 25619 y 25620, escala 1:20 000.

El área agrietada de un tramo del Sendero Pozo Verde (Fig. 5), observada durante la inspección de campo, se observa en foto aérea con fuertes evidencias de movimientos anteriores. Los agrietamientos observados corresponden a una reactivación reciente de un área con evidencias morfológicas de inestabilidad. Se observa en el cauce del río Aguas Zarcas evidencias de flujos de escombros recientes para el año en que fue tomada la línea de vuelo a la que pertenecen las fotos analizadas. Estos depósitos evidencian gran actividad erosiva en las cercanías del año 1981.

Hacia el sector este del mapa geomorfológico (Fig. 4) aumenta la pendiente de las laderas. Los valles fluviales muestran pendientes fuertes; generalmente las divisorias son filosas, pocas son redondeadas, los perfiles de los valles son en gran medida en forma de “V” y en sus márgenes se observan geformas asociadas con deslizamientos. El patrón de drenaje es dicotómico y en trellis, y los cauces principales se orientan al este y son tributarios al río Segundo. El río Barroso muestra para 1981 evidencias de flujos de lodo y de escombros, hay evidencias en el cauce que aparecen como pequeñas áreas blanquecinas porque reflejan fuertemente la luz, que evidencian depósitos recientes de materiales. En las laderas también se observan manchas blancuzcas que corresponden con deslizamientos superficiales que desalojaron la cobertura regolítica. Referencias periodísticas para el río Barroso, indican que para marzo de 1924, el Barroso estaba crecido y sucio (La Noticia, 18 de marzo de 1924, pág. 2).

El cambio de relieve y de direcciones de patrones de drenaje hacia el centro del mapa de la figura 4, denota cambios importantes de litologías y de procesos geológicos.

El área deslizada el 17 de julio de 2023 ya muestra fuertes evidencias morfológicas de movimiento para 1981 (Fig. 6), pues el área deslizada se delimita fuertemente contra las áreas vecinas, en otras palabras, resaltan bien las coronas laterales del deslizamiento. De este análisis fotogeológico de detalle, se reconocen ya para 1981 tres cuerpos principales: A) Deslizamiento A.Z.1, muestra buena definición de las coronas. B) Deslizamiento A.Z.2 y C) Deslizamiento A.Z.3 tienen buena definición de coronas y aparentan cortar al deslizamiento 1. Según la interpretación, el A.Z.3 fue el sector que se deslizó en julio de 2023.

Las áreas vecinas tienen fuertes evidencias morfológicas de inestabilidad, pues se reconocen grandes escarpes que se relacionan con deslizamientos de mayor área que el deslizamiento actual.

Se realizó además un análisis en secuencia de imágenes PlanetScope (Fig. 7) de septiembre 2020, abril 2021, marzo y setiembre de 2022, abril, mayo y agosto de 2023 y marzo de 2024, con el fin de observar la evolución reciente del deslizamiento de Aguas Zarcas. Para el mes de setiembre de 2020 (Fig. 7a) ya se observan áreas de tonos más claros en el sector de la corona, lo que evidencia el daño en la vegetación posiblemente por la reactivación del deslizamiento. En abril de 2021 (Fig. 7b) se observa un sector alargado de tono claro que corresponde con la evidencia de una ruptura que empezó a definir el sector de la corona del área que se movilizó. Se observa suelo sin vegetación en esa área. En marzo de 2022 (Fig. 7c) la actividad en el sector de la corona, se detuvo, pero en un talud cercano a la Laguna de Pozo Verde se empieza a manifestar una claridad en la vegetación que corresponde al inicio de la formación de un deslizamiento.

Para setiembre 2022 en el sector central de la imagen, se evidencia con más fuerza el área que empieza a definir su inestabilidad, y en el área de la Laguna Pozo Verde, ya se tiene un desarrollo importante de un deslizamiento con un flujo incorporado hacia la laguna (Fig. 7d).

