

Instituto Costarricense de Electricidad

ANÁLISIS DEL PELIGRO VOLCÁNICO DEL RINCÓN DE LA VIEJA, COSTA RICA



Geól. Guillermo E. Alvarado

Grupo Geociencias, ICE

Físico José Brenes-André

Red Ciudadana de Estaciones Meteorológicas

Geóg. Luis Venegas

Escuela de Ciencias Geográficas, UNA

Geól. Yemerith Alpizar

Universidad Técnica Nacional

Infor. Santiago Núñez

University of Illinois Urbana-Champaign

Geól. Melissa Sánchez, Geól. Karina Abarca, Geól. Jorge Abarca

Universidad de Costa Rica

Geól. Walter A. Báez

CONICET-Universidad Nacional de Salta, Argentina

Quím. José P. Sibaja

Laboratorio de Química de la Atmósfera, UNA

Geol. Lidier Esquivel

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE)

Taniuska Arcia

Fundación Ayuda en Acción, Upala

Setiembre 2022

Entidades participantes y distribución de tareas



Geól. Guillermo E. Alvarado

Vulcanología y peligros volcánicos; editor y coordinador de las prácticas realizadas en el Rincón de la Vieja (UCR y UNA)

Físico José Brenes-André

Modelización de la caída de tefras, Modelo fractal y fragmentación secuencial

Geóg. Luis Venegas

Aspectos sobre vulnerabilidad, uso del suelo y gestión del riesgo

Geól. Yemerith Alpízar

Modelados de lahares y de cenizas, peligros volcánicos

Infor. Santiago Núñez

Modelización de la caída de tefras

Geól. Melissa Sánchez, Geól. Karina Abarca, Geól. Jorge Abarca

Geomorfología general y geología del flanco caribeño

Geól. Walter A. Báez

Tefroestrigrafía del Holoceno

Quím. José P. Sibaja

Emisiones del material particulado suspendido y gases

Geol. Lidier Esquivel

Gestión del riesgo

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 MARCO GEOGRÁFICO	15
1.2 LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS PAILAS Y BORINQUEN.....	21
2. METODOLOGÍA.....	24
3. GEOLOGÍA DEL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA	38
3.1 MARCO ESTRATIGRÁFICO	38
3.1.1 Petrografía	40
3.1.2 Unidades morfoestratigráficas.....	41
Pre-Rincón	41
Proto-Rincón.....	41
Paleo-Rincón	42
Neo-Rincón.....	44
3.1.3 Tefroestratigrafía	55
Discusión sobre la tefroestratigrafía y la recurrencia eruptiva reciente	72
3.2 GEOMORFOLOGÍA	74
3.2.1 Geoformas volcánicas primarias.....	77
3.2.2 Geoformas denudacionales.....	90
3.2.3 Geoformas volcano-sedimentarias	91
3.3 TECTÓNICA	99
4. ACTIVIDAD ERUPTIVA HISTÓRICA	105
5. ACTIVIDAD VOLCÁNICA SECUNDARIA.....	133
(FUMAROLAS Y FUENTES TERMALES)	133
6. PELIGRO VOLCÁNICO	150
6.3 AMENAZAS VOLCÁNICAS DIRECTAS.....	164
6.3.1 Gases y aerosoles volcánicos.....	164
6.3.2 Coladas de lava	172
6.3.3 Flujos piroclásticos	174
6.3.4 Piroclastos de caída.....	177
6.3.5 Proyectiles balísticos	209
6.3.6 Terremotos volcánicos	211
6.3.8 Formación de nuevos cráteres y conos.....	212
6.4 AMENAZAS VOLCÁNICAS INDIRECTAS	213
6.4.1 Lluvia ácida.....	213
6.4.3 Lahares.....	216
7. VIGILANCIA VOLCÁNICA	230
7.2. MONITOREO ACTUAL	231
7.2.1 SISMOLOGÍA VOLCÁNICA	232
7.2.2 GEOQUÍMICA DE AGUAS, GASES, AEROSOL Y CENIZAS VOLCÁNICAS.....	234
7.2.3 GEODESIA VOLCÁNICA	236
7.2.4 GEOFÍSICA.....	237
7.3.5 SENSORES REMOTOS	237
8. ASPECTOS SOBRE LA GESTIÓN DEL RIESGO	240
8.1 PERCEPCIÓN DEL RIESGO	241

8.1.1 <i>Análisis de los resultados</i>	241
8.1.2 <i>Ficha familiar</i>	247
9. LA VULNERABILIDAD COMO UNA BASE PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO EN EL FLANCO NÓRDICO.	248
9.1 FACTORES QUE CONDICIONAN EL RIESGO	251
9.2 USOS DEL SUELO.....	254
9.2.2 <i>Vulnerabilidad de las viviendas</i>	262
9.2.4 <i>Vulnerabilidad comunitaria</i>	269
9.3 UNA APROXIMACIÓN AL RIESGO VOLCÁNICO EN EL SECTOR NORTE	272
9.3.1 <i>Exposición y peligrosidad ante lahares</i>	272
9.3.2 <i>Riesgo asociado a la afectación de lahares a nivel comunitario</i>	274
9.3.3 ZONIFICACIÓN DEL RIESGO DEL SECTOR ACTUALMENTE POBLADO EN EL FLANCO NORTE	276
9.3.4 <i>Evaluación del estado de conocimiento volcánico: base para una mejor evaluación de la peligrosidad y la vigilancia volcánica</i>	280
9.3.5 <i>Protección de la Infraestructura y los Servicios: Sostenibilidad-Seguros</i>	286
9.3.6 <i>Comunicación de la información sobre la actividad volcánica</i>	287
9.3.7 <i>¿QUÉ SE HA HECHO, SE ESTÁ HACIENDO Y SE PUEDE REALIZAR PARA UNA MEJOR GESTIÓN DEL RIESGO?</i>	291
9.3.8 <i>¿RESULTA NECESARIA LA REGULACIÓN DEL USO DEL SUELO EN EL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA?</i>	297
9.3.9 COMENTARIOS SOBRE LA PREPARACIÓN Y RESILIENCIA DE LOS POBLADOS Y DEL PERSONAL E INFRAESTRUCTURA ICE ...	300
9.3.10 <i>¿Qué se puede esperar en lo que resta del siglo y parte del entrante?</i>	304
10. CONCLUSIONES	310
11. RECOMENDACIONES	315
12. AGRADