

Las erupciones relevantes del Rincón de la Vieja en los últimos 6000 años basado en tefrocronoestratigrafía sobre su flanco SW

The relevant eruptions of Rincón de la Vieja in the last 6000 years based on tephrostratigraphy on his SW slope

Irene L. Aguilar¹ y Guillermo E. Alvarado^{2*}

¹Instituto Costarricense de Electricidad (RSN: ICE-UCR), Área de Amenazas y Auscultación Sismológica y Volcánica, Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (Osivam), Apdo. 10032-1000, Costa Rica

²Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo, Comisión, Apdo. 5258-1000

*Autor para contacto: galvaradoi@ice.go.cr

(Recibido: 15-02-2020; aceptado: 1-06-2020)

RESUMEN: El volcán Rincón de la Vieja es el único volcán de la cordillera de Guanacaste que ha presentado actividad histórica y es de los pocos en el mundo que posee un lago caliente y ácido en su cráter. El presente trabajo muestra nuevas dataciones radiométricas del Holoceno Medio al Holoceno Superior (últimos 6000 años), base fundamental para los estudios de amenaza volcánica. Los resultados muestran que su actividad prehistórica reciente ha sido mucho más violenta, con erupciones plinianas, subplinianas, vulcanianas y estrombolianas. Durante su corta actividad histórica (1700-2020), ha presentado eventos freatosurtseyanos y freatomagmáticos con caída de ceniza, balística, lluvia ácida y generación de lahars calientes y fríos, tanto sineruptivos como poseruptivos o secundarios. Los depósitos que afloran a 10 km al WSW del cráter activo están constituidos de capas de cenizas y pómez de caída y oleadas, algunas subplinianas (3650 a. C., 1130 a. C., 460 d. C., 1040 d. C., 1650 d. C.) y, dentro de ellas, la capa pliniana Río Blanco (460 d. C.), con una edad mucho más joven que lo que se maneja en la literatura. Se recalculó el volumen del depósito asociado con la erupción de río Blanco (pómez de caída pliniana y corrientes de densidad piroclástica) en 1,21 km³ y la altura de la columna eruptiva en 30 km con un VEI 5. Para los últimos 2 ka, los periodos de recurrencia de los grandes eventos eruptivos (VEI ≥ 4) podrían ser de unos 600 años, mientras que eventos menores (VEI 3) se podrían presentar antes de finalizar el presente siglo.

Palabras clave: Rincón de la Vieja; depósito pliniano Río Blanco; frecuencia eruptiva; Holoceno Medio; Holoceno Reciente; actividad histórica eruptiva.

ABSTRACT: The Rincón de la Vieja volcano the only volcano in the Guanacaste mountain range that has historical activity and is one of the few in the World that has a hot and acid lake in its crater. The present work shows new radiometric dates from the Middle Holocene to the Upper Holocene (last 6000 years), fundamental information for volcanic hazards studies. Its prehistoric activity was significantly more violent, with Plinian, Sub-Plinian, Vulcanian and Strombolian eruptions. During its historical activity (1700-2020), Rincón de la Vieja volcano has presented freatosurtseyan and phreatomagmatic events, with tefra fall, acid rain and generation of hot lahars. The deposits 10 km away from the active crater on the SSW flank are ash and pumice (Sub-Plinian and Plinian) and piroclastic surge deposits (3650 a. C., 1130 a. C., 460 A. D., 1040 A. D., 1650 A. D.) and, within them, the Plinian Río Blanco layer



(450 A. D.), was dated at a younger age than previously reported in the literature. The volume of the deposit associated with the eruption of Río Blanco (pumice fall and pyroclastic density currents deposits) has been recalculated to 1.21 km³, and the height of the eruptive column to 30 km with a VEI 5. For the last 2 ka, the periods of recurrence of large eruptive events (VEI \geq 4) could be about 600 years, while minor events (VEI 3) could occur before the end of this century.

Keywords: Rincon de la Vieja; Rio Blanco plinian deposit; eruptive frequency; Middle Holocene; Upper Holocene; historical eruptive activity.

INTRODUCCIÓN

El volcán Rincón de la Vieja es el único volcán históricamente activo de la cordillera de Guanacaste (1700 al 2020), con el edificio eruptivo volumétricamente más grande de (300 km²; 118 km³), el cual posee 9 cráteres en su cima, uno de ellos con actividad eruptiva histórica y prehistórica con un lago hiperácido en su interior (Tassi et al., 2005; Alvarado, 2009). En la ladera sur de este volcán afloran depósitos volcánicos primarios relacionados con el volcán Rincón de la Vieja (suelos de cenizas, caída piroclástica, corrientes de densidad piroclástica diluida), no todos ellos debidamente datados (Fig. 1). En este trabajo se aportan nuevas edades de los principales depósitos muestreados, afinando la cronoestratigrafía previamente propuesta (p. ej., Kempster, 1997; Kempster, Benner, y Williams, 1996; Soto, Alvarado, Goold y Climent, 2003a; Soto, Alvarado y Goold, 2003b) y aportando los posibles periodos de ocurrencia en función del índice de explosividad volcánica. Además, se redefinió la edad de la capa Río Blanco, la cual posee una edad significativamente más reciente que aquella establecida en la literatura e, incluso, dicho lapso se ha tomado como base para los estudios de peligro volcánico. La capa Río Blanco (Kempster et al., 1996), llamada también Tefra Quebrada Grande (Melson, 1988), constituye uno de los eventos explosivos más relevantes durante el Holoceno en la cordillera de Guanacaste, por lo que su cronología es fundamental, no solo para la historia del volcán, sino para la evaluación del peligro volcánico. También, se estableció su correlación temporal con las corrientes de densidad piroclástica presentes en el flanco norte del Rincón de la Vieja.

En concreto, el objetivo de la presente investigación es aportar un nuevo esquema tefrocronoestratigráfico de las erupciones relevantes que alcanzaron la parte media del volcán (flanco W y SW), así como discutir algunos aspectos de interés con respecto al periodo eruptivo histórico, base fundamental para mejorar los futuros estudios de los peligros volcánicos asociados y hacia una mejor planificación territorial y gestión del riesgo.

METODOLOGÍA

Mediante el estudio detallado de afloramientos al suroeste del volcán Rincón de la Vieja, en nuevos cortes realizados para las plataformas de pozos geotérmicos del proyecto Borinquen y en sus alrededores (caminos), así como algunos de los puntos de la literatura, se reconocieron tres capas de pómez subplinianas adicionales a la capa pliniana Río Blanco, estudiada por Kempster (1997) y Soto et al. (2003a), las cuales se encuentran sobre e infrayaciendo a la capa Río Blanco. Estas capas no habían sido aún reconocidas o adecuadamente descritas en la literatura. También, se complementó con más localidades los datos de espesores de la capa pliniana Río Blanco para una mejor evaluación de su extensión y volumen.

Hasta el año 2017, solo existían 4 dataciones de radiocarbono en el volcán Rincón de la Vieja, donde cada autor aportaba una edad: 1) Melson, Barquero, Sáenz y Fernández (1986), 2) Melson (1988), 3) Kempster et al. (1996) y, finalmente, 4) Soto et al. (2003b). El presente trabajo casi duplica el número de edades de radiocarbono.

Se recolectaron 7 muestras de suelos orgánicos (andisoles) para ser enviadas al laboratorio, *International Chemical Analysis Inc.* (ICA), en Estados Unidos, para analizar su edad mediante el método de radiocarbono ¹⁴C (Cuadro 1). En cada muestra se midió en su fracción orgánica la razón ¹⁴C/¹³C utilizando un acelerador de partículas. Las edades calibradas por el laboratorio son reportadas con base en la curva de radiocarbono *INTCAL 13* y *marino13* de 0 a 50 000 años antes del presente, 1950 d. C. y corregida por fraccionamiento del delta ¹³C (Reimer et al., 2013; Stuiver, Reimer y Reimer, 2020). Cuando se calibra una muestra de radiocarbono, se tiene un intervalo que puede ir del 68 % al 95 % de probabilidad dependiendo de si

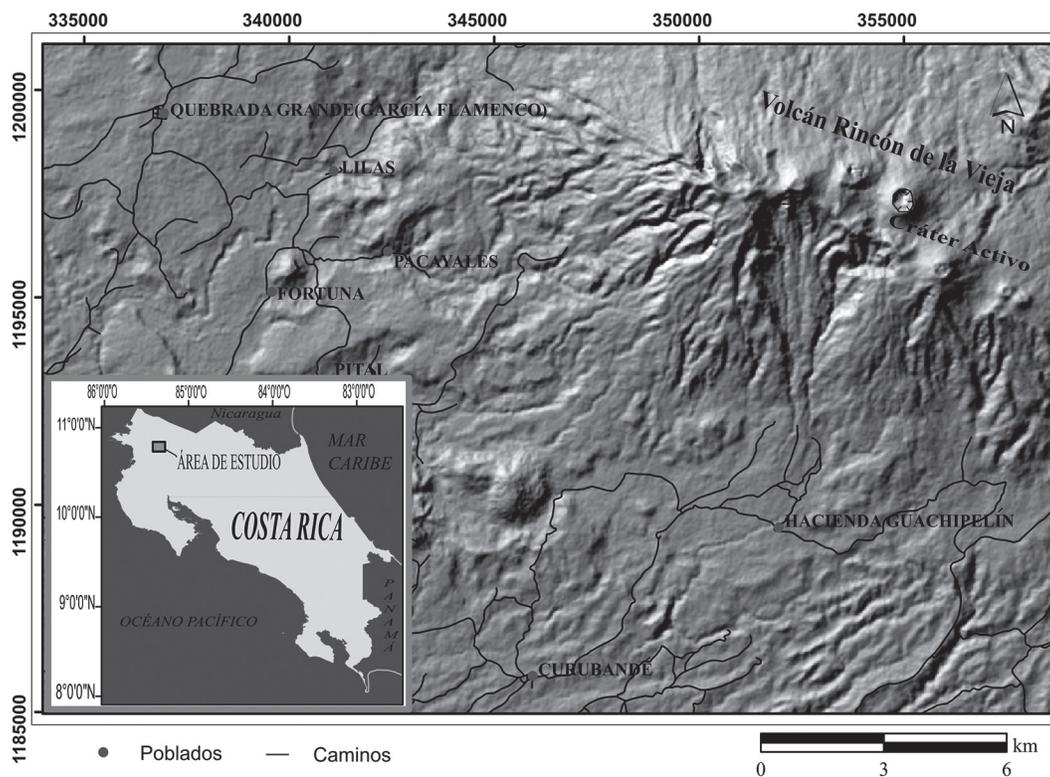


Fig. 1. Ubicación del área de estudio y el volcán Rincón de la Vieja, que se encuentra tanto en la provincia de Guanacaste como de Alajuela. El acceso es por el sector de Las Pailas, en el Área de Conservación Guanacaste, el cual se encuentra restringido en este momento debido a la actividad volcánica.