Para abril de 2023 (Fig. 7e), ya el sector de Laguna Pozo Verde aparece con un deslizamiento bien definido y la evidencia clara de un flujo de lodo que se movilizó hacia esta laguna y que la sedimentó parcialmente (Fig. 3E). Además, el área mayor de actividad aumenta y se define con más propiedad. Hacia el Sur del área activa ya descrita, se empieza a formar una fisura claramente visible en la imagen que corresponderá con la corona principal del deslizamiento de Aguas Zarcas. Para mayo de 2023 (Fig. 7f) ya la fisura al sur del área de actividad se define más y se puede identificar una grada en el relieve. Ya para agosto de 2023 (Fig. 7g) se observa el deslizamiento de Aguas Zarcas y el sector de Laguna Pozo Verde sin cambios apreciables. Esto implica que las fisuras medidas y fotografiadas a lo largo del Sendero Pozo Verde, aún no deforman suficientemente el terreno para que se noten los cambios en las imágenes satelitales. Sin embargo, para marzo del 2024 (Fig. 7h), se evidencia la definición de la corona hacia el oeste, lo que implica que se está incorporando más área al sector movilizado en julio del 2023.

Difractometría

La difractometría de rayos X es una metodología muy importante para caracterizar la mineralogía de los terrenos que han tenido, o tienen procesos de inestabilidad de laderas. Esta técnica ha sido empleada para la caracterización de material que



Fig. 5: Agrietamientos en el Sendero Pozo Verde. A. Fisuras abiertas de 3 cm de ancho. B. Alcantarilla movida por el agrietamiento. C. Se estima que los agrietamientos EW abiertos corresponden con el área de la corona del deslizamiento activo del sendero.

