

Nuevos aportes a la cronoestratigrafía del volcán Rincón de la Vieja (Costa Rica) de los últimos 35.000 años

***Melissa Sánchez¹, Paulo J. Hidalgo², José Brenes-André³, Guillermo E. Alvarado¹,
Walter A. Báez⁴, Yemerith Alpízar⁵, Karina Abarca⁶, Jorge Abarca¹**

¹ Universidad de Costa Rica (UCR), Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes, San Pedro, San José, Costa Rica.
melissa.sanchez.m18@gmail.com, galvaradoinduni15@gmail.com, jorge.abarcagonzalez@ucr.ac.cr

² Georgia State University, 739 Langdale Hall, Atlanta, Ga 30303, EE.UU.
paulojhidalgo@gmail.com

³ Red Ciudadana de Estaciones Meteorológicas, Calle Paniagua, San Rafael de Heredia, Heredia, Costa Rica.
jbrenes54@gmail.com

⁴ Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO, UNSa-CONICET), Av. 9 de Julio 14, A4405BBA Salta, Argentina.
geowbsalta@gmail.com

⁵ Universidad Técnica Nacional (UTN), Av. El Molino, Ruta Nacional 124, Villa Bonita de Alajuela, Alajuela, Costa Rica.
yalpizars@utn.ac.cr

⁶ Ministerio de Educación Pública, Av. 10, calle 6, Villa Bonita, San Ramón, Costa Rica.
karina.abarcagonzalez1@gmail.com

* Autor de correspondencia: melissa.sanchez.m18@gmail.com

RESUMEN. Este trabajo presenta un mapeo geológico exhaustivo de la región norte del volcán Rincón de la Vieja, junto con el levantamiento de secciones estratigráficas y la toma de muestras para radiocarbono, para actualizar sus últimos 35.000 años de actividad volcánica. Se identificó una secuencia de lahares antiguos, coladas de lava, corrientes de densidad piroclástica (CDPs) y depósitos de caída de tefra pliniana/sub-pliniana, con edades más antiguas que ~8.300 años AP, probablemente vinculados a los cráteres más occidentales. Desde ese periodo, una discordancia erosiva sugiere un intervalo significativo de inactividad explosiva que duró al menos 2.000 años. El último evento efusivo de importancia ocurrió a los ~5.300 años AP, el cual formó el campo de lavas El Gavilán. Una erupción pliniana particularmente importante, la cual generó un nivel piroclástico denominado Tefra Río Blanco, depositó pómez de caída al oeste y suroeste del volcán y CDPs hacia la ladera norte, extendiéndose por al menos 8,5 km. Este evento explosivo, el más grande de los últimos ~5.000 años, causó posiblemente modificaciones sustanciales en el cráter, incluyendo su destrucción y ampliación. Las edades radiométricas sugieren que el evento Río Blanco habría ocurrido hace 1605-1746 años cal. AP. Este estudio robustece la historia eruptiva del Pleistoceno Tardío-Holoceno del volcán Rincón de la Vieja, proporcionando información de utilidad para la evaluación de peligros volcánicos y gestión del riesgo.

Palabras clave: Pleistoceno Superior-Holoceno, Dataciones radiocarbono, Estratigrafía volcánica, Tefroestratigrafía.

ABSTRACT. New contributions into the chronostratigraphy of the Rincón de la Vieja volcano (Costa Rica) over the past 35,000 years. We present a comprehensive geological mapping of the northern sector of the Rincón de la Vieja volcano, which includes the surveying of stratigraphic sections and new radiocarbon sampling, to provide an updated understanding of its volcanic history over the past 35,000 years. This study identifies a sequence of ancient lahars, lava flows, pyroclastic density currents (PDCs), and Plinian/sub-Plinian tephra fall deposits, with ages older than ~8,300 years BP, possibly sourced from the westernmost craters. Since then, an erosive unconformity suggests a significant period of explosive inactivity lasting at least 2,000 years. The most recent effusive event of importance occurred at around 5,300 years BP, forming the Gavilán lava field. A particularly noteworthy Plinian eruption, resulting in the Río Blanco Tephra sequence, deposited pumice to the west and southwest of the volcano and PDCs on its northern flank, extending up to at least 8.5 km. This explosive event, the largest in the last ~5,000 years, likely caused substantial modifications to the crater area, including its destruction and enlargement. Radiometric age data suggest that the Río Blanco event occurred at around 1650-1746 cal yr BP. This study enhances the understanding of the Late Pleistocene-Holocene eruption history of Rincón de la Vieja, providing valuable insights for volcanic hazard assessment and risk management.

Keywords: Upper Pleistocene-Holocene, Radiocarbon dating, Volcano-stratigraphy, Tephrostratigraphy

1. Introducción

El volcán Rincón de la Vieja, localizado ~25 km al NNE de la ciudad de Liberia, Costa Rica, entre las provincias de Guanacaste y Alajuela (Fig. 1), es el único volcán históricamente activo en la cordillera de Guanacaste, la cual constituye un segmento del frente volcánico activo de América Central relacionado con la subducción de la placa del Coco (o de Cocos) bajo la placa del Caribe (Kempter *et al.*, 1996). Aunque numerosos estudios geológicos y estratigráficos generales se han realizado en la zona (*e.g.*, Kempter *et al.*, 1996; Soto *et al.*, 2003b; Aguilar y Alvarado, 2020; Báez *et al.*, 2024), aún persiste un vacío en la cartografía geológica de detalle, particularmente del flanco norte de este volcán, así como en las edades absolutas de los depósitos volcánicos más recientes. Mejorar la información geológica del flanco norte del volcán es fundamental, dado que ese sector ha sido el más afectado por erupciones tanto prehistóricas como históricas, además de que durante las últimas décadas se ha producido un importante desarrollo turístico y agropecuario (*e.g.*, Soto *et al.*, 2003b; Alvarado *et al.*, 2019a,b; Alpízar, 2018; Alvarado *et al.*, 2022).

El presente estudio nace de la necesidad de contar con un mejor control geológico y una cronología eruptiva más precisa del volcán Rincón de la Vieja con la finalidad de actualizar la amenaza volcánica. Para esto, se recolectaron siete nuevas muestras para dataciones por radiocarbono, priorizando aquellas que permitieran acotar la edad de los eventos eruptivos más relevantes. Dichas dataciones complementan el cuadro cronoestratigráfico de los eventos eruptivos más importantes identificados para este volcán por Aguilar y Alvarado (2020).

2. Marco geológico y geográfico general

El volcán Rincón de la Vieja se ubica en la cordillera volcánica de Guanacaste, en el extremo noroeste de Costa Rica, junto a los volcanes Orosí-Cacao, Miravalles-Zapote y Tenorio-Montezuma (Fig. 1). Es el único volcán activo de la cordillera de Guanacaste, además de corresponder al volcán de mayor área y volumen de entre los volcanes de la región. Dicho volcán posee registros eruptivos desde la Colonia (~1575 EC), y cada cierto tiempo genera erupciones y lahares calientes que alarman a la población y pone en alerta a las autoridades, particularmente en su flanco norte (Alvarado, 2021; Alvarado *et al.*, 2022).

Desde el siglo XX se conoce que el volcán posee estructuras caldéricas antiguas y domos en su flanco occidental, además de numerosos conos y cráteres en su cumbre, los cuales albergan importantes reservorios geotérmicos (Healy, 1969; Kempter *et al.*, 1996; Kempter, 1997; Soto *et al.*, 2003a, b; Zamora *et al.*, 2004; Alvarado y Gans, 2012; Molina *et al.*, 2014), incluyendo las centrales geotérmicas Pailas I y II (96,6 MW de producción de energía eléctrica), así como la central geotérmica Borinquen (en construcción) (Alvarado *et al.*, 2022). El complejo volcánico moderno se formó posterior a múltiples colapsos de la caldera Alcántaro (también llamada caldera Guachipelín-Cañas Dulces), cuya edad de formación se estima entre 1,78 y 1,4 Ma (Alvarado y Gans, 2012).