se escoge 1 sigma o 2 sigma, lo que quiere decir es que ese intervalo es el error que se puede graficar. Independientemente de eso, muchas veces se trabaja con la mediana. Al momento de la calibración de las edades para este trabajo, las nuevas bases de datos *IntCal20* y *MarineCal20* del 2020 aún no han sido publicadas, por lo que los laboratorios aún no están calibrando los datos con estas curvas. De igual forma, se esperaría que los cambios fueran menores al realizar la recalibración, dado que las nuevas curvas de calibración van a generar cambios de cierta importancia para edades del Pleistoceno Superior Tardío.

La designación *era común* (e. c., también como E. C.); a veces como *era vulgaris* (e. v.) y *antes de la era común* (a. e. c., A. E. C.) son usadas por algunos científicos y académicos laicos (agnósticos o ateos) o seguidores de alguna confesión, debido a su neutralidad, puesto que para algunos antes de Cristo (a. C.), después de Cristo (d. C.) o *Anno Domini* (d. C.), que significa "en el año de nuestro señor", poseen un matiz religioso. Sin embargo, dichas denominaciones a. C., d. C. y d. C. aún se sigue utilizando en los laboratorios de radiocarbono y en publicaciones científicas, por ello, acá se opta por el criterio tradicional, sin que necesariamente denote alguna tendencia religiosa particular de parte de los autores.

Con estas edades se limitó el tope y la base de los niveles volcánicos a modo de emparedado o sándwich estratigráfico. Ese método de las dataciones, aunque conocido en estratigrafía, pocas veces se había aplicado en tefroestratigrafía en Costa Rica por una limitante económica asociada al costo de las dataciones. Por lo general, se suele tomar la muestra de suelo inmediatamente por debajo de la capa piroclástica, a partir de la premisa que el evento eruptivo selló el desarrollo de suelo, pero teniendo claro, que el desarrollo del suelo puede tener un rango temporal amplio dependiendo de factores o condiciones del clima, relieve, organismos y el tipo de material parental que puede desarrollarse, entre en un tiempo de 45 a 400 años para completar el perfil del suelo (Arias, 2007). Claro está, cuando el evento eruptivo quemó madera y la incorporó (como es el caso de una corriente de densidad piroclástica o de una colada de lava), en ese caso casi se puede asumir que la edad del carbón es similar a la del evento volcánico. Adicionalmente, entre más antiguo sea el evento volcánico, menos relevante resulta para la amenaza volcánica a corto plazo, la imprecisión de los resultados. No obstante, cuando son eventos recientes, sí resulta relevante tener una mejor restricción o acotación cronológica.

Cuadro 1

Detalle de las muestras de radiocarbono del Rincón de la Vieja. En este trabajo se utilizarán las coordenadas CRTM-05 que son las oficiales para Costa Rica al momento de la publicación.

Código y referencia	Descripción de la muestra	Coordenadas CRTM05
RV-CH-D14	Suelo negro sobre PoRB2	1195012N/347957E
RV-CH-D6	Suelo negro debajo PoRB2 y sobre R.B.	1195012N/347957E
RV-CH-D7	Suelo sobre RB	1195583N/347689E
Melson et al., 1986	Lahar debajo estación Santa María.	1190311N/357505E
Melson, 1988	“Ámbar” en suelo bajo RB	1199468N/336461E
Soto et al., 2003b	Tronco carbonizado en la base del flujo piroclástico al N del volcán.	1278041N/281318E
RV-P9-D5	Suelo debajo de RB	1197642N/ 344173E
RV-P5-D13	Suelo negro sobre PrRB	1197694N/346336E
RV-P2-D8	Suelo negro debajo PrRB	1197694N/346336E
RV-P9-D1-2	Capa marrón bajo CDPd	1197642N/ 344173E
Tefra Unidad Grupo 2	Tefra Unidad Grupo 2 (Kempster et al., 1996)	Un kilómetro al SW del cráter Von Seebach

No se realizaron trabajos geoquímicos de los productos explosivos juveniles por no ser parte del planteamiento original del trabajo, quedando esto pendiente para otros investigadores. Por otro lado, la vegetación boscosa y de pastizales, así como los pocos cortes profundos de carreteras y la poca anuencia de los propietarios a dar permisos de acceso, impidieron un mejor detalle y correlación estratigráfica.

En el presente trabajo se complementó el mapa de isopacas de la capa Río Blanco con las medidas reportadas en la literatura por Kempster (1997) y Barahona et al. (2001). De ahí se escogieron los puntos que daban una lógica a las curvas de las isopacas, complementando los 54 puntos medidos en campos con los 24 de Kempster (1997) y los 25 de Barahona et al. (2001). Además, se designan las abreviaturas RB para la capa Río Blanco, PoRB1 para la capa posterior a Río Blanco, PoRB2 a la segunda capa posterior a Río Blanco y, finalmente, PrRB para el evento previo a Río Blanco, así como CDPd a la corriente de densidad piroclástica diluida.

También se debe aclarar que la topografía y acceso de algunos de los sitios visitados para el presente trabajo han cambiado debido al avance de obras constructivas y variantes en los permisos de acceso.

CARACTERÍSTICAS DEL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA

El macizo volcánico Rincón de la Vieja se localiza 25 km al NNE de la ciudad de Liberia, entre las provincias de Alajuela y Guanacaste. Cubre una extensión de 400 km² y posee un volumen de 118 km³; su base se empieza a levantar a partir de los 600 m s.n.m. en su flanco pacífico y 400 m s.n.m. en su flanco caribeño. Consta de 9 focos cratéricos cuspidales, todos en la provincia de Alajuela, que se alinean casi paralelos a la cordillera, edificados sobre un antiguo edificio volcánico a partir de una altitud de 1500 m s.n.m. en su extremo oriental y de 1700-1800 m s.n.m. en el extremo oriental. Las dataciones radiométricas más antiguas tienen edades entre 0,85 y 1,6 millones de años, las cuales fueron realizadas en rocas recolectadas en el flanco sur del volcán, en los sitios llamados Coyal, Lagunilla, Guanacastillo y en la cuesta Diablo, posiblemente se relacionan con un escudo basáltico. Sobre esta plataforma o escudo de lava creció el Rincón de la Vieja hace unos 564 000 años (Carr et al., 2007; Alvarado y Gans, 2012).

El cráter activo posee un lago termomineral (28,5-60 °C) hiperácido (pH de 0,20-1,16) con actividad fumarólica (Tassi et al., 2005). El color, volumen y temperatura del lago también varían con el tiempo, debido a los cambios en la composición química, aporte de agua y actividad eruptiva. Los períodos en los que la actividad fumarólica en el cráter Activo es baja, el lago muestra coloración turquesa y temperaturas relativamente bajas, mientras que cuando la actividad fumarólica o eruptiva es más vigorosa, el lago presenta coloración gris lechoso o turquesa lechoso, así como temperaturas más altas.

Los productos volcánicos recientes, de los últimos 30000 años del Rincón de la Vieja, son coladas de lava y rocas piroclásticas, de composición andesítica con escasas andesitas basálticas y dacitas, siendo las erupciones históricas freatosurtseyanas y surtseyanas de carácter andesítico (56,55-60,62 % vol. SiO₂). Las coladas de lava más antiguas son basaltos hasta dacitas (Carr, Craig y Bruce, 1986; Chiesa, Alvarado, Pecchio, Corella y Zanchi, 1994; Kempter et al., 1996; Alvarado y Gans, 2012).

Varios geólogos han realizado diversos estudios geológicos en los alrededores del volcán, entre los que se puede mencionar a Kempter et al. (1996), Kempter (1997), Soto et al. (2003a, b), Zamora, Méndez, Barahona y Sjobohm (2004), Chavarría, Hakanson y Mora (2007), Soto (2010, 2013), Bakkar (2017) y Alvarado y Denyer (2019). Dentro de los trabajos más recientes de peligrosidad volcánica, se tienen los de Alpízar (2018) y Alvarado, Aguilar y Vargas (2018).

ERUPCIONES PREHISTÓRICAS (ÚLTIMOS 30 ka)

Referente a dataciones subrecientes, Kempter et al. (1996) data una muestra con ¹⁴C en 27000 ± 560 años, del lado sur del cono Von Seebach, correspondiente a la erupción explosiva más antigua datada de la fase eruptiva subreciente del Rincón de la Vieja (Tefra Unidad Grupo 2, *sensu* Kempter, 1997). Además, cita la datación realizada por Melson (1988) de 3490 ± 105 a. P. correspondiente a una muestra de copal (erróneamente llamado ámbar en el trabajo original) contenido en el suelo debajo del depósito de tefra Río Blanco. La edad procedente de este paleosuelo debajo de Río Blanco, como se detalla más adelante, posee un rango temporal más amplio, por lo que solo apunta a una edad máxima de la capa Río Blanco, pero no es la edad del evento explosivo (ver Cuadro 2, Fig. 2).