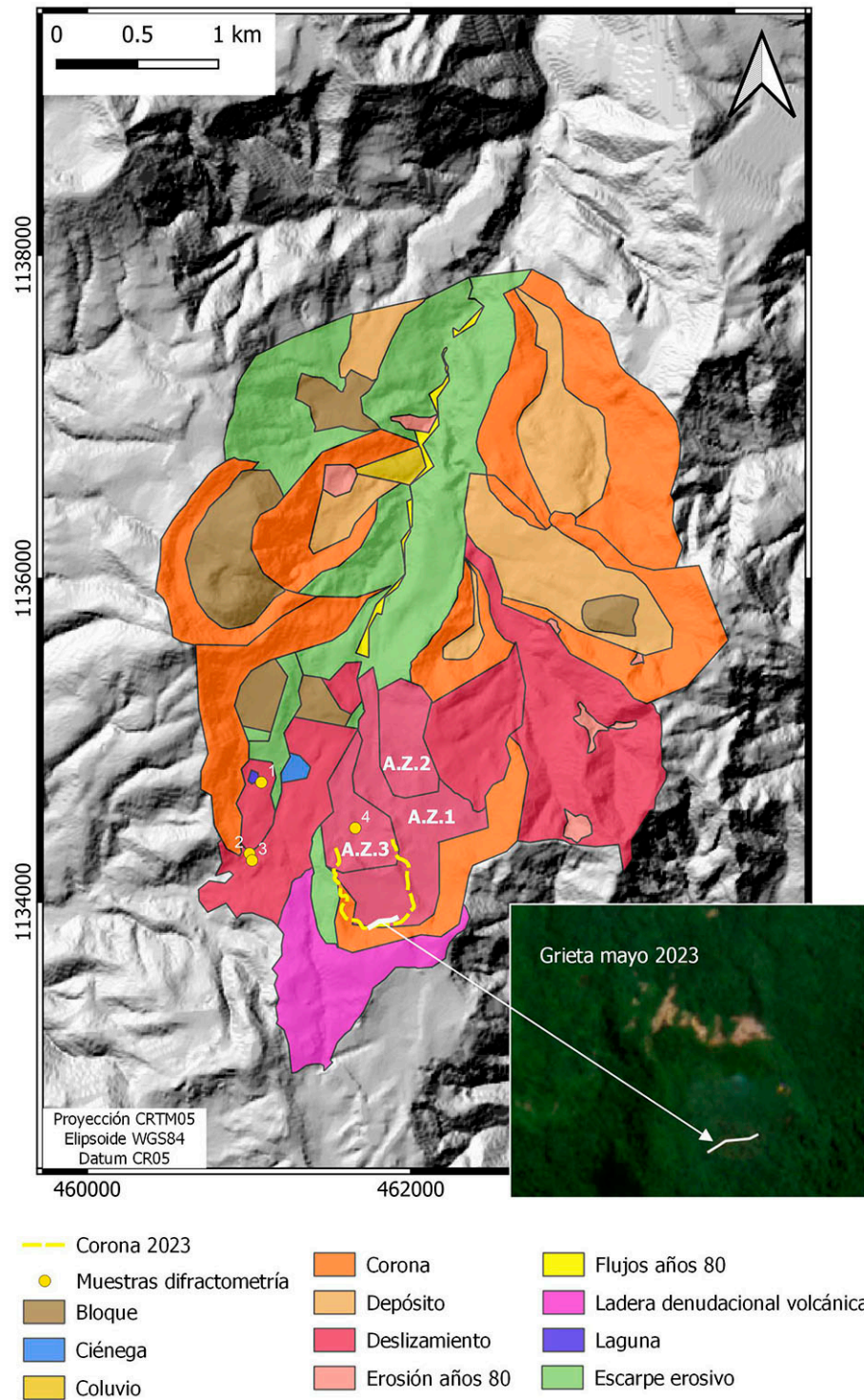


Fig. 6: Mapa geomorfológico a detalle de la cabecera del río Aguas Zarcas, con base en fotointerpretación de fotografías aéreas de 1981 y su comparación con la ubicación del área reactivada en julio 2023. Es sorprendente la cantidad de morfologías de deslizamientos, siendo así que se divide el área del deslizamiento Aguas Zarcas en A.Z.1, A.Z.2 y A.Z.3.