El Rincón de la Vieja posee tres cuartas partes de sus flancos cubiertas por bosque tropical muy denso (Kempter *et al.*, 1996), lo que dificulta enormemente la obtención de información geológica de campo.

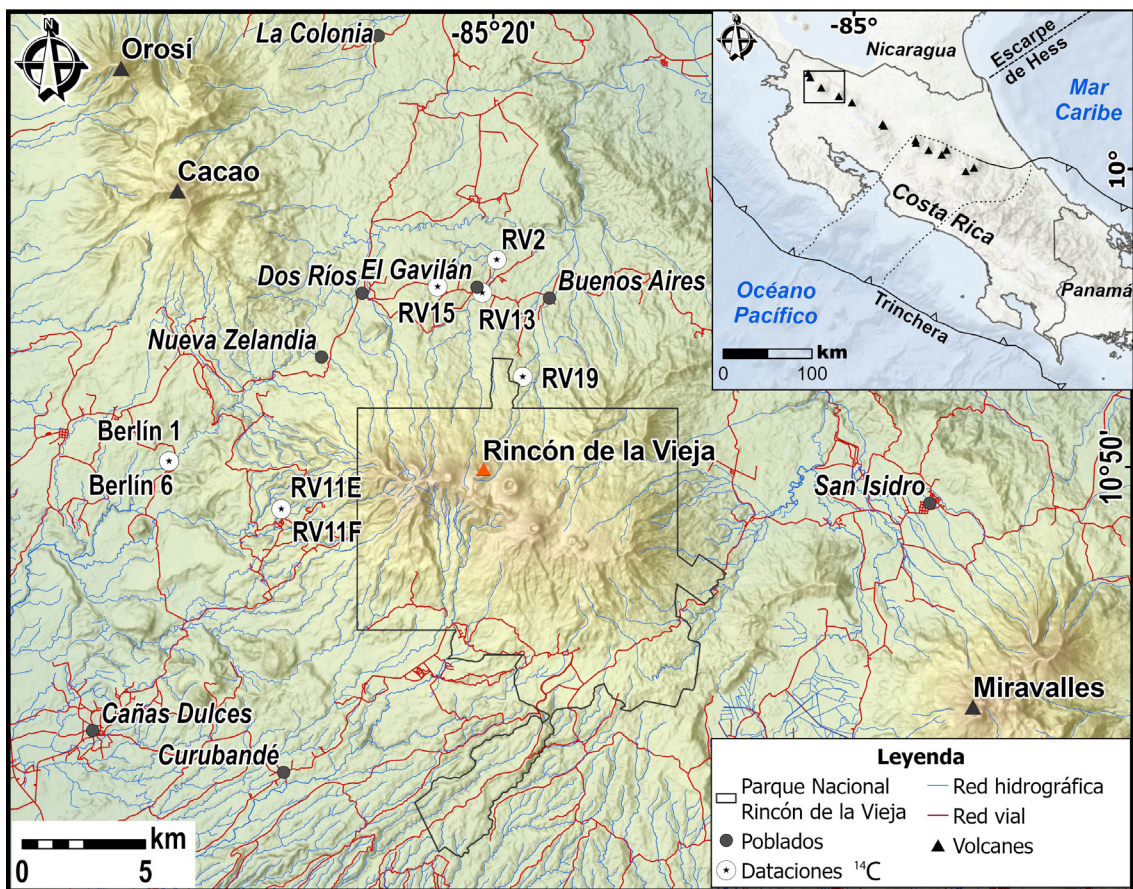


FIG. 1. Mapa de ubicación del área de estudio y localización de las muestras datadas por radiocarbono. El polígono inserto en el volcán delimita el Parque Nacional Rincón de la Vieja. Los nombres de los poblados se muestran en cursiva para diferenciarlos de los volcanes y los sitios de dataciones radiométricas.

La evidencia recopilada a la fecha en el flanco norte del volcán ha permitido reconocer coladas de lava de edad desconocida hasta el presente estudio, aunque morfológicamente muy recientes, así como depósitos de CDPs de posible edad holocena. La actividad eruptiva histórica incluye erupciones vulcanianas y depósitos de lahares calientes, los que suelen emitir vapor durante su transporte, pero cuya temperatura no se ha logrado medir en el momento (Soto *et al.*, 2003b).

2.1. Materiales y Metodología

La literatura consultada con respecto al origen y geología del volcán Rincón de la Vieja se basó, principalmente, en Kempter (1997), Soto *et al.*, (2003b), Bakkar (2017), Alpizar (2018), Aguilar y

Alvarado (2020), y Alvarado (2021). En paralelo, se confeccionó un mapa topográfico según información proporcionada por el SNIT (Sistema Nacional de Información Territorial) usando como base un modelo de elevación digital de alta resolución (curvas de nivel cada 10 m) extraído desde el sitio web <https://earthexplorer.usgs.gov/>. El procesamiento de esta información digital se hizo mediante sistemas de información geográfica de código abierto (ILWIS, 2016; QGIS.org, 2018) y permitió generar modelos de elevación digital actualizados empleando el sistema de coordenadas CRTM05. Además de estos mapas topográficos digitales, se consideraron también mapas de relieve contruidos, mapas de sombras e imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Google Earth. Esto, en su conjunto, permitió la obtención de parámetros morfométricos de los conos eruptivos

(cf. Aguilera *et al.*, 2022 y referencias allí citadas).

La identificación de geoformas, patrones de drenajes y el análisis de pendientes se realizó mediante fotografías aéreas del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica e imágenes oblicuas tomadas por los autores durante los trabajos de campo realizados en los meses de septiembre-octubre de 2021 y marzo de 2022. Las visitas de campo fueron realizadas para crear un mapa geológico del volcán. Las columnas estratigráficas fueron levantadas en el flanco norte del volcán, desde los poblados de Nueva Zelandia a Buenos Aires, a lo largo de senderos, caminos y cauces fluviales. Las descripciones estratigráficas se enfocaron particularmente en el intervalo Pleistoceno Superior-Holoceno. Se seleccionaron localidades de muestreo para dataciones de radiocarbono, en especial de aquellas unidades con desarrollo de paleosuelos o presencia de madera (carbonizada o no) dentro de los depósitos (Fig. 1). En su conjunto, se recolectaron siete muestras (Fig. 1; Tabla 1). Esta información cronoestratigráfica se complementó con nuevas secciones geológicas que quedaron expuestas en la plataforma de perforación geotérmica PLB-05, ubicada en el flanco oeste del volcán.

Las dataciones radiométricas fueron realizadas en los laboratorios de la empresa International Chemical Analysis Inc., mediante espectrometría de masas con aceleradores (AMS) según el procedimiento de Bronk (2008). Las edades radiométricas fueron calibradas por los autores a años calendario usando la curva de calibración INTCAL20 (Reimer *et al.*, 2020). Cada edad se reporta en el presente estudio mediante el 95% de sus intervalos de confianza

3. Nuevos aportes radiométricos hacia la historia volcanológica del Rincón de la Vieja

3.1. Mapeo geológico y geomorfológico

El levantamiento geológico realizado en este estudio permitió conocer con mayor precisión la distribución y la edad de los principales depósitos volcánicos. Al combinar esta nueva información con evidencia geomorfológica y dataciones radiométricas ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; ^{14}C) reportadas en la literatura (Kempter *et al.*, 1996; Soto *et al.*, 2003a; Alvarado y Gans, 2012; Aguilar y Alvarado, 2020), se definieron tres unidades geológicas principales: Proto-Rincón, Paleo-Rincón y Neo-Rincón (Figs. 2 y 3). La columna

estratigráfica idealizada se muestra en la figura 4 y los parámetros morfométricos de los conos eruptivos se resumen en la tabla 1.