Corrientes de densidad piroclástica diluida

Estos eventos son anteriores a la pliniana RB. Consiste en alternancias centimétricas de cenizas grises, de grano grueso a fino, donde el espesor cambia rápidamente (15-13 cm a 5 cm) y se observan estructuras de acuñamiento (Fig. 3). Se interpreta como un posible depósito relacionado a una corriente de densidad piroclástica diluida (CDPd) tipo oleada, aunque sus estructuras no son del todo claras. Este hallazgo se da debido a un corte en profundidad de aproximadamente 5 m, desde la superficie.

Capa subpliniana pre-Río Blanco (PrRB)

Los estudios de campo realizados en el 2017 evidenciaron que hay un evento de caída, previo a la erupción de RB, el cual se denomina acá PrRB, tal y como se observó a lo largo de diversos cortes artificiales al oeste del volcán Rincón de la Vieja, por lo que se le dio seguimiento. Consiste en una capa principalmente de lapilli de pómez amarillo, en la cual no se observan líticos, con un espesor de hasta 8 cm. En la plazoleta 2, el espesor es de 7 cm y se logra identificar fácilmente, cosa que no ocurre en otros sectores donde la capa apenas se logra observar, ya que se encuentra muy mezclada con el suelo (Fig. 4 y 5).

Capa pliniana Río Blanco y flujos del flanco norte (CDPd y RB)

Kempter (1997) y Kempter et al. (1996), indica que el depósito tefra Río Blanco (RB) es el depósito que representa la mayor erupción que involucra material juvenil del actual Rincón de la Vieja. Cerca del cráter Activo, la pliniana Río Blanco (*sensu* Kempter, 1997) posee un espesor >20 m, hasta pocos centímetros conforme se aleja del cráter. La tefra RB está constituida predominantemente por pómez con fenocritales de plagioclasa, ortopiroxeno y rara vez hornblenda; es un nivel pobre en líticos. El depósito se encuentra estratificado en los cortes donde muestra mayor espesor, así como una gradación inversa; en los sitios de menor espesor, se observa la capa más compacta.

Este depósito de pómez blanca es fácilmente reconocible en los caminos al oeste del volcán y en las plazoletas del proyecto Borinquen y alrededores (Fig. 5 y 6).

Cuadro 2

Niveles de tefras y dataciones de radiocarbono del volcán Rincón de la Vieja.

Código y posición esica	Contexto geológico	Edad convencional	Edad calibrada con <i>Calib 7.1</i> (2 sigma)	Edad escogida del evento volcánico Promedio Calibrado
RV-CH-D14	Suelo sobre PoRB ₂	20±20 a.P.	-	-
			1428-1890 A. D.	1650 A. D.
RV-CH-D6	Suelo negro debajo PoRB ₂	560±30 a.P.	1308-1428 A. D.	1357 A. D.
	Lahar	535±60 a.P.	1297-1450 A. D.	1390 A. D.
	Subpliniana PoRB ₁	1308-768 A. D.	1040 A. D.	
RV-CH-D7	Suelo sobre RB	1310±30 a.P.	656-768 A. D.	697 A. D.
	CDPc flanco norte (Soto et al., 2003b)	1600±60 a.P.	333-596 A. D. ¹	460 A. D.
	Pliniana Río Blanco (RB)		320-656 A. D.	490 A. D.
RV-P9-D5	Suelo debajo RB	1820±30 a.P.	90-320 A. D.	189 A. D.
			0 A. D.	
RV-P5-D13	Suelo sobrePrRB	2770±30 a.P.	996-839 a. C.	915 a. C.
	Subpliniana PrRB		996 a.C. - 1260 a. C.	1130 a. C.
RV-P2-D8	Suelo negro debajoPrRB	3060±30 a.P.	1410-1260 a. C.	1329 a. C.
“Río Blanco”	Copal en suelo negro PrRB (Melson, 1988) ²	3490±60 a.P.	1962-1658 a. C.	1815 a. C.
RV-P9-D1-2	Capa marrón bajo CDPd	4860±30 a.P.	3703-3633 a. C.	3650 a. C.
Tefra Unidad Grupo 2	Tefra Unidad Grupo 2 (Kempter et al., 1996) ³	27000±560 a.P.	30244-27808 a. C. ³	29080 a. C.

A. D.: d. C.: después de Cristo,

a. C.: antes de Cristo

a. P.: antes del presente, se toma como 1950 A. D.

1: modificado de Soto et al. (2003b); 2: modificado de Melson (1988); 3: modificado Kempter et al. (1996).

Soto et al. (2003b) estudian varios cortes para evaluar los mecanismos eruptivos en partes plano-onduladas en la falda sur del volcán, donde deducen que la erupción se dio en varias fases consecutivas, cuya secuencia más completa se veía en un corte que llamaban Borinquen Adentro. Este sitio, corresponde a la plataforma 9, lugar que fue sometido a cambios en los taludes, por lo que algunas descripciones originales de campo podrían no coincidir con las exposiciones actuales. Describen, además, que se da una inyección de magma andesítico, la cual dispararía la erupción; la segunda fase sería pulsante con un aumento de la energía hacia el final, mientras que la tercera fase abre y cierra con eventos freatomagmáticos, con una sola gran explosión en el medio, en donde la contribución de magma andesítico incrementó y la mezcla de ambos magmas fue más eficaz. La cuarta fase se caracterizó por pulsos de explosiones freatomagmáticas, la incorporación de un magma andesítico, donde el contenido de líticos decrece hacia el tope de la secuencia, la cual sugieren un conducto abierto con poca incorporación de materiales de sus paredes. La quinta fase fue una explosión de menor cuantía y la sexta fase fue una explosión importante, con una componente freatomagmática.

Schindlbeck et al. (2016) estima el volumen de 1,1 km³ para la capa RB en la tefra depositada en el fondo oceánico pacífico, el cual es superior al estimado por Kempter (1997) de 0,25 km³ en tierra. Ahora, con los datos nuevos recolectados, junto con los de Kempter (1997) y Barahona et al. (2001), todos ellos sirven para dar cierre y detalle a los valores proximales a distales al cráter, por lo que se puede realizar una mejor estimación del volumen eruptado. De la integración de los espesores en tierra, el volumen sería de 0,09 km³ (muy inferior al estimado originalmente). Para calcular el volumen de roca densa equivalente (DRE en inglés) se asume una densidad del depósito de 1000 kg/m³ y una densidad del magma dacítico de 2600 kg/m³ y utilizamos el valor del volumen total, lo que nos da un valor de volumen DRE de 0,46 km³ (Cuadro 3).

El depósito presenta dos máximos en las isopacas; uno en la parte próxima al cráter y otro máximo de 70 cm cerca del caserío de Fortuna, al pie del cerro Fortuna (Fig. 7). La integración de las isopacas muestra líneas muy distorsionadas (no

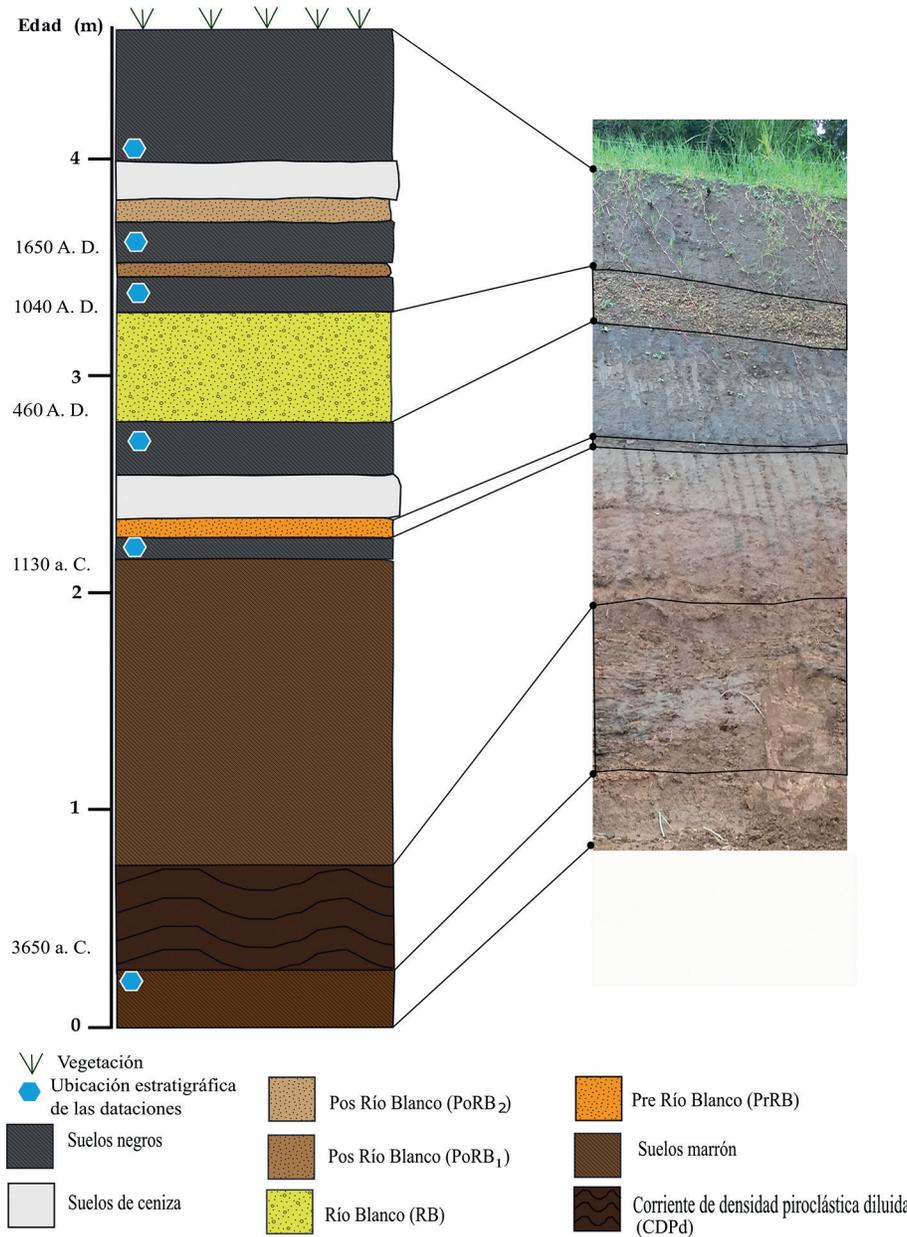


Fig. 2: Columna estratigráfica: representación de los distintos niveles estudiados en campo con un afloramiento (1197694N/346336E). Las edades de las dataciones se presentan en el Cuadro 2.