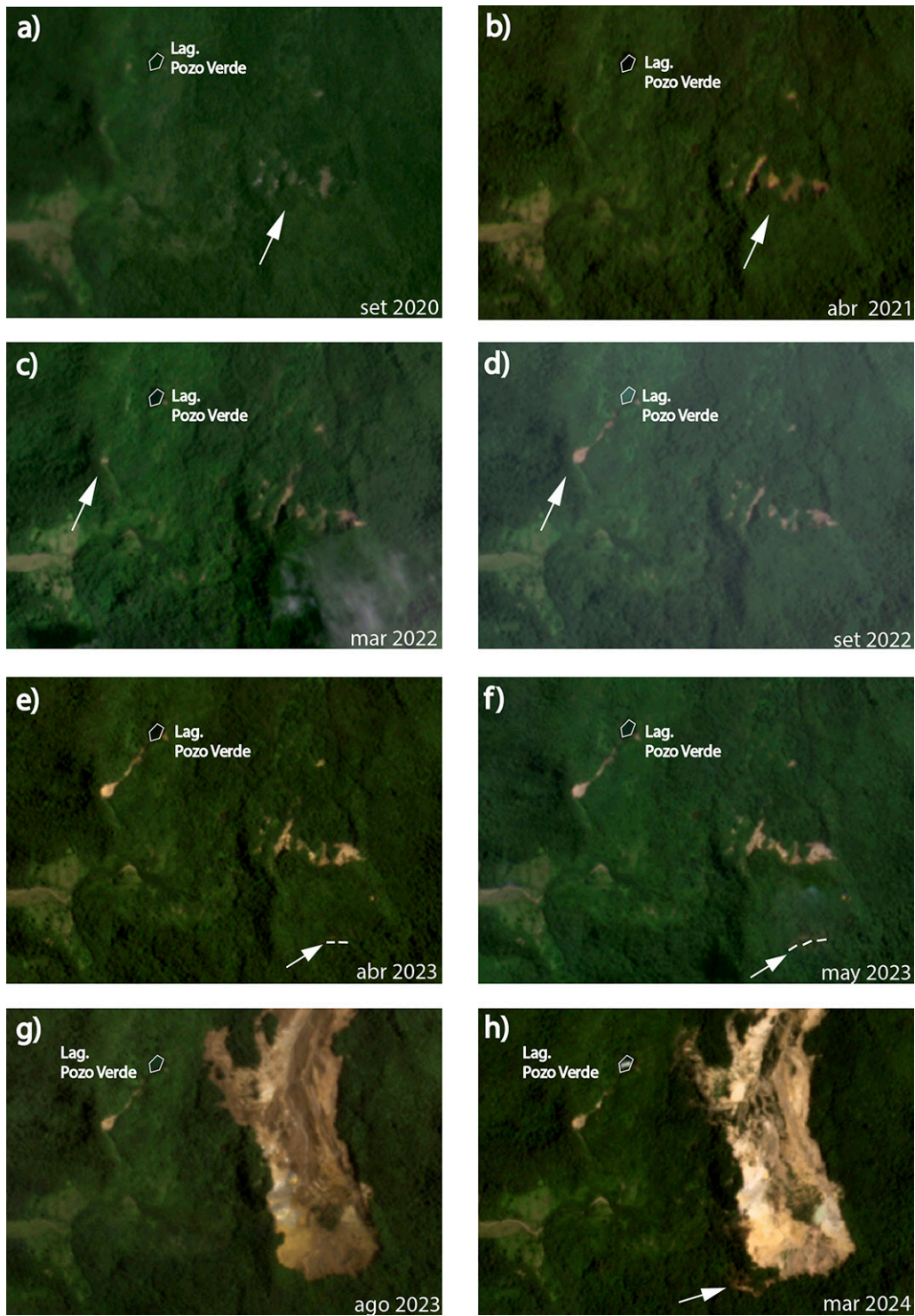


Fig. 7. Secuencias de imágenes PlanetScope, donde se observa el desarrollo de deslizamientos entre septiembre de 2020 y marzo de 2024 para el sector de estudio.

presentan arreglos cristalinos definidos, puesto que el método se basa en la difracción de un conjunto de átomos que poseen un arreglo ordenado, o sea un cristal, según Betancourth et al. (2010). En las muestras enviadas a ensayo de difracción, se tienen dos grandes grupos de materiales, uno cristalino (anisotrópico) y otro amorfo (isotrópico), este último genera un ruido en el resultado para cada muestra. Este ruido que corresponde con los materiales isotrópicos responde a la meteorización avanzada de la mayor parte de las muestras recolectadas (Fig. 8).

En otros países, la difracción coadyuva en la comprensión de áreas de inestabilidad de laderas y los modelos que resultan más completos para explicar satisfactoriamente el proceso y dar soluciones más integrales. Álvarez-Gutiérrez et al. (2015) aplicaron la metodología de difracción para el estudio de un área de inestabilidad de laderas en la comarca de Amagá, Antioquía, Colombia. Les dio como resultado, montmorillonita, caolinita e illita. Refieren que cuando los minerales arcillosos se expanden pueden generar presiones de hasta 700 kPa, lo que genera agrietamientos y pone en movimiento lento gran cantidad de volumen de material aun en pendiente suave, siendo así que la expansión de las arcillas es un factor muy importante de disparo de deslizamientos.

Al analizar de forma cualitativa la morfología del patrón de difracción de la muestra 1, se observa que en gran parte es amorfa, debido al ruido de fondo, que, en magnitud de cuentas, se mantiene sobre las 5000 cuentas durante todo el tiempo de medición, esto, junto con la baja resolución de las señales y la alta complejidad de la muestra nos indica que posiblemente se encuentre en un proceso avanzado de meteorización (Fig. 8a).