Los depósitos volcánicos asociados a la unidad Proto-Rincón presentan una mayor disecación por ríos y un importante desarrollo de suelo, mientras que aquellos de la unidad Neo-Rincón poseen geoformas mejor preservadas y rasgos menos pronunciados de erosión fluvial, con los depósitos de la unidad Paleo-Rincón presentando características intermedias entre ambos. Estas tres unidades son prácticamente indistinguibles en aspectos petrográficos y geoquímicos.

En los depósitos de la unidad Neo-Rincón sobresale un nivel estratigráfico guía que corresponde a un depósito piroclástico denominado Tefra Río Blanco (Kempter *et al.*, 1996) o Tefra Quebrada Grande (Melson, 1988¹). Este depósito se extiende al oeste y suroeste del cráter activo del volcán y está compuesto por varios subniveles de pómez blanquecinas, algunas escorias y pómez bandeadas. Las pómez son de composición dacítica mientras que las escorias son andesíticas (Soto *et al.*, 2003b). Se presentan también depósitos de CDPs hacia la ladera norte, extendiéndose por al menos 8,5 km, constituidos por pómez, escorias y bloques juveniles con mala selección e incipiente gradación inversa, tan solo cubiertos por depósitos de lahares recientes (Báez *et al.*, 2024). Soto *et al.* (2003b) notaron una similitud geoquímica y petrográfica entre las pómez del depósito de CDP y aquellas del depósito de caída, no así entre las escorias de ambos depósitos, por lo que descartaron que fueran eventos coetáneos. Esta interpretación fue cuestionada por Aguilar y Alvarado (2020) y por Báez *et al.* (2024), quienes mediante el estudio de elementos traza concluyeron que corresponderían a depósitos contemporáneos y, muy posiblemente, comagmáticos.

3.2. Dataciones por radiocarbono

Hasta el año 2017, existían solamente cuatro dataciones de radiocarbono en el volcán Rincón de la Vieja (Melson *et al.*, 1986; Melson, 1988; Kempter *et al.*, 1996; Soto *et al.* 2003a, b). El informe interno de Alvarado *et al.* (2018), publicado formalmente como Aguilar y Alvarado (2020), duplicó el número de edades radiocarbono disponibles y refinó la cronoestratigrafía de los últimos ca. 20.000 años AP del

¹ Melson, W.G. 1988. Major explosive eruptions of Costa Rica volcanoes. Update for Costa Rica Volcanism Workshop (Unpublished). Smithsonian Institute. Washington.

TABLA 1. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LOS CONOS Y CRÁTERES DEL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA (VER FIG. 2).

Número	Nombre	Altitud (m s. n. m.)	Altura (m)	Pendiente cono	Dimensiones del cráter (m)	Otras observaciones
1	Cráter Colapsado	1.600	~40	10°	325	Cráter muy erosionado y mal preservado.
2	Cráter Doble	1.810	60	20°	750x900	Cráter muy erosionado y medianamente preservado.
3	Cono Von Seebach	1.895	285	20°-33° (>40° en escarpes)	275x400	Cono bien desarrollado y poco profundo.
4	Cráter Activo RV	1.745	260	20°-30°	400x600 (presenta un cráter interno de 335 x 412)	Cráter complejo. Presenta un lago cratérico caliente e hiperácido de dimensiones 275x300 m.
5	Cráter Inactivo RV	1.806	>250	20°-30°	500x575	Cráter complejo. Presenta un lago cratérico a temperatura ambiente de dimensiones 90x110 m y un posible domo intracratérico de pequeñas dimensiones.
6	Cráter Sensoria	1.560	~10	~10°	80	Cráter parásito. Presenta un lago cratérico a temperatura ambiente de dimensiones 30x40 m.
7	Volcán Santa María	1.916	>400	20-33°	330x390	Presenta un lago cratérico frío de dimensiones 240x250 m.
8*	Cono Triple 1	1.645	120	20°	210	Cono bien preservado.
9*	Cono Triple 2	1.615	-	20°	170	Cono con cráter abierto.
10*	Cono Triple 3	1.672	160	25°	175	Cono con cráter.
11*	Cono Relicto E	1.780	230	20°-30°	250	Posible cono con cráter abierto al nor-noreste.
12*	Cono Relicto W	1.778	230	20°-30°	300	Posible cono con cráter abierto al noreste.

* Conos definidos en este trabajo.

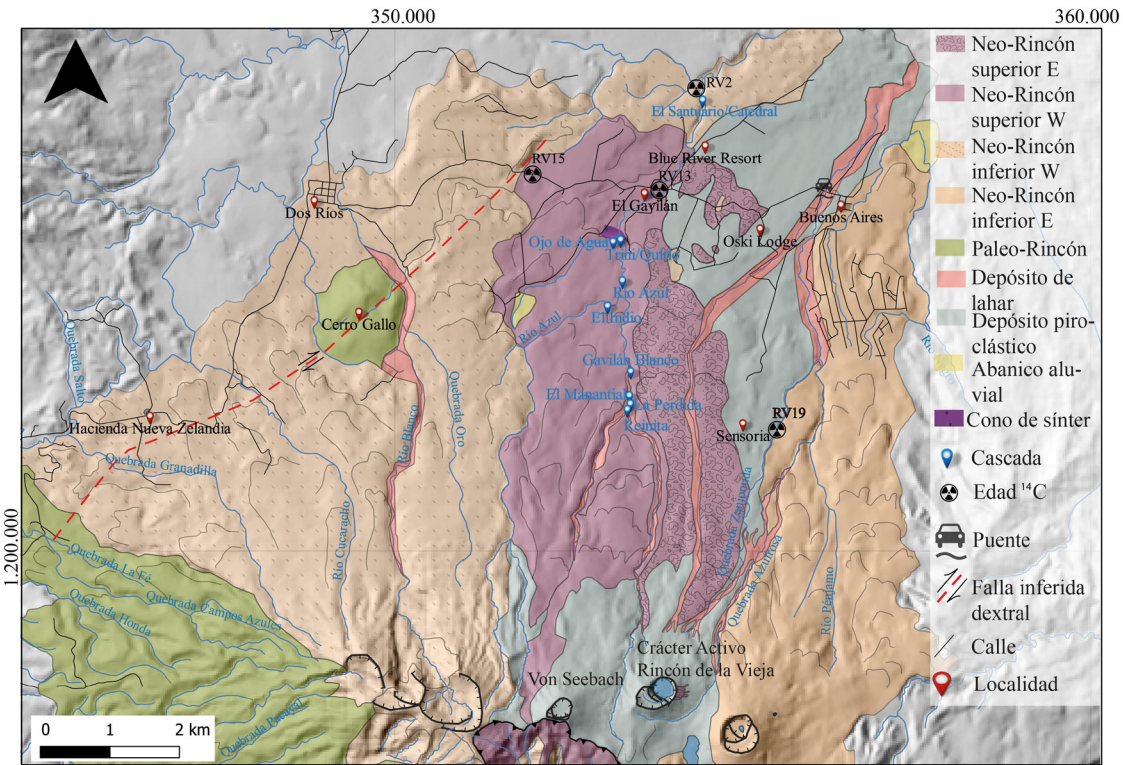


FIG. 3. Mapa geológico del complejo volcánico Rincón de la Vieja, detalle flanco norte. Ver figura 2 para mapa general. Proyección CRTM05.