regularmente ovaladas), posiblemente producto de vientos fuertes en varias direcciones (quizás hasta vientos encontrados) al momento de la erupción. Si se utiliza la Fig. 8 (Pyle, 1989) y se considera la distancia media de un clasto de 7 cm encontrado en campo a una distancia de 7,6 km de distancia del cráter ($bc=7,6$), al proyectarlo, se obtiene la altura de la columna de 30 km, lo cual, sumado a las características del depósito y a su volumen, concuerda con una erupción pliniana con un VEI 5.

Algunos parámetros de la fuente se pueden calcular como lo es la magnitud, la cual está basada en el log en base 10 de la masa menos 7. Este valor nuevamente nos da una concordancia con una erupción pliniana.

$$M = \log_{10}(M_t) - 7 = \log_{10}(1,2 \times 10^{12} \text{ kg}) - 7 = 5,08 \quad (1)$$

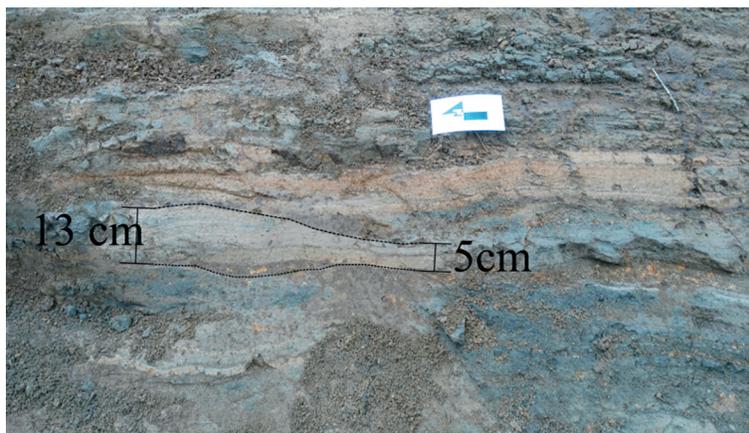


Fig. 3: Capas de cenizas lentiformes interpretadas como corrientes de densidad piroclástica diluida del 3650 a. C., a los 4 m desde la superficie se encuentran estas capas de ceniza con acuñamientos (1197694N/346336E).

Referente a la edad, Melson (1988) realizó una datación ^{14}C en la base de RB (3490 a.P.), edad que investigadores posteriores (Kempton, 1997; Soto et al., 2003a, 2003b; Alpizar, 2018, entre otros) tomaban como referencia este dato para designar la edad de este depósito y como una capa clave.

Kempton (1997) describió un flujo piroclástico o CDPc (corriente de densidad piroclástica concentrada) asociado con la tefra RB que se extiende al NE del cráter activo por varios kilómetros. Soto et al. (2003a) dató un tronco carbonizado, al cual le asignan una edad calibrada de 1520 +80-110 años a. P. e indican que a lo largo del cauce de los ríos Pénjamo y Azul afloran facies no soldadas, con espesores máximos de 5 m hasta encontrarse con el cañón del río Cucaracho. Soto et al. (2003b) y Soto (2010), no los correlacionan con la erupción de RB, ya que esta CDPc era más joven, esto debido a la mayor edad para RB propuesta por Melson (1988). Sin embargo, las muestras datadas de paleosuelos sobreyaciendo e infrayaciendo a la capa RB, aportadas por el presente trabajo, permiten restringir la edad del evento de forma más apropiada y reciente (Cuadro 2, Fig.

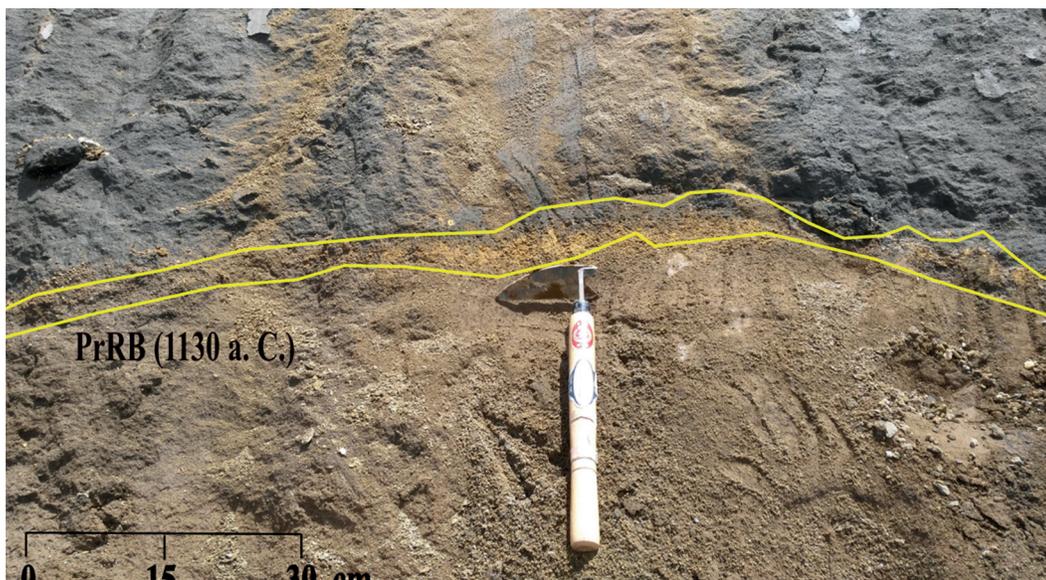


Fig. 4: Capa PrRB resaltada en amarillo, cuya edad fue determinada en 1130 a. C. (1196288N/345567E).

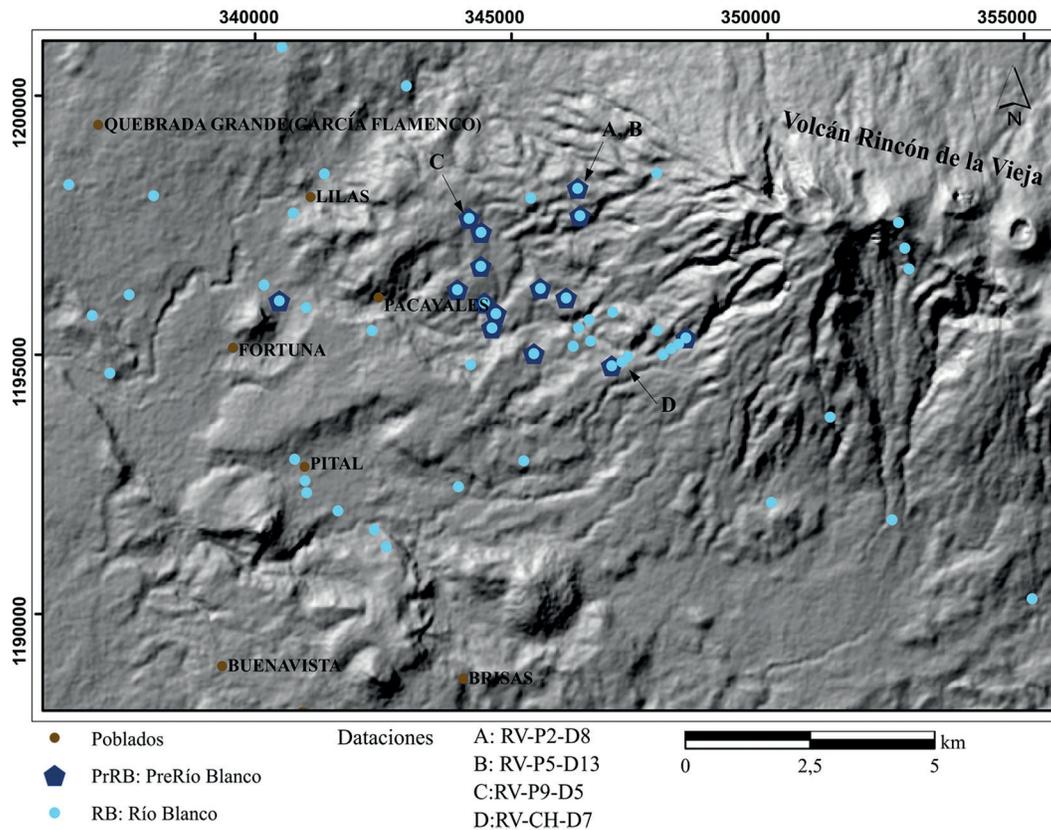


Fig. 5: Ubicación cortes artificiales donde se observaron y midieron los depósitos de RB y PrRB.