La muestra 1 presenta como fases principales cuarzo, cristobalita, albita y halloysita. En menor proporción, pero siendo significativa su abundancia, las arcillas montmorillonita y tridimita; cabe destacar que la muestra presenta gran amorfismo, muy posiblemente asociado a un alto grado de meteorización. De hecho, las arcillas identificadas se presentan en estos procesos (Fig. 8a).

Caso análogo a la muestra 1, ocurre con la muestra 2, en este caso, el ruido de fondo, asociado al amorfismo disminuye levemente, sin embargo, esto no permite resolver la identidad de todas las fases cristalinas (Fig. 8b). En esta muestra cabe destacar la abundancia de la albita y la tridimita como fases principales, en comparación con la muestra anterior. En esta muestra no se encuentra cuarzo, pero sí cristobalita, las ya mencionadas albita y tridimita como fases principales, seguidas en una ligera menor proporción la caolinita, montmorillonita y la illita (Fig. 8b).

Al igual que con las muestras anteriores, en la figura 8c se observa que la muestra 3 presenta una magnitud significativamente alta en cuanto al ruido de fondo, lo cual se relaciona a la presencia de gran amorfismo. Esto, sumado a la baja resolución de las señales y alta complejidad es un indicativo de un proceso de meteorización.

En la muestra 3, las fases principales observadas son cristobalita, goetita y montmorillonita, seguido por caolinita, illita y en menor proporción, esmectita. La pirita se produce en ambientes hidrotermales y da origen por meteorización del Fe a la goetita, que permanece en los suelos (Fig. 8c).

La muestra 4, tomada del centro del deslizamiento A.Z.3 (Fig. 8d), es la que describió Dóndoli (1950), resultó ser la más cristalina y menos compleja de las estudiadas, debido, entre otras cosas que disminuye el área de ruido de fondo que implica menos meteorizada y por tanto con menos materia amorfa. En ella se observa la presencia de fases cristalinas como la pirita, caolinita y montmorillonita como fases principales, y la illita y cristobalita como fases de menor presencia. Esta muestra presenta pocos signos de meteorización y se observa que las señales de las fases principales son muy limpias y delgadas, indicando que estas fases identificadas tienen una alta cristalinidad, y por ende, se encuentran en alta pureza (Fig. 8d).

Discusión

El deslizamiento A.Z.3 del 17 de julio de 2023, no ha sido el único que ha ocurrido en el área de las cabeceras de los ríos La Vieja y Aguas Zarcas. La evidencia geomorfológica prueba que en el pasado, los movimientos de ladera de grandes áreas han modelado el relieve del sector de estudio. El sector oeste muestra un modelado generado por la reactivación de grandes áreas que han llegado a generar una alta rugosidad por la remoción constante de material, que consiste en la formación de deslizamientos que cortan geofomas creadas por anteriores deslizamientos. La evidencia histórica apoya la evidencia geomorfológica, pues los relieves identificados en el análisis de fotografías aéreas de 1981 coinciden con lo indicado por un testigo ocular, quien pudo recordar que al inicio de los años de 1980 del s. XX, ya existía movimiento importante en el sector identificado como Aguas Zarcas (A.Z.1, A.Z.2 y A.Z.3) en la figura 6. Al Este del área, la morfología del relieve cambia, con