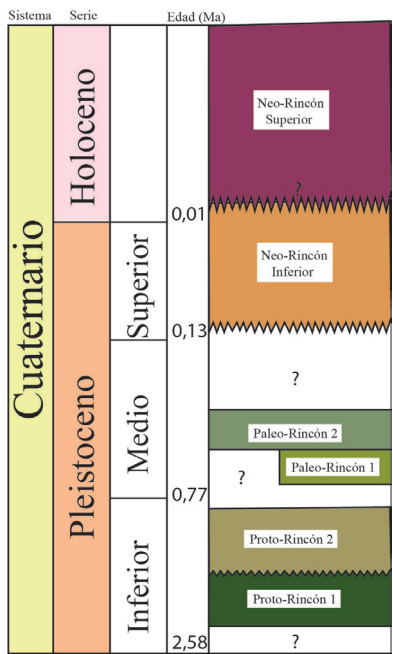


FIG. 4. Columna estratigráfica generalizada del Rincón de la Vieja (Alvarado *et al.*, 2022; este trabajo).

TABLA 2. NUEVAS EDADES RADIOCARBONO ASOCIADAS A DEPÓSITOS VOLCÁNICOS DEL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA.

Número de muestra	Material	Edad convencional (años ¹⁴ C AP)	Edad calibrada (años AP, intervalo de confianza)	Latitud/ Longitud	Detalle sitio/ubicación
RV19*	Tronco carbonizado	1.900±30	1.890-1.720	10.866°/-85.322°	Depósito de PDC con presencia de troncos carbonizados.
RV15 (14C-6315)	Paleosuelo	4.670±30	5.470-5.320	10.898°/-85.354°	Paleosuelo desarrollado bajo una de las coladas de bloques del campo de lavas El Gavilán.
RV11F (14C-6316)	Paleosuelo	6.780±30	7.670-7.580	10.817°/-85.411°	Paleosuelo desarrollado bajo un nivel piroclástico de caída pumícea en la plataforma geotérmica PLB-05.
RV11E (14C-6313)	Paleosuelo	7.560±30	8.415-8.330	10.817°/-85.411°	Paleosuelo desarrollado sobre una discordancia erosiva en la plataforma geotérmica PLB-05.
RV13 (14C-6314)	Paleosuelo	8.830±40	10.140-9.700	10.896°/-85.337°	Paleosuelo desarrollado sobre la cobertura brechosa de una colada de lava en el puente sobre el Río Azul.
Berlín 6	Tronco carbonizado	30.050±40	34.630-34.300	10.834°/-85.453°	Depósito de lahar en la quebrada Berlín, con abundante presencia de troncos carbonizados, algunos como moldes.
Berlín 1	Tronco carbonizado	30.870±100	35.500-34.810	10.834°/-85.453°	Depósito de lahar en la quebrada Berlín, con abundante presencia de troncos carbonizados.
RV2 (14C-1611)	Tronco	>42.000	-	10.908°/-85.332°	Depósito de lahar que subyace a coladas de lava en la cascada El Santuario o Catedral.

Las edades se reportan como años ¹⁴C AP y años calibrados AP, esto último mediante la curva INTCAL20 (Reimer *et al.*, 2020) para un intervalo de confianza del 95%. Edades previas disponibles en Aguilar y Alvarado (2020).
*Edad reportada en Báez *et al.* (2024).

de diámetro inmersos en una matriz arenoso-arcillosa. En estos niveles sobresalen troncos de dimensiones centimétricas a decimétricas bajo la forma de madera carbonizada, algunos como moldes, que constituyen un >5% del depósito (muestra Berlín 6: 34.630-34.300 años cal. AP; Tabla 2). Combinadas, estas edades sugieren eventos volcánicos sucesivos entre los 35,5 y los 34,3 ka cal. AP.

Las características estratigráficas y sedimentológicas de los depósitos de lahares de la quebrada Berlín son indicativas de lahares sineruptivos. Aunque la quebrada Berlín nace en el flanco sur del volcán Cacao, un volcán dormido y posiblemente extinto (Alvarado, 2021), la sección estratigráfica estudiada en este trabajo se ubica ~150 m aguas arriba de la confluencia entre la quebrada Berlín con el río Ahogados.

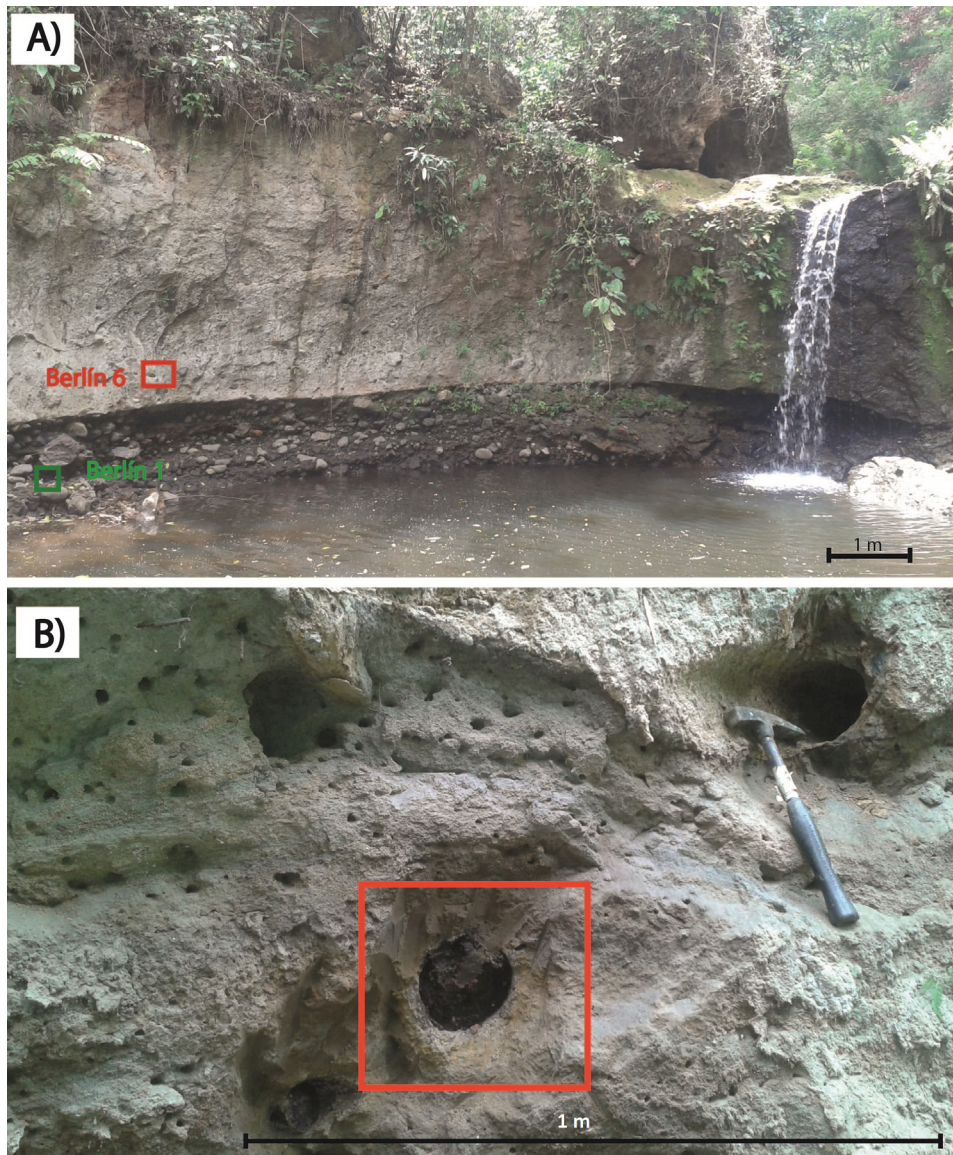


FIG. 5. Depósitos de lahares en la quebrada Berlín. **A.** Depósito lahárico de granulometría gruesa con imbricación, sobre el cual se observan una serie de niveles lahárlicos cohesivos. **B.** Detalle de uno de los niveles lahárlicos, donde en el recuadro rojo se muestra un tronco carbonizado mientras que la piqueta geológica señala un molde de un tronco. Los rectángulos en A indican las ubicaciones de las muestras Berlín 1 y Berlín 6, las que fueron datadas en este trabajo mediante radiocarbono (ver texto y Tabla 2 para más detalles).