2), correspondiendo al año (490 A.D). Puesto que el carbón datado por Soto et al. (2003a) se encontraba bajo una CDP_c en el flanco N del Rincón de la Vieja, el cual sería el equivalente eruptivo de la capa RB en el flanco SW, y dado que una madera carbonizada aporta una mejor edad que los suelos que encierran la capa de pómez, es por esto que se escogió dicha edad (460 AD) para el evento de Río Blanco (tanto caída como PDCc).

Ya Soto et al. (2003b) habían notado similitud geoquímica y petrográfica entre la pómez de la CDP y aquellas de caída, pero no tanto en las escorias entre ambos, aunque concluyeron que no eran eventos coetáneos con base en el número reducido de dataciones disponibles. En el presente trabajo, no solo se concluye que son eventos contemporáneos, sino, además, que son comagmáticos, dado que las relaciones de los elementos traza son similares (Cuadro 4). Melson (1988) describe que la capa RB está compuesta por dos *subsets* el cual cada uno tiene a ser composicionalmente más ácido, una secuencia que suele ser inversa a lo observado en tefras composicionalmente zonadas. Sin embargo, el *subset* superior es más básico que el primero.

Cuadro 3

Estimación del volumen eruptado (km³).

Capa	Volumen de caída en tierra *	Volumen de CDP asociada	Volumen caída en el océano. Schindlbeck et al. (2016)	Total	Volumen DRE
RB	0,09	0,01-0,02	1,1	~1,21	0,46



Fig. 6: A) Depósito de la capa pliniana RB (1197694N/346336E). B) Pómez de 8 x 6 cm.

Él pensó que un magma marginal, más viscoso y fraccionado, ingresó, mientras que el magma del tope de la cámara magmática era menos viscoso y más rápidamente fluyó hacia la porción central del cuerpo magmático. En tal caso, más estudios geoquímicos son requeridos.

Eventos Pos-Río Blanco (PoRB1 y PoRB2)

Kempton (1997) y Soto (2010) indican que, en el borde sur del cráter, sobre RB, hay una secuencia de depósitos de tefra gruesas y cenizas que forman un anillo, lo cual guarda la historia volcánica posterior a la erupción pliniana de RB. Además, los relacionan con eventos que varían desde netamente freáticos con eyección de bloques líticos y sedimentos intralagunares, hasta freatomagmáticos, pasando por eventos estrombolianos.

Soto (2010) indica que en las áreas medias y distales la ceniza sobreyace a la tefra RB, pero debido al rango de edad que se manejaba anteriormente (3700 a. P), lo hacía concluir que no había erupciones de importancia posteriores a RB. Sin embargo, en los estudios de campo realizados en el presente estudio durante el 2017-2018, aportan nuevos datos que restringen la edad de los depósitos más recientes, con edades más jóvenes de lo que se pensaba.

Así, se evidencian varios eventos subplinianos pos-RB. Por ello, se consideró dar seguimiento a estas capas de cenizas y pómez sobre la pliniana de RB, ya que estos eventos son más jóvenes que RB (Fig. 9). Esta secuencia consiste de varias capas de cenizas y niveles de lapilli fino de pómez muy marcados. La primera capa posterior a RB (PoRB1) tiene hasta 17 cm de espesor y capa PoRB2 llega a tener un espesor de hasta 12 cm en un corte de camino cercano al hotel Borinquen, la cual se distribuye 12 km al WSW del cráter activo (Fig. 10). Estas capas fueron datadas en 1040 d. C. y 1650 A. D y lo cual nos indica que hay erupciones más recientes e importantes posteriores a RB, por lo que se puede decir que existen otros eventos explosivos relevantes entre RB y las erupciones históricas del Rincón de la Vieja, aspecto igualmente novedoso dentro de la literatura de este volcán.

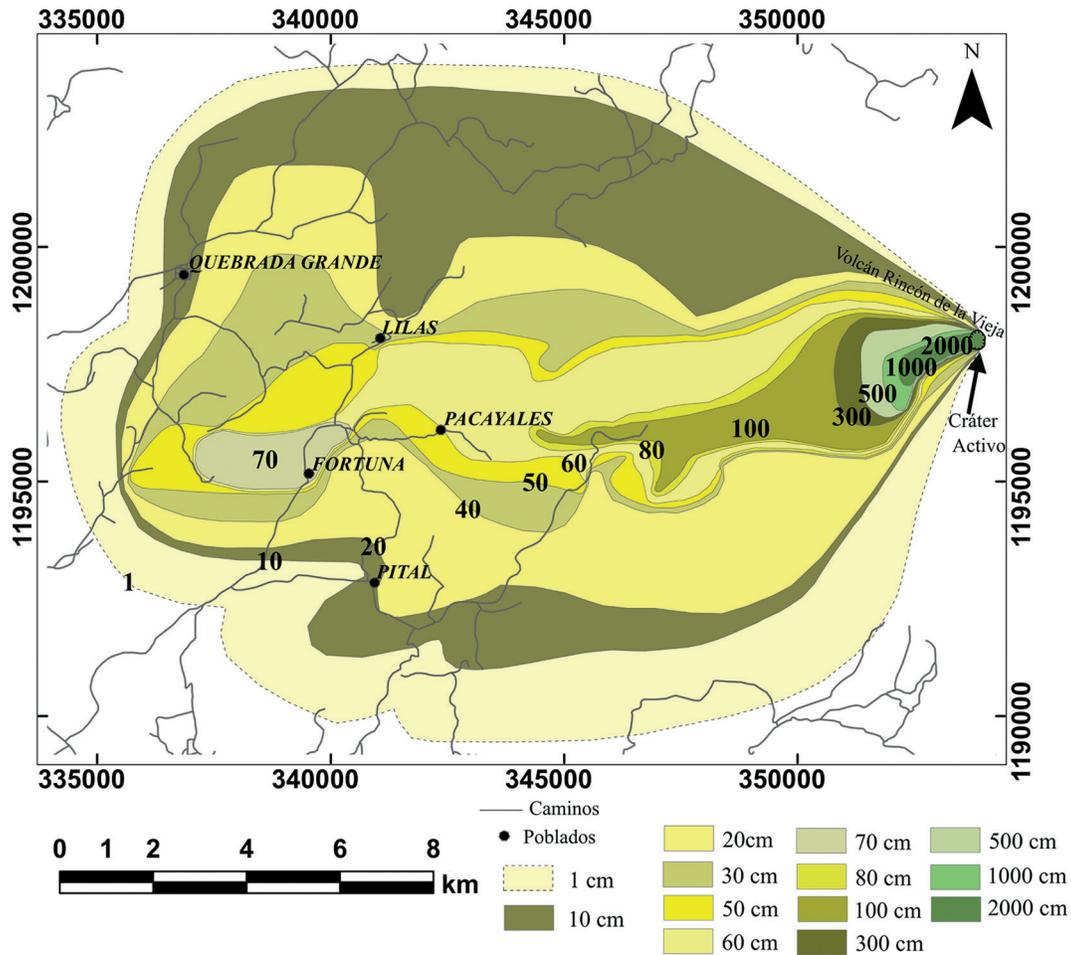


Fig. 7: Isopacas de la plinia RB, se observa cómo se dan dos máximos, uno cercano al cráter y otro al WSW en la parte distal, cerca de Fortuna. Elaborado a partir de la integración de datos de campo de Kempter (1997), Barahona et al. (2001) y el presente trabajo.

Resulta interesante mencionar, que Melson et al. (1986) dató un depósito de lahar por la estación hacienda Santa María en 535 ± 60 años a. P., cuya edad calibrada es de aproximadamente 1390 d. C. La edad proviene de un lugar cercano al río Pizote, que nace cerca de los dos conos gemelos más orientales del Rincón de la Vieja. Surge entonces la pregunta ¿corresponderá con un lahar eruptivo, pos-eruptivo o un lahar relacionado con un temporal, huracán o incluso un terremoto?, ¿estará relacionado con alguno de esos conos orientales o la dispersión de cenizas desde el cráter actualmente activo fue parcialmente hacia el oriente? Por el momento, no hay elementos suficientes para contestar dichas interrogantes.

ERUPCIONES HISTÓRICAS

La actividad histórica del Rincón de la Vieja se registra a partir de la época de la Colonia, sin embargo, no hay ningún documento que registre un evento eruptivo entre la Conquista y 1700 (Alvarado, 2009; Alvarado y Patino, 2017).

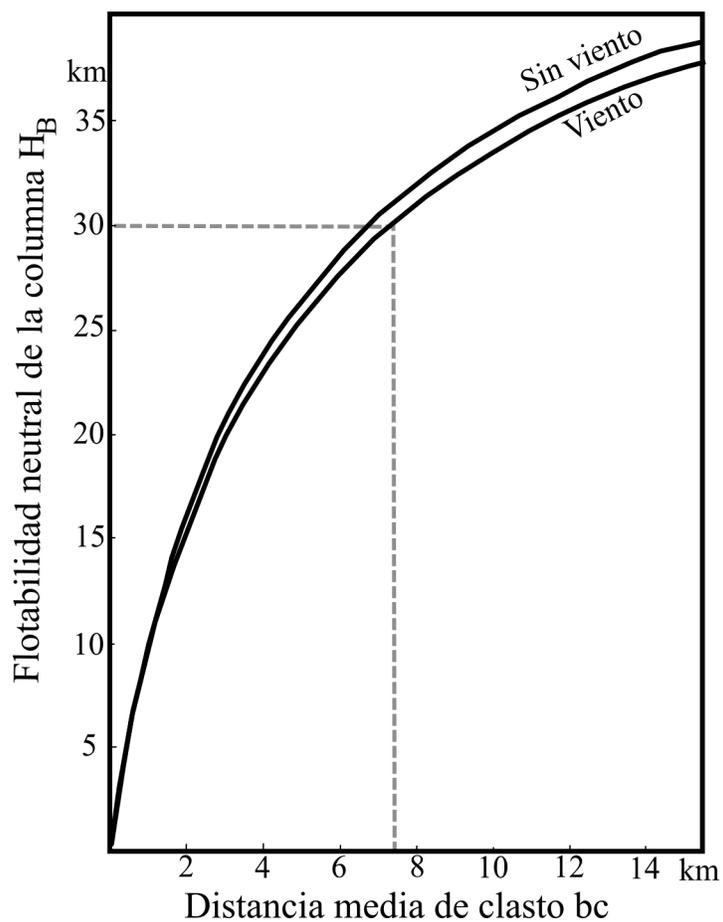


Fig. 8: Diagrama de Pyle (1989), modificado para estimar la altura de la columna eruptiva de Río Blanco.