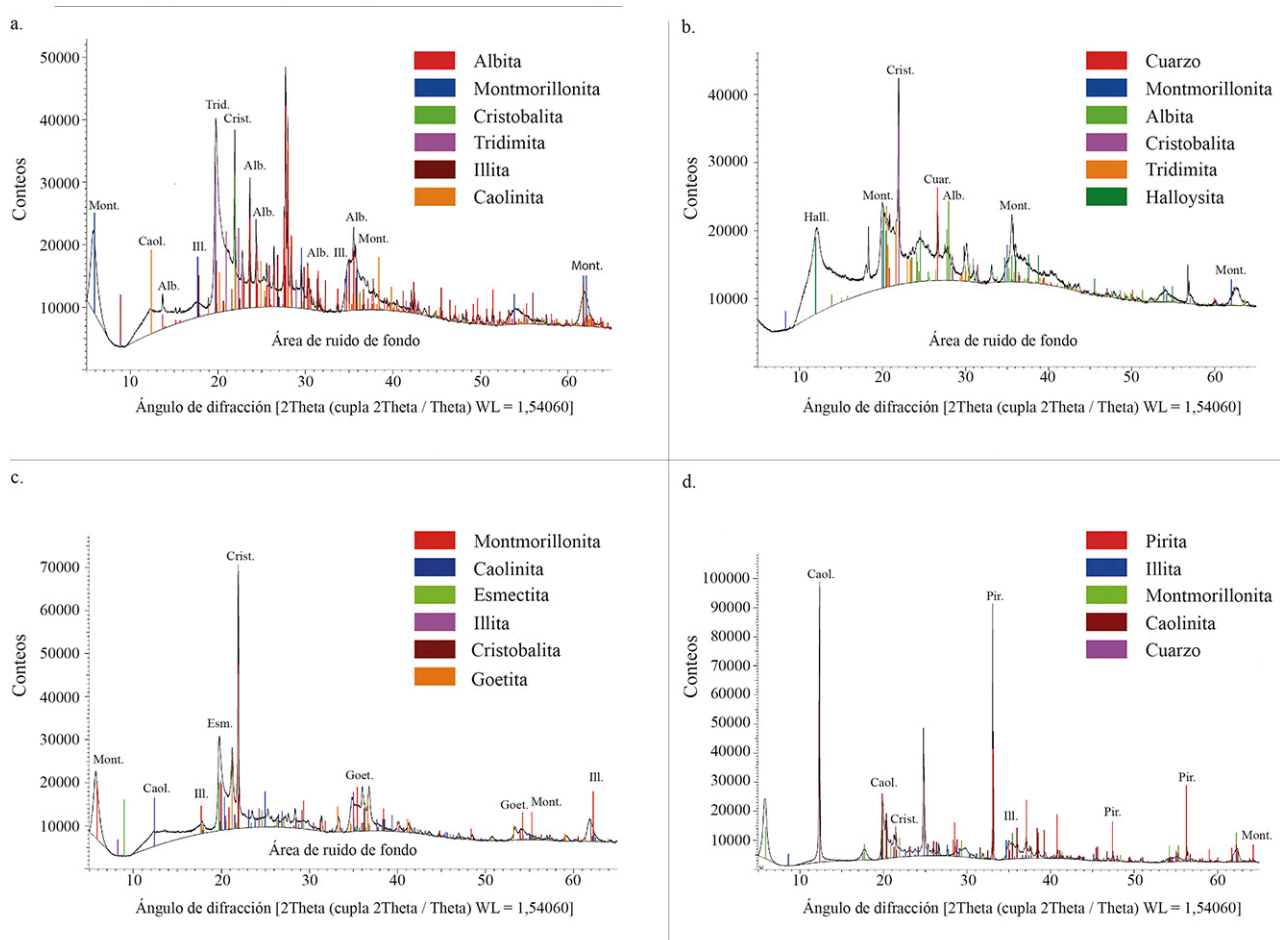


Fig. 8. Resultados de los ensayos de difracción a las muestras 1 (1a), 2 (1b), 3 (1c) tomadas en el sendero a Laguna Pozo Verde y 4 (1d) tomada en el centro del deslizamiento Aguas Zarcas.

pendientes más fuertes y deslizamientos más aislados y de menor área, sin relación aparente entre ellos.