El río Ahogados es un drenaje importante en la zona, el cual posee varios afluentes alimentadores provenientes del volcán Cacao y del flanco occidental del Rincón de la Vieja. Dado que la localidad en donde se tomaron las muestras es un sector de morfología plana, dominado por depósitos aluviales, puede que parte del trazado del río Ahogados hubiese tenido una

configuración, durante el Pleistoceno Superior alto, diferente a la actual. En ese caso, el corte realizado por la quebrada Berlín estaría exponiendo depósitos antiguos del río Ahogados.

Hasta este trabajo, el depósito volcánico más antiguo del Rincón de la Vieja datado mediante radiocarbono era un nivel de tefra con espesores entre

1 y >20 m en los alrededores del cono Von Seebach. Este depósito fue datado en 27.000 ± 560 años ^{14}C , edad que fue posteriormente calibrada a *ca.* 31 ka AP por Aguilar y Alvarado (2020). Esta edad calibrada es cercana al rango de edades de los depósitos laháricos de la quebrada Berlín, por lo que ambos depósitos, dentro de las incertidumbres de sus edades, podrían ser coetáneos. Se interpreta, por ende, actividad volcánica explosiva de importancia para el lapso ~35-31 ka cal. AP, muy posiblemente asociada con los focos eruptivos más occidentales (Tabla 1).

Hacia el flanco norte del Rincón de la Vieja se observan una serie de coladas de lava de diferente espesor, las cuales crean numerosos saltos topográficos y

forman múltiples cascadas. En el río Azul, por ejemplo, un depósito de lahar antiguo, el cual subyace a una de estas coladas, aflora cerca de la cascada denominada El Santuario o Catedral, desde donde se extrajo una muestra de un tronco cuya edad por radiocarbono dio superior a 42.000 años ^{14}C (muestra RV2; Figs. 3 y 6; Tabla 2). Cerca de allí, en el puente sobre el río Azul, a ~1 km de distancia, se dató un paleosuelo que sobreyace a una colada de lava en 10.140-9.700 años cal. AP (muestra RV13; Figs. 3 y 7; Tabla 2). En caso de que las coladas de lava descritas en la cascada El Santuario y en el puente sobre el río Azul sean de edad similar, ambas se habrían emplazado entre fines del Pleistoceno y el Holoceno temprano.

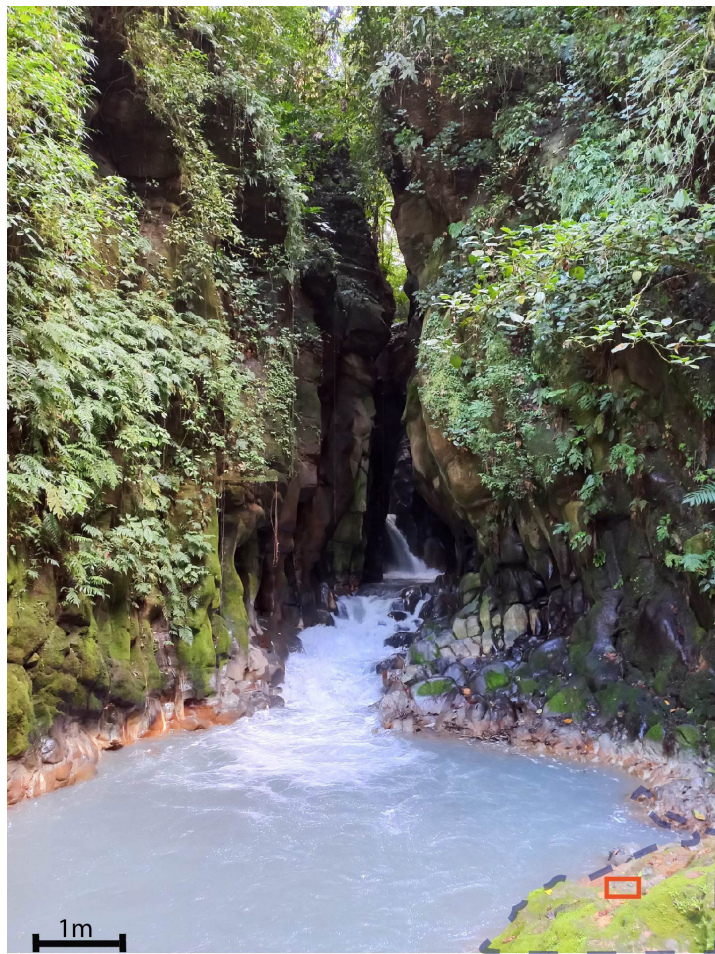


FIG. 6. Colada de lava en el sector de la cascada El Santuario o Catedral. Se observan parcialmente estructuras de diaclasamiento prismático (disyunción columnar). La colada sobreyace a un depósito de lahar (delimitado con un borde segmentado en la esquina inferior derecha) datado mediante radiocarbono en >42.000 años ^{14}C . El rectángulo rojo indica el lugar desde donde se extrajo la muestra RV2 (ver texto y tabla 2 para más detalles).

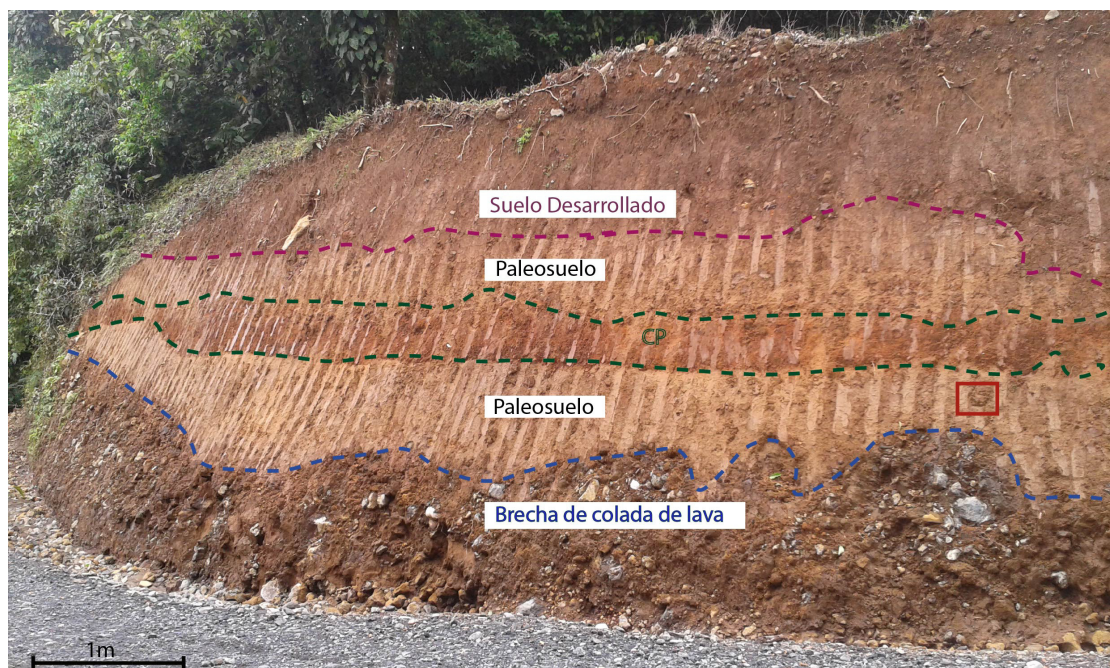


FIG. 7. Afloramiento cerca del puente sobre el río Azul. En la parte inferior se observa parte de la superficie brechosa de una colada de lava (delimitada mediante una línea azul discontinua). Sobre esta superficie se desarrollaron niveles de paleosuelos con intercalaciones de capas pumiceas meteorizadas (líneas discontinuas de color verde y rosa). Por encima de la superficie brechosa, en el nivel más inferior de los paleosuelos, se obtuvo una edad radiocarbono calibrada de 10.140-9.700 años AP (muestra RV13; ver texto y tabla 2 para más detalles).