Cuadro 4

Comparación de algunas relaciones de los elementos traza entre la escoria de caída y la CDP (basado en los datos del cuadro 6 de Soto et al., 2003a).

Relación	Escoria de caída	Escoria de flujo
V/Cr	5,2-10,8	13,4
Cr/Co	0,80	0,7
Co/Ni	2,05	2,82
Sr/Rb	11,03-14,21	8,41
Zr/Nb	22,9	24,26
Ba/La	41,5	44,3
Th/U	1,97-2,97	2,0
Zr/Hf	3,11	37,13

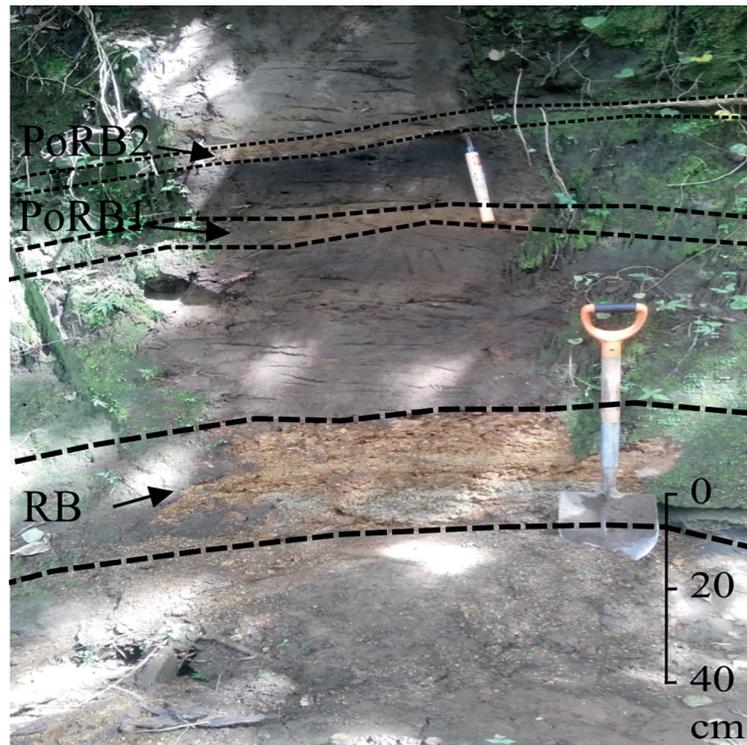


Fig. 9: Detalle de los eventos posteriores a Río Blanco, PoRB1 y PoRB2, intercalados por cenizas grises (1195012N/347957E).

Los registros eruptivos entre 1700 y 1880 son poco confiables o pobremente descritos. Muchas de las erupciones fueron observadas desde la distancia, en días despejados o únicamente cuando hubo reportes de caída de cenizas. Puesto que la mayoría de las personas de ese entonces no eran letradas, ello podría explicar la carencia de documentos escritos o estos se perdieron en el tiempo.

Entre 1800 y 1960, los registros son aislados, pero mejor documentados, incluso algunos de ellos con material fotográfico y descripciones algo más completas.

Entre 1960 y 1980, la limitada experiencia de los eventos eruptivos del Poás (1952-1955), Irazú (1963-1965) y Arenal (1968) dieron las bases para que se prestara una mayor atención a lo que acontecía en el Rincón de la Vieja (Cuadro 6).

Entre 1980 y el 2010, se establecen y fortalecen las unidades académicas y los observatorios, los cuales permiten una mejor observación y registro de lo acontecido en el volcán, por ello, los registros son más precisos. Sobresalen las erupciones en 1991-1992, 1995 y 1998. A partir del 2010, se ponen en operación estaciones sismológicas y un mejor sistema de vigilancia volcánica que permiten un registro cuasicontinuo de lo que ocurre en el volcán (Bakkar, 2017), lo cual se mejoró a partir del 2014 con una estación cerca del cráter y un equipo de infrasonido a inicios del 2019 (J. Pacheco, com. escrita, 2020).

En el 2017 se presentaron varios eventos, dos de ellos de importancia ya que se generaron lahares calientes en los ríos Pénjamo y Azul. Esto ocurrió el 23 de mayo y el 11 de junio del 2017, donde se presentaron lahares, que descendieron principalmente por el río Pénjamo, quebrada Azufrada y río Azul, sin generar afectación directa a los poblados de Buenos Aires y Dos Ríos de Upala (Bakkar, 2017). Para el 2018 hasta marzo del 2020, los reportes de erupciones variaron entre 0 (buena parte del primer semestre del 2018) a entre 2 y 10 mensuales de poca magnitud (<100-600 m sobre el nivel del cráter), muchas de ellas

Cuadro 5

Resumen de los eventos históricos propuestos en este trabajo.

Capa	Contexto	Descripción
CDPd	Estos eventos son anteriores a la pliniana RB. Se interpreta como un posible depósito relacionado a una corriente de densidad piroclástica diluida (CDPd) tipo oleada, aunque sus estructuras no son del todo claras.	Consiste en alternancias centimétricas de cenizas grises, de grano grueso a fino, donde el espesor cambia rápidamente (15-13 cm a 5 cm) y se observan estructuras de acuñamiento.
PrRB Nuevo aporte	Los estudios de campo evidenciaron que hay un evento de caída, previo a la erupción de Río Blanco, el cual se denominamos PrRB, tal y como se observó en diversos cortes artificiales.	Consiste en una capa principalmente de lapilli de pómez de color amarillo, en la cual no se observan líticos, con un espesor de hasta 8 cm.
RB Actualización de la edad	Este es el evento guía, reconocible fácilmente al oeste del volcán Rincón de la Vieja. Además, representa una capa isócrona para estudios geomorfológicos y geoaqueológicos.	La tefra RB está constituida predominantemente por pómez con fenocristales oscuros y pocos líticos. Además, en algunos sitios se encuentra estratificada con una gradación inversa en los cortes con mayor espesor y en los de menor espesor, se observa la capa más compacta.
Eventos Pos-Río Blanco (PoRB1 y PoRB2) Nuevo aporte	Se puede decir que existen otros eventos explosivos relevantes entre RB y las erupciones históricas del Rincón de la Vieja	Consiste en varias capas de cenizas y niveles de lapilli fino de pómez muy marcados. La primera capa posterior a Río Blanco (PoRB1) tiene hasta 17 cm de espesor y capa PoRB2 llega a tener un espesor de hasta 12 cm

con exhalaciones importantes (columna de vapor hasta 1 km) y pocos lahares asociados de pequeño tamaño. El número de reportes incrementó en abril-setiembre del 2020, con decenas de pequeñas erupciones registradas. Este volcán se encuentra muy activo, por lo que, para referencias de las últimas erupciones, se deben revisar los reportes diarios y especiales generados por el Ovsicori.

Referente a la estimación del Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés) se tiene que considerar lo siguiente:

1. Aunque muchas de las erupciones del siglo XIX y primera mitad del siglo XX, fueron pobremente descritas, el hecho de que fuesen observadas a la distancia y desde su flanco pacífico (se observan mejor desde el flanco caribeño), induce a pensar que algunas de ellas tuvieron un VEI de por lo menos de escala 1 o 2.

2. Muchas de las erupciones fueron reportadas con base en la altura de columna de color blanco (vapor de aguas y otros gases) de hasta 1 km o más, lo cual no necesariamente corresponden con la altura de la nube de cenizas convectiva, que es uno de los parámetros que se toma en cuenta en el VEI.

3. Una cantidad numerosa de erupciones de VEI 0 o incluso 1 fueron registradas entre el 2011 y el 2020 por el Ovsicori-UNA y el Osivam-ICE, debido a una mejor instrumentación a partir del 2010 y a que la población suele estar atenta e informar a través de las redes sociales. Esto sugiere que previo al 2010 pudieron haber ocurrido gran cantidad de eventos pequeños que pasaron desapercibidos. Tal y como se mencionó, en el año 2014 se instala una estación sismológica más cercana al cráter y posteriormente una de infrasonido a inicios del 2019 (J. Pacheco, com. escrita, 2020), con lo que se amplía y mejora la vigilancia volcánica; es por eso, que se tiene mayor detalle y control de la actividad eruptiva reciente, incrementando el número de erupciones diarias o mensuales.

RECURRENCIA DE LAS ERUPCIONES

Aunque no se dispone de datos suficientes, se puede realizar una estimación grosera de la frecuencia de las erupciones, base para la amenaza volcánica. Schindlbeck et al. (2016) estimó que en los últimos 300 000 años se han presentado unas 6 erupciones, presumiblemente procedentes del Rincón de la Vieja, con volúmenes de entre 1,1 y 2,8 km³, lo que permite deducir una erupción importante (VEI 5) cada 50 000 años, aproximadamente.