La actividad minera que existió desde inicios del s. XX hasta recientemente, para la extracción de azufre y de oro, apoyan la toponimia del área, y la existencia de alteración hidrotermal en el sector oeste del mapa geomorfológico. Este hidrotermalismo origina arcillas expansivas, tales como montmorillonita, halloysita e illita, se comprobó su presencia mediante difracción. La halloysita es un filosilicato formado en ambientes hidrotermales y la presencia de montmorillonita alude a una arcilla expansiva, a pesar de que no se logró medir su porcentaje de expansión. Sin embargo, su presencia es un factor más de inestabilidad en áreas de deslizamientos. Por ejemplo, al revisar trabajos anteriores, se conoció que una montmorillonita determinada por difracción en el área del deslizamiento de Llano de Piedra, entre Dota y Tarrazú, dio un valor de hinchamiento de 19% de su volumen, lo que coadyuvó en el disparo del deslizamiento (Peraldo, 2000). Entonces, todas las evidencias anotadas apuntan a que el deslizamiento Aguas Zarcas no es el primero que se ha generado en el área, aparte porque el gran abanico de Aguas Zarcas descrito en la campaña geológica de 2014, ha sido formado por diferentes eventos de flujos de lodo, lo que significa que la fuerte erosión de las montañas del sur de Aguas Zarcas se deposita al norte en el área de transición montaña – llanura aluvial.

Otra observación interesante es que el área afectada por el movimiento en masa del 17 de julio de 2023 presenta una pendiente media a baja, (evidenciado durante la fotointerpretación para este trabajo), igual observación señalaron Peraldo y Badilla (2024) para los deslizamientos ubicados a lo largo del río Reventazón en Turrialba y Siquirres. Esto permite suponer que el factor de pendiente por lo menos para este caso no es relevante para disparar el deslizamiento, pero si lo es la cantidad de minerales arcillosos expansivos, tal como concluyen Álvarez-Gutiérrez et al. (2015) que la expansión de arcillas expansivas tales como la montmorillonita, experimentan cambios de volumen de hasta 9%, que se traduce en la generación de hasta 700 kP de presión, según lo analizaron para el deslizamiento de La Bonita en Colombia, que genera agrietamientos y desplazamientos lentos de grandes áreas a pesar de la baja pendiente de la ladera inestable.

Conclusiones

La interpretación geomorfológica demuestra que el área de inestabilidad de laderas de la cabecera de los ríos Aguas Zarcas y Barroso, es muy activa y ha generado deslizamientos de la misma naturaleza del que se produjo en julio de 2023.

Los topónimos permiten interpretar las características geológicas del área de estudio.

La mineralogía existente demuestra la alteración hidrotermal que existe en el área y es un factor más de inestabilidad.

Recomendaciones

La reforestación como factor de estabilidad de las laderas, depende de la geometría y profundidad del deslizamiento. Además, la cantidad de biomasa que se desplazó aguas abajo del río Aguas Zarcas en julio de 2023, generó presas y aumentó la destructibilidad del flujo. Es mejor proteger el suelo con grama, o vegetación baja como helechos y no con árboles.

Es importante medir constantemente la apertura de las grietas que se localizan a lo largo del Sendero Pozo Verde, y de otros sectores donde existan y buscar alguna técnica para relacionar el aumento de tamaño de las fisuras, con la cantidad de lluvia. Debe monitorearse, igualmente, mediante Percepción Remota, la evolución de la corona oeste del deslizamiento A.Z.3 (Figs. 6 y 7h).

Es recomendable revisar los métodos de zonificación de deslizamientos, con el fin de incorporar el factor mineralógico como medio de disparo de deslizamientos en laderas de pendiente baja a media.

Es de vital importancia mantener informada a la población, y evitar las noticias sensacionalistas sobre el proceso de inestabilidad existente en la cabecera del río Aguas Zarcas.