Hacia el flanco oeste del Rincón de la Vieja, las labores de excavación de la plataforma geotérmica PLB-05 del proyecto Geotérmico Borinquen I han expuesto una nueva sección estratigráfica (Fig. 8). En este sector se observan, de base a techo, un depósito de flujo de cenizas antiguo y dos depósitos piroclásticos de caída pliniana de color anaranjado. Un suelo desarrollado sobre una marcada discordancia erosiva se dató en 8.415-8.330 años cal. AP (muestra RV11E; Tabla 2). Este suelo, no obstante, es más antiguo que el suelo que subyace uno de los niveles de caída plinianos (ubicados estratigráficamente por debajo de la discordancia erosiva), el cual se dató en 7.670-7.580 años cal. AP (muestra RV11F; Tabla 2), aunque es probable que el suelo que subyace a este nivel de pómez esté contaminado con materia orgánica. Por encima de esta discordancia erosiva se presentan niveles piroclásticos del volcán Rincón de la Vieja, cuyo depósito más antiguo fue datado por Aguilar y Alvarado (2020) en ~5.600 años cal. AP. Esta discordancia representa un lapso de inactividad explosiva de al menos 2.000 años.

Por otro lado, en los flancos del volcán afloran capas de pómez con buena selección, aunque fuertemente meteorizadas, por lo que poseen una marcada tonalidad anaranjada. Estas capas afloran en reducidos sectores, como por ejemplo en Nueva Zelandia y Gavilán, así como en la plataforma geotérmica PLB-05, están separadas por paleosuelos bien desarrollados y se interpretan como depósitos piroclásticos de caída de posible origen subpliniano o pliniano. Las edades radiocarbono calibradas reportadas en este trabajo (muestras RV13 y RV11F; Tabla 2), sugieren la ocurrencia de actividad explosiva importante entre los 10.140 y 7.580 años cal. AP.

En el flanco norte del volcán, en tanto, destaca un campo de coladas de lava brechosas y de bloques, de morfología fresca, buen desarrollo de levees y frentes bien definidos, denominado campo de lavas El Gavilán (Fig. 9). Dado que presenta una delgada (<decimétrica) cobertura de suelo con presencia de material piroclástico y materia orgánica, se ha sugerido que sería producto de uno de los eventos efusivos más recientes del volcán Rincón de la Vieja

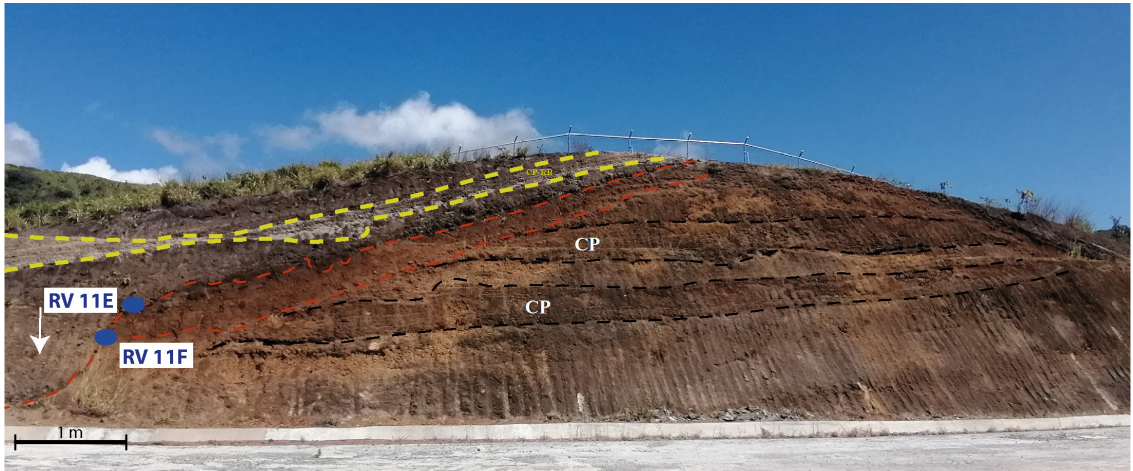


FIG. 8. Afloramiento cerca de la plataforma geotérmica PLB-05. La base de esta sección corresponde a un posible depósito de CDP antiguo, sobre el cual se presentan dos niveles piroclásticos de caída pliniana (CP; líneas segmentadas de color negro) separadas por un paleosuelo. Un suelo debajo de unos de los niveles de caída se dató mediante radiocarbono en 8.415-8.330 años cal. AP (muestra RV11E; ver texto y tabla 2 para más detalles), aunque sección abajo se obtuvo una edad radiocarbono más joven, de 7.670-7.580 años cal. AP (muestra RV11F; ver texto y Tabla 2 para más detalles), en un suelo desarrollado sobre una discordancia erosiva (líneas segmentadas de color rojo). Por encima de esta sección se emplazaron depósitos volcánicos del Rincón de la Vieja, de edades ≤ 5.600 años cal. AP (edad reportada y calibrada por Aguilar y Alvarado, 2020).



FIG. 9. Campo de lavas El Gavilán. Estructura en bloques de los afloramientos. Un paleosuelo debajo de una de estas coladas entregó una edad radiocarbono de 5.470-5.320 años cal. AP (muestra RV15; ver texto y tabla 2 para más detalles).

(Soto *et al.*, 2003b). Soto *et al.* (2003b) argumentaron como posible centro de emisión al cráter Von Seebach, por lo que estas coladas habrían alcanzado distancias máximas entre 3 y 8.5 km. Dada su importancia, en este presente trabajo se recolectó una muestra de paleosuelo por debajo de una de estas coladas, la cual se dató en 5.470-5.320 años cal. AP (muestra RV15; Figs. 3 y 9; Tabla 2), edad similar a la estimada por Soto *et al.* (2003b). Esta es la primera edad radiocarbono reportada para este campo de lavas.

En lo referente a los depósitos piroclásticos Río Blanco (ver capítulo Mapeo Geológico y Geomorfológico), las edades radiocarbono reportadas por Hernández (2018², 2024) y Aguilar y Alvarado (2020) en paleosuelos bajo y sobre el depósito de caída piroclástica permitieron restringir la edad de este evento entre 1.825 y 630 años cal. AP. Si se aplica el método de ponderación explicado en Long y Rippeteau (1974) para las edades obtenidas

en un depósito de CDP de la misma erupción (1600 ± 60 años AP según Soto *et al.*, 2003a, b y 1900 ± 30 años AP según Báez *et al.*, 2024) (Fig. 10), se obtiene una edad media de 1800 ± 27 años AP, la cual calibrada da 1746-1605 años cal. AP, por lo que este evento debió ocurrir hacia el año ~ 275 EC.

Al integrar la información de campo y las nuevas edades radiométricas, es posible confeccionar las siguientes columnas estratigráficas (Fig. 11).