Para los últimos 2000 años, la recurrencia de eventos importantes (VEI \geq 4) groseramente sería un evento cada 600 años, aproximadamente. La probabilidad de que se presente un evento pliniano o subpliniano a corto plazo, en el caso de mantenerse

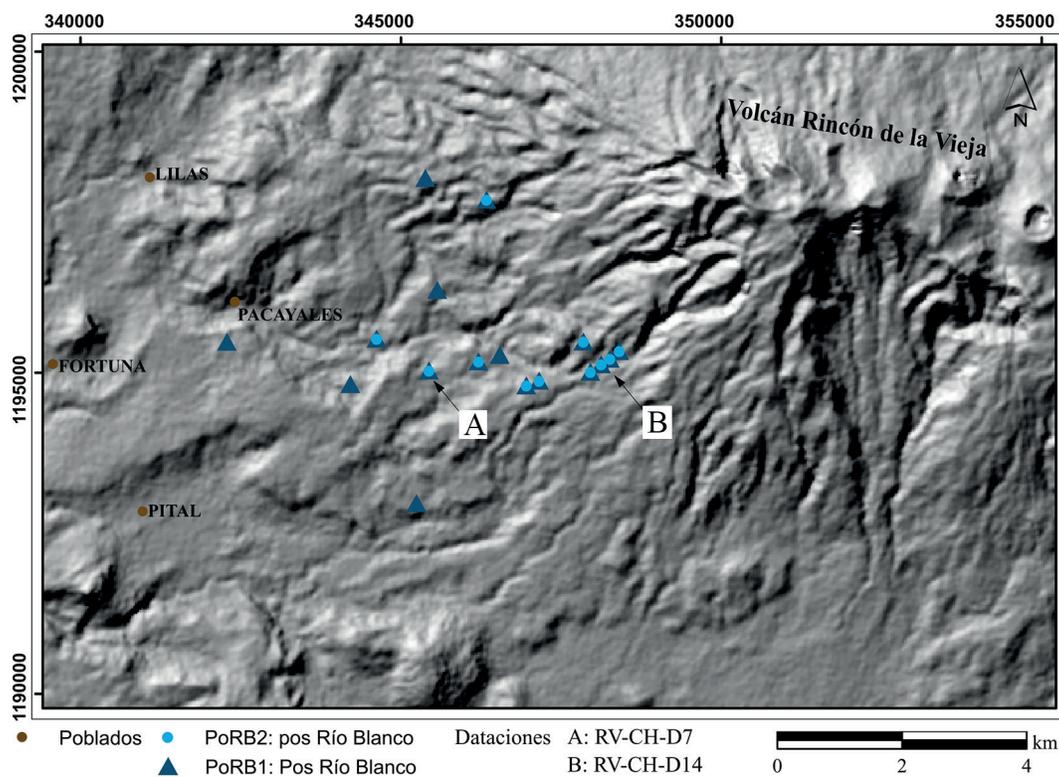


Fig. 10: Ubicación de los sitios donde se observa estas nuevas capas propuestas y los puntos donde se tomaron las muestras para las dataciones.

dicha recurrencia, es muy baja pero no improbable. La geoquímica de los productos históricos, de tipo andesítico más no dacítico, indica que no se están generando magmas más ácidos, al menos por el momento o volumétricamente importantes. De modo especulativo, entonces se podría esperar que la próxima erupción pliniana (VEI 4-5) se dé cerca del año 2250 (Fig. 11).

Si se toma en cuenta las erupciones históricas, se tiene entonces que un evento tipo vulcaniano importante (VEI 3) puede presentar cada 50-100 años. Soto et al. (2003b) argumentaba que existía una probabilidad de que ocurriera una erupción importante alrededor del año 2038, dado que en ese entonces desde 1998 no volvía a ocurrir un evento eruptivo. Aunque las erupciones se volvieron a presentar a partir del 2011 al presente (las últimas en setiembre del 2020, al tiempo de cierre de este trabajo), pero estas han sido pequeñas. Pese a ello, un estudio estadístico (Dzierma y Wehrmann, 2014) sugiere que existe una probabilidad de un 60 % de que ocurra una erupción (VEI ≥ 2) en el Rincón de la Vieja hacia el año 2038, del tamaño sugerido por Soto et al. (2003b). Esto nos quiere decir, que para lo que resta del siglo XXI existe una alta probabilidad de una o dos erupciones VEI 2-3, similares a la que ocurrieron en 1966-1967.

CONCLUSIONES

Con base en las dataciones realizadas, se definen cinco eventos volcánicos importantes que se presentaron en el Rincón de la Vieja en los últimos 6000 años (Holoceno Medio y Superior): 3650 a. C., 1130 a. C., 460 d. C., 1040 d. C. y 1650 d. C. Lo anterior amplía significativamente el calendario eruptivo prehistórico del volcán Rincón de la Vieja.

Un aspecto interesante que se desprende del presente trabajo es el posible grado de incertidumbre y error que se puede tener en la determinación de la edad de una capa de caída basado únicamente en la datación del paleosuelo infrayacente, que puede arrojar errores de entre de uno a varios siglos. El caso extremo del punto anterior es el ejemplo de la fecha aportada por Melson (1988), que daba una edad para RB con base en un copal datado en 3490 a. P. (= 1815 a. C.). La edad que se maneja

Cuadro 6

Resumen de las erupciones históricas de 1700 al presente

Año	Tipo de Actividad	Observaciones	VEI (rango estimado)
1765-1918		Se comenta que durante algunos años el volcán Rincón de la Vieja pudo haber generado erupciones “pequeñas”, las cuales pudieron ser vistas por los pobladores de Librería, dejando rastros en algunos relatos escritos.	0-3
1921-1922	Freatomagmática		0-2
1966-1967	Freatomagmática	Cambio en la coloración del río Blanco y Colorado (Krushensky y Spencer, 1967).	0-3
1969-1975	Posiblemente freatomagmática		0-2
1983-1984	Freatomagmática	Durante las erupciones mayores surtseyanas, suelen formarse lahares calientes.	0-2
1985-1987	Freática	Durante las erupciones mayores surtseyanas, suelen formarse lahares calientes.	0-2
1991-1992	Freatomagmática	Paniagua, Salazar, Kussmaul, Monge, y Obando (1996), indican que se generó una erupción freatomagmática con una columna de ceniza que se elevó a una altura de unos 5 km encima del cráter. Además, se generaron lahares en los ríos Pénjamo, Azul y Azufroso.	0-2
1995	Freatomagmática, similar a la surtseyana	Las erupciones provocaron la caída de ceniza (11 000 km ²) y generación de lahares. Las aéreas impactadas durante las erupciones fueron las nacientes de los ríos Pénjamo y Azul, lo que provocó lahares que inhabilitaron parcial y temporalmente el puente sobre el río Pénjamo y socavaron el vado sobre la quebrada Azufrada (Ovsicori-UNA, 1995; RSN, 1996), Paniagua et al. (1996), informan que el 07-11-95 (13:22 hora local) pasó un lahar por el puente del río Pénjamo y el puente fue arrasado por completo.	2
1998	Posiblemente freatomagmática	Se generaron lahares calientes que no provocaron daños en infraestructura.	1
2011-2012	Freáticas y freatomagmáticas	Lahares calientes.	0-1
2014-2020	Freatomagmática (surtseyanas)	Erupciones pequeñas con lahares calientes casuales y lahares secundarios.	0-1

ahora, para la RB en el presente trabajo, es de 1490 a. P. (= 460 d. C.), indicando un error de 2276 años con respecto a la estimación previa. De ahí, que en la medida de lo posible se recomienda, cuando se estudien capas de caída (pómez o cenizas), datar los suelos al contacto (base y techo del nivel explosivo) a modo de emparedado o sándwich estratigráfico (edades máxima y mínima). Ese método de las dataciones, aunque conocido en estratigrafía, nunca o pocas veces se había aplicado en tefroestratigrafía en Costa Rica en forma sistemática como se aplicó acá, o bien, se había realizado por correlación y deducción, debido a una limitante económica. Así, la edad del evento quedará encerrada de modo más precisa, particularmente relevante para depósitos volcánicos con edades inferiores a 4 ka para la evaluación del peligro volcánico. Claramente, lo ideal es datar un tronco carbonizado contenido dentro del depósito.

Adicionalmente, con base en los datos de campo y de la literatura, se recalculó el volumen de la erupción de RB en 1,21 km³ (0,46 km³ DRE) para una altura de columna de 30 km, coincidiendo con las características de una erupción pliniana con CDP asociadas y un VEI 5, una de las más grandes en tiempos recientes en Costa Rica. Un evento de este tipo representa un peligro serio para las poblaciones en el flanco caribeño del volcán, por lo que el desarrollo en infraestructura debe de limitarse y regularse hacia sus faldas y cerca de los cauces de los ríos principales.

Además, esta nueva edad de la capa RB resulta no solo importante para la revaloración del peligro volcánico, sino para los estudios de geomorfología del Holoceno Superior y para los estudios geoarqueológicos, dado que constituye una capa guía e isócrona del 460 d. C.

Las erupciones históricas presentan un VEI de 0 a 3, en su mayoría entre 0 y 2, donde el periodo de erupción de 1966-1967 es el que presentó, sin duda, el índice más alto de VEI 3. Los otros eventos, a pesar de tener un índice de explosividad bajo, no están exentos de presentar afectación como es el caso de la generación de lahares, en especial hacia el lado norte del volcán. Los efectos de los lahares hacia el lado S y SW del volcán no ha solido ser de importancia en tiempo histórico, aunque si lo debieron de haber sido en las varias de las erupciones prehistóricas estudiadas.