Agradecimientos

Al señor Douglas Vargas y Bernardita Varela Quirós, habitante del área, quien fue entrevistado y tiene información familiar de gran interés para coadyuvar en la historia económica del área, además que sus datos aportados sobre deslizamientos fueron de gran ayuda para entender el movimiento actual. A Laura Leytón M, y Jackeline Rojas de Coopeslesca, por su colaboración y datos históricos. A Ana Rivera, bibliotecaria de la Escuela de Geología por su colaboración en la búsqueda y ubicación de material bibliográfico importante para este artículo. A Norman Chaves por coadyuvar en la preparación de las figuras de difracción. A Jorge Brenes, chofer de la escuela por su colaboración en el campo.

Referencias bibliográficas

- Alvarado, G. E., Mora, R., y Peraldo, G. (2003). The June 2000 Arancibia Debris Avalanche and Block-slide, Costa Rica. *Landslide News*, 14–15, 29–32. <https://www.researchgate.net/publication/351781222>
- Álvarez-Gutiérrez, Y., Montoya-Cañola, S. M., Rendón-Giraldo, D. A., y Caballero-Acosta, J. H. (2015). Análisis y diagnóstico de los fenómenos de inestabilidad que afectan el sector “La Bonita”, Amagá, Antioquia, Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 37, 35–44. <https://doi.org/10.15446/rbct.n37.43757>
- Araya, R. (2004). Deslizamiento Arancibia, Puntarenas: junio del 2000. Serie: Hoy hace...
- Betancourth, D., Gómez, J. F., Mosquera, J. C., y Tirado-Mejía, L. (2010). Análisis por difracción de Rayos X de rocas provenientes de Región Esmeraldífera. *Scientia et Technica*, XVI(44), 257–260.
- Dóndoli, C. (1950). *Informe sobre el yacimiento de azufre denominado “El Congo”*. Universidad de Costa Rica (Trabajo reimpreso en 1965, Informes técnicos y notas geológicas, 19).
- Garita, F. (1995). *Toponimia de la Provincia de Cartago*. Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- González, C. (1994). *Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica 1608 – 1910*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Huapaya, A. S., Rodríguez, E., y Ceciliano, A. (2021). *Mapa geológico 1:50 000 Hoja 3346-IV Quesada*. Dirección de Geología y Minas, Minae.
- Montero, W., y Alvarado, G. E. (1995). El terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 (Ms = 5,9) y el contexto neotectónico de la región del volcán Irazú, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 18, 25–42. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i18.13522>
- Mora, R. (2000). *El deslizamiento de las lagunas de Arancibia, Costa Rica: un desastre dos veces anunciado*. EIRD Informa - América Latina y El Caribe, 2.
- Peraldo, G. (2000). Los deslizamientos. En P. Denyer y S. Kussmaul (eds), *Geología de Costa Rica* (pp. 273-268). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Peraldo, G., y Molina, F. (1993). Reconstrucción histórica del deslizamiento de Puriscal. *Revista Geológica de América Central*, 16, 85–94. <https://doi.org/https://doi.org/10.15517/rgac.v0i16.13273>
- Peraldo, G., y Rojas, E. (2000). Catálogo de deslizamientos históricos para Costa Rica, periodo 1772 – 1962. *Informe Semestral Instituto Geográfico Nacional*, 36, 123–171.
- Peraldo, G., Badilla, E. (2024). Landslides of a Middle Reventazón Catchment lithological and topographic controls. En A. Quesada-Román (ed.), *Landscapes and landforms of Costa Rica, World Geomorphological Landscapes* (pp. 391-412). Springer.
- Ramírez, O. (4 de septiembre de 1968). Desarrollo minero, riqueza para Costa Rica. *La República*, 6.
- Salazar, M., Alvarado, G. E., Madrigal, J., y Monestel, Y. (2019). Deslizamientos históricos importantes en el Volcán Barva (Costa Rica) y su transformación en flujos de escombros volcánicos. *Revista Geológica de América Central*, 61, 107–119. <https://doi.org/10.15517/rgac.v61i0.40090>