4. Discusión y Conclusiones

Las edades radiocarbono disponibles en la zona de estudio, si bien son muy útiles, son aún insuficientes si se toma en consideración que el Rincón de la Vieja es el volcán más grande y el único con actividad histórica confirmada dentro en la cordillera de Guanacaste. Las erupciones de este



FIG. 10. Depósito de CDP asociado con el evento piroclástico Río Blanco, en la quebrada Zanjonuda, en Sensoria. Un tronco carbonizado dentro de este depósito entregó una edad radiocarbono de 1890-1720 años cal. AP, la cual fue posteriormente corregida a 1746-1605 años cal. AP (Báez *et al.*, 2024; ver texto y tabla 2 para más detalles).

² Hernández, A. 2018. Evaluación arqueológica en el proyecto geotérmico Borinquen I, vaporducto. Informe interno, ICE.

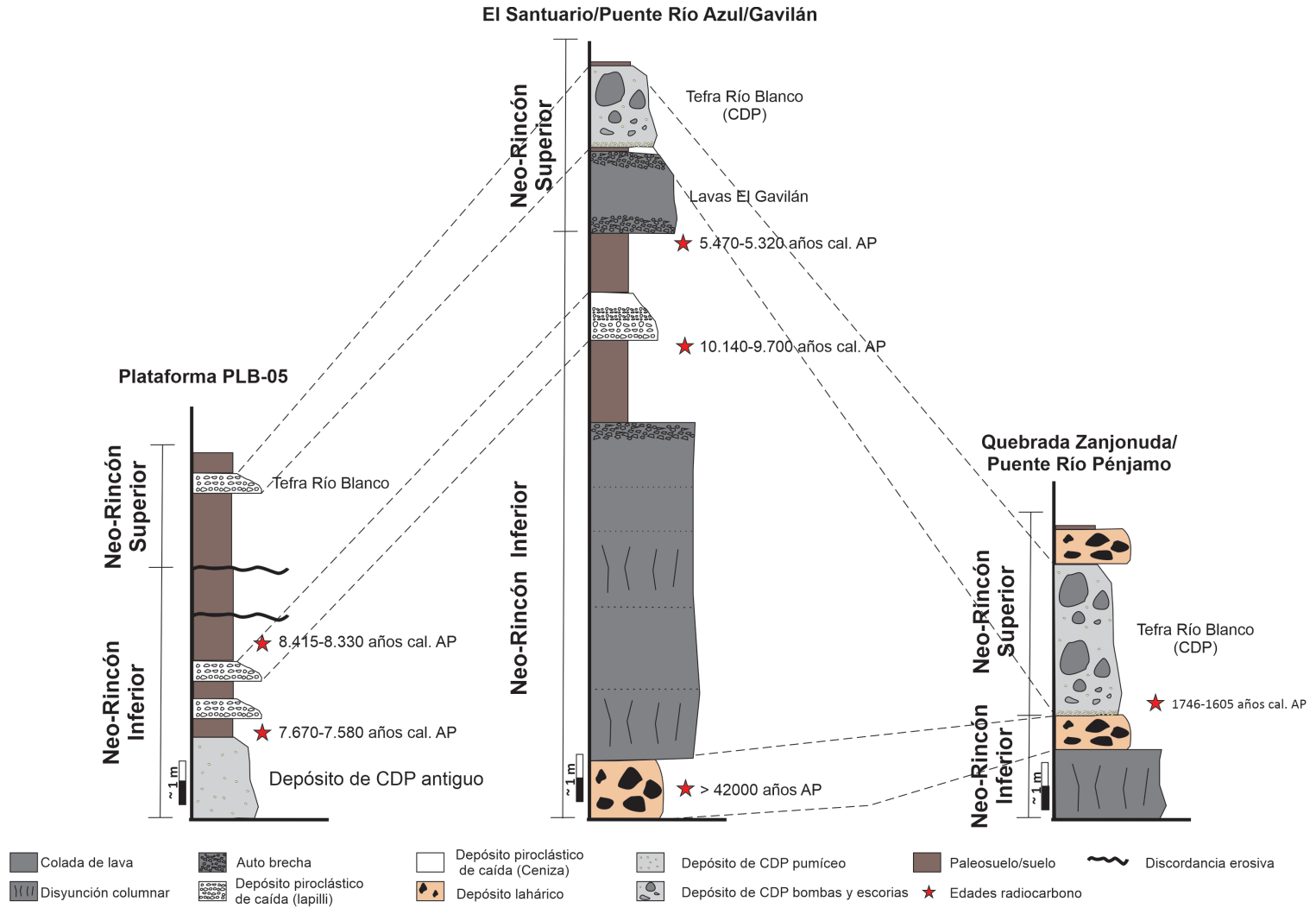


FIG. 11. Columnas estratigráficas compuestas donde se correlacionan los sitios Plataforma PLB-05 (flanco oeste del volcán), El Santuario/Puente Río Azul/Gavilán (flanco norte del volcán) y Quebrada Zanjonuda/Puente Río Pénjamo.

volcán, además, han provocado la destrucción de puentes, afectación a los cultivos y una merma en la actividad turística. El aporte cronoestratigráfico desarrollado durante el presente estudio permite mejorar el conocimiento de las unidades volcánicas del Pleistoceno Superior-Holoceno, lo cual es parte fundamental de los insumos requeridos para el desarrollo de estudios de peligrosidad volcánica. Aunque un análisis de peligrosidad volcánica está fuera de los alcances del presente estudio, esta fue integrada en extenso en el informe de Alvarado *et al.* (2022), el cual es de dominio público. La información provista en este estudio permite además establecer una historia geológica más completa, en particular de la unidad Neo-Rincón. Los aspectos estratigráficos más relevantes se resumen a continuación:

- a. Depósitos de lahares antiguos en el sector de El Santuario/Catedral (flanco norte del volcán) datados en 42.000 años ^{14}C AP. Estos depósitos, en conjunto con aquellos similares observados en la quebrada Berlín (flanco oeste del volcán), indican un periodo de intensa actividad volcánica entre ~35-31 ka cal. AP. Es posible que esta actividad haya estado concentrada hacia los cráteres más occidentales del volcán. Las edades radiocarbono obtenidas para estos depósitos son las más antiguas reportadas a la fecha para el volcán Rincón de la Vieja.
- b. Coladas de lavas que sobreyacen a los depósitos de lahares antiguos en el sector de El Santuario/Catedral. De acuerdo con una datación radiocarbono efectuada en un paleosuelo por encima de uno de estos flujos, estos tendrían edades >10 ka cal. AP.
- c. En el flanco oeste del volcán, se dató un paleosuelo desarrollado sobre una discordancia erosiva y un paleosuelo bajo un nivel piroclástico de caída pumícea. Las edades radiocarbono sugieren que esta discordancia debió generarse a los *ca.* 8,3 ka cal. AP, por lo que se sugiere que en ese periodo se habría producido una pausa importante en la actividad volcánica explosiva (al menos para eventos $\text{VEI} \geq 4$). Tentativamente, esta pausa habría durado al menos 2.000 años.
- d. En el flanco norte del volcán, se obtuvo una edad de ~5,3 ka cal. AP para el campo de lavas El Gavilán, la cual es la primera edad radiocarbono reportada para este evento.
- e. Existe un aumento notorio de la actividad volcánica a partir de los ~5,6 ka cal. AP, donde destaca el evento eruptivo Río Blanco, datado en torno a los 1746-1605 años cal. AP (~275 EC), el cual generó depósitos de caída piroclástica y de CDP. Es probable que esta erupción haya agrandado y profundizado el Cráter Activo RV, otorgándole su morfología actual. Los eventos explosivos posteriores generaron un anillo de piroclastos alrededor de este cráter, así como un lago cratérico hiperácido.
- f. El mapeo geológico y cronoestratigráfico realizado en el presente estudio confirma que la mayoría de los productos eruptivos primarios de edad holocena (coladas de lava, lahares y CDPs) se han direccionado hacia el sector norte del volcán. Esta observación constituye un insumo básico ante una potencial evaluación de peligrosidad volcánica.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la CNE, quien brindó la logística para el mapeo geomorfológico y geológico. Extensivo es el agradecimiento a la organización sin fines de lucro Ayuda en Acción Costa Rica, en particular a su representante T.M. Arcia y a la líder comunal R. Cascante. Ello permitió un valioso acercamiento con las comunidades de Dos Ríos, El Gavilán y Buenos Aires, quienes utilizarán los resultados que se viertan de la investigación hacia una mejor gestión del riesgo y un aprovechamiento geoturístico por parte de la Cámara de Turismo Rincón de la Vieja (CATURVI). Las entidades *Blue River Resort*, *Sensoria Land of Senses*, entre otras, por permitirnos visitar la geología presente en dichas propiedades privadas. El ICE también colaboró en los primeros años de investigación del Rincón de la Vieja. Se reconoce igualmente la participación de la Red Ciudadana de Estaciones Meteorológicas. W. Báez agradece al CONICET por el financiamiento para la realización de tareas de investigación en Costa Rica mediante el programa FEE-IA-2019.