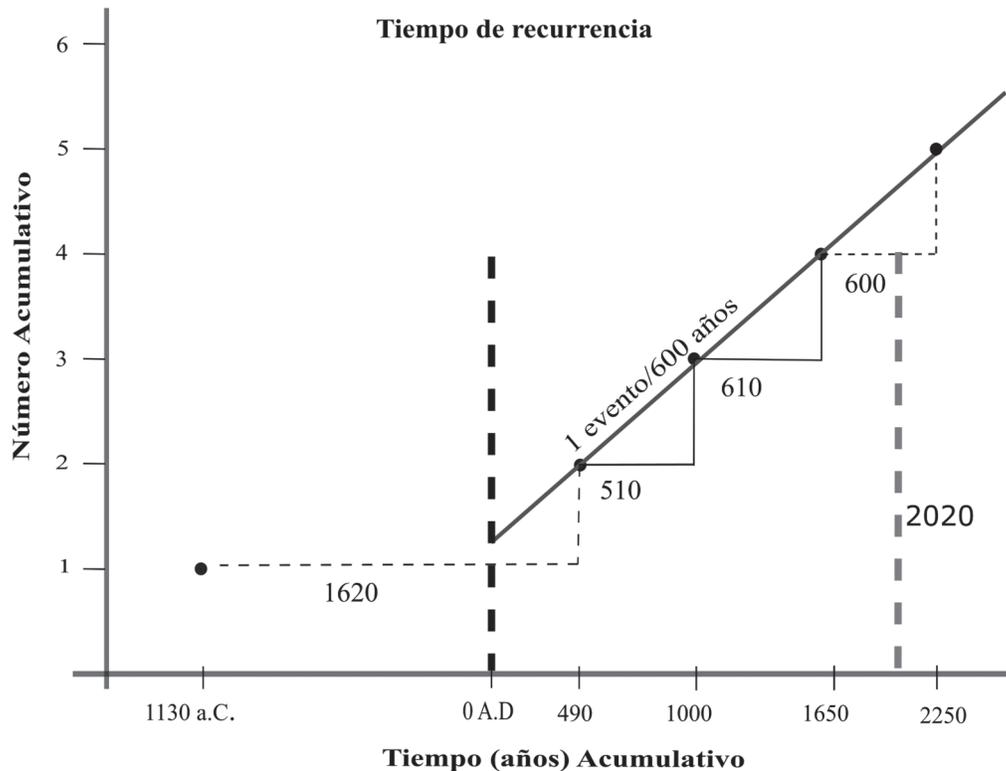


Fig. 11: Estimación de la recurrencia. La línea recta inclinada es la de mejor ajuste. La línea punteada en negro marca el año cero de nuestra era. El último punto de la recta representa la proyección de una erupción en el futuro, la cual correspondería al año 2250. La línea punteada gris representa el año 2020.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al personal de campo del ICE, particularmente a Francisco Arias y Marcos Miranda por su disposición y colaboración. El ICE aportó el soporte logístico y para las dataciones de radiocarbono. Al Área de Conservación Guanacaste, sector Las Pailas, por su apoyo en los permisos de ingreso a las áreas protegidas. A los geólogos Paulo Ruiz y Walter Hernández por la revisión crítica del manuscrito. A Jorge P. Galve (Universidad de Granada), por su revisión en los datos obtenidos de las dataciones de ^{14}C .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpizar, Y. (2018). *Mapa preliminar de peligros volcánicos para el Rincón de la Vieja (Costa Rica): Descripción de un escenario de afectación por lahares* (Tesis de maestría inédita). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Alvarado, G. E. (2009). *Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente* (3ª ed.). San José: EUNED.
- Alvarado, G. E., y Gans, P. B. (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogénia de Costa Rica, América Central. *Revista Geológica de América Central*, 46, 7-122. doi: 10.15517/rgac.v0i46.1836

- Alvarado, G. E., y Patino, L. C. (2017). The history of volcanology in Costa Rica: from the Amerindians legends to the beginning of the twenty-first century. En W. Mayer, R. M. Clary, L. F. Azuela, T. S. Mota y S. Wolkowicz (eds), *History of geoscience: celebrating 50 years of INHIGEO* (Geological Society of London, Special Publication 442, pp. 127-140). doi: 10.1144/SP442.32
- Alvarado, G. E., y Denyer, P. (2019). *Estratigrafía volcánica del Neógeno y Cuaternario*. En P. Denyer (ed.): *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica: historia, evolución y cartografía* (pp. 101-238). San José: EUCR-CICG.
- Alvarado, G. E., Aguilar, I. L., y Vargas, A. (2018). *Evaluación de la amenaza volcánica del Rincón de la Vieja para el proyecto geotérmico Borinquen, Guanacaste*. San José: Instituto Costarricense de Electricidad. Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica. Informe interno.
- Arias, A. (2007). *Suelos tropicales*. San José: EUNED.
- Barahona, M., Bonilla, E., Cortés, R., Coto, L., Guzmán, G., Herrera, P. ... Zamora, N. (2001). *Geología-vulcanología del campo geotérmico Borinquen-Las Pailas*. San José: Universidad de Costa Rica. Informe de Campaña Geológica.
- Bakkar, H. (2017). *Estudios de los procesos sísmicos y volcánicos en el Rincón de la Vieja* (Tesis de licenciatura inédita). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Carr, M. J., Craig, A., y Bruce, G. (1986). Nuevos análisis de lavas y bombas del Rincón de La Vieja, Costa Rica. *Boletín de Vulcanología*, 16, 23-30.
- Carr, M. J., Saginor, I., Alvarado, G. E., Bolge, L., Lindsay, F. N., Milidakis, K. ... Swisher, C. C. (2007). Element fluxes from the volcanic front of Nicaragua and Costa Rica. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 8 (6). doi: 10.1029/2006GC001396
- Chavarría, L., Hakanson, E., y Mora, O. (2007). *Geología del sector Mundo Nuevo*. San José: Instituto Costarricense de Electricidad. Informe interno.
- Chiesa, S., Alvarado, G. E., Pecchio, M., Corella, M., y Zanchi, A. (1994). Contribution to petrological and stratigraphical understanding of the Cordillera de Guanacaste lava flows, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 17, 19-43.
- Dzierma, Y., y Wehrmann, H. (2014). Probabilities of future VEI ≥ 2 eruptions at the Central American Volcanic Arc: a statistical perspective based on the past centuries eruption record. *International Journal of Earth Sciences*, 103, 2029-2042.
- Kempton, K. A., Benner, S. G., y Williams, S.N. (1996). Rincón de la Vieja volcano, Guanacaste province, Costa Rica: geology of the southwestern flank and hazard implication. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 71, 109-127.
- Kempton, K. A. (1997). *Geologic evolution of the Rincón de la Vieja Volcanic Complex, NW Costa Rica* (Tesis de doctorado inédita). University of Texas at Austin, Texas, Estados Unidos.
- Krushensky, P. D., y Spencer, F. D. (1967). *Effects of recent eruption of the volcano Rincón de la Vieja, Costa Rica*. Washington: U.S. Geological Survey. Manuscrito inédito.
- Melson, W. G. (1988). *Major explosive eruptions of Costa Rica volcanoes. Update for Costa Rica Volcanism Workshop, Costa Rica Volcanism*. Washington: Smithsonian Institute. Manuscrito inédito.
- Melson, W. G., Barquero, J., Sáenz, R., y Fernández, E. (1986). Erupciones explosivas de importancia en volcanes de Costa Rica (Un reporte del progreso alcanzado). *Boletín de Vulcanología*, 16, 15-20.

- Paniagua, S., Salazar, L. G., Kussmaul, S., Monge, A., y Obando, L. G. (1996). *Síntesis de la amenaza volcánica y estimación básica del riesgo del volcán Rincón de la Vieja, Cordillera de Guanacaste, Costa Rica*. San José: Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología. Informe interno.
- Pyle, D. M. (1989). The thickness, volumen and grainsize of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 51, 1-15.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B. ... Grootes, P. M. (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869-1887.
- Schindlbeck, J. C., Kutterolf, S., Freundt, A., Alvarado, G. E., Wang, K. L., Straub, S. M. ... Woodhead, J. D. (2016). Late Cenozoic tephrostratigraphy offshore the southern Central American Volcanic Arc, 1, Tephra ages and provenance. *Geochemistri Geophysics Geosystem*, 17. doi: 10.1002/2016 GC 006503.
- Soto, G. J., Alvarado, G. E., Goold, S., y 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*. San José: Instituto Costarricense de Electricidad, Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica. Informe interno.
- Soto, G. J., Alvarado, G. E., y Goold, S. (2003b). Erupciones < 3800 a. P. del volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 29, 67-86.
- Soto, G. J. (2010). *Volcanalidad, peligro volcánico del Rincón de la Vieja y su perspectiva en el impacto ambiental del proyecto Geotérmico Nuevo Mundo*. San José: Instituto Costarricense de Electricidad, Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica. Informe interno.
- Soto, G. J. (2013). *Peligro volcánico del volcán Rincón de la Vieja y su perspectiva en el impacto ambiental del Proyecto Geotérmico Borinquen*. San José: Instituto Costarricense de Electricidad, Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica. Informe interno.
- Stuiver, M., Reimer, P. J., y Reimer, R. W. (2020). *CALIB 7.1*. Recuperado de <http://calib.org>
- Tassi, F., Vaselli, O., Capaccioni, B., Giolito, C., Duarte, E., Fernández, E., Minissale, A., y Magro, G. (2005). The hydrothermal-volcanic system of Rincón de la Vieja volcano (Costa Rica). A combined (inorganic and organic) geochemical approach to understanding the origin of the fluid discharges and its possible application to volcanic surveillance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, 315-333.
- Zamora, N., Méndez, J., Barahona, M., y Sjobohm, L. (2004). Volcano-estratigrafía asociada al campo de domos de Cañas Dulces, Guanacaste, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 30, 41-58. doi: 10.15517/rgac.v0i30.7253