Se agradece profundamente las acertadas observaciones y el tiempo brindado por los dos revisores, D. Pedrazzi y uno anónimo, así como al editor de la revista D. Bertin, quien también aportó su tiempo para revisar minuciosamente el presente trabajo. Sin duda, mejoraron sustancialmente el contenido del artículo y su modo de presentación.

Referencias

- Aguilar, I.L.; Alvarado, G.E. 2020. Las erupciones relevantes del Rincón de la Vieja en los últimos 6000 años basado en tefrocronostratigrafía sobre su flanco SW. *Revista Geológica de América Central* 63: 1-19. <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v63i0.43403>
- Aguilera, M.; Ureta, G.; Grosse, P.; Németh, K.; Aguilera, F.; Vilches, M. 2022. Geomorphological, morphometric, and spatial distribution analysis of the scoria cones in the Negros de Aras monogenetic volcanic field, northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 422: 107458. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107458>
- Alpizar, Y. 2018. Mapa preliminar de peligros volcánicos para el volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica: descripción de un escenario de afectación por lahares. Tesis de Maestría (Inédito), Universidad de Costa Rica: 160 p. San José.
- Alvarado, G.E. 2021. Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente. EUCR-EUNA-ETEC: 386 p. San José.
- Alvarado, G.E.; Gans, P.B. 2012. Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. *Revista Geológica de América Central* 46: 7-122. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i46.1836>
- Alvarado, G.E.; Aguilar, I. L.; Vargas, A. 2018. Evaluación de la amenaza volcánica del Rincón de la Vieja para el proyecto geotérmico Borinquen, Guanacaste. Área de Amenazas y Auscultación Sismológica y Volcánica, ICE [Inf. Interno].
- Alvarado, G.E.; Denyer, P.; Aguilar, T.; Chavarría, M.M.; Soto, G.J. 2019a. Mapa geológico de la hoja Cacao a escala 1:50.000. Editorial UCR. San José.
- Alvarado, G.E.; Denyer, P.; Montero, W.; Chavarría, M.M.; Solano, P. 2019b. Mapa geológico de la hoja Curubandé a escala 1:50,000. Editorial UCR. San José.
- Alvarado, G.E.; Brenes-André, J.; Venegas, L.; Alpizar, Y.; Núñez, S.; Sánchez, M.; Abarca, K.; Abarca, J.; Báez, W.A.; Sibaja, J.P.; Esquivel, L.; Arcia, T. 2022. Análisis del peligro volcánico del Rincón de la Vieja, Costa Rica. Informe interno ICE-CNE. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27064.21761>
- Báez, W.; Alvarado, G.E.; Sommer, C.A. 2024. Complex facies architecture of unusual pyroclastic density current deposits at the Rincón de la Vieja Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 447: 108030. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108030>
- Bakkar, H. 2017. Estudios de los procesos sísmicos y volcánicos en el Rincón de la Vieja, Costa Rica. Tesis de Licenciatura (Inédito), Universidad de Costa Rica: 152 p. San José.
- Bronk, C. 2008. Radiocarbon dating: revolutions in understanding. *Archaeometry* 50 (2): 249-275. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00394.x>
- Healy, J. 1969. Notas sobre los volcanes de la Sierra Volcánica de Guanacaste, Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional, Informe Semestral 15: 37-47.
- Hernández, A. 2024. Excavaciones arqueológicas en el macizo volcánico Rincón de la Vieja, Guanacaste, Costa Rica. *Revista Vínculos* 44 (1-2): 201-215.
- ILWIS. 2016. Integrated Land and Water Information System, Version 3.0. <https://un-spider.org/node/10914>
- Kempton, K.A. 1997. Geologic evolution of the Rincón de la Vieja Volcanic Complex, NW Costa Rica. PhD Thesis (Unpublished), University of Texas at Austin: 159 p. Texas, United States.
- Kempton, K.A.; Benner, S.G.; Williams, S.N. 1996. Rincón de la Vieja volcano, Guanacaste province, Costa Rica: geology of the southwestern flank and hazard implication. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 71 (2-4): 109-127. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00072-0)
- Long, A.; Rippeteau, B. 1974. Testing contemporaneity and averaging radiocarbon dates. *American Antiquity* 39 (2): 205-215. <https://doi.org/10.2307/279583>
- Melson, W.G.; Barquero, J.; Sáenz, R.; Fernández, E. 1986. Erupciones explosivas de importancia en Costa Rica (un reporte del progreso alcanzado). *Boletín de Vulcanología* 16: 15-20.
- Molina, F.; Martí, J.; Aguirre, G.; Vega, E.; Chavarría, L. 2014. Stratigraphy and structure of the Cañas Dulces caldera (Costa Rica). *Geological Society of America Bulletin* 126 (1-2): 1465-1480. <https://doi.org/10.1130/B31012.1>
- QGIS.org. 2018. Quantum Geographic Information System, Version 3.4. <https://qgis.org/>
- Reimer, P.J.; Austin, W.E.N.; Bard, E.; Bayliss, A.; Blackwell, P.G.; Ramsey, C.B.; Butzin, M.; Cheng, H.; Edwards, R.L.; Friedrich, M.; Grootes, P.M.; Guilderson, T.P.; Hajdas, I.; Heaton, T.J.; Hogg, A.G.; Hughen, K.A.; Kromer, B.; Manning, S.W.; Muscheler, R.; Palmer, J.G.; Pearson, C.; van der Plicht, J.; Reimer, R.W.; Richards, D.A.; Scott, E.M.; Southon, J.R.; Turney, C.S.M.; Wacker, L.; Adolphi, F.; Büntgen, U.; Capano, M.; Fahrni, S.M.; Fogtmann-Schulz, A.; Friedrich, R.; Köhler, P.; Kudsk, S.;

- Miyake, F.; Olsen, J.; Reinig, F.; Sakamoto, M.; Sookdeo, A.; Talamo, S. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon* 62 (4): 725-757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Soto, G.J.; Alvarado, G.E.; Goold, S.; Climent, A. 2003a. Evaluación del peligro y riesgo volcánico que representa el volcán Rincón de la Vieja para el proyecto geotérmico Las Pailas, Cordillera de Guanacaste, Costa Rica. Informe interno, ICE, Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, 78 p.
- Soto, G.J.; Alvarado, G.E.; Goold, S. 2003b. Erupciones <3800 a.P. del volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* 29: 67-86.
- Zamora, N.; Méndez, J.; Barahona, M.; Sjöbohm, L. 2004. Volcano-estratigrafía asociada al campo de domos de Cañas Dulces, Guanacaste, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* 30: 41-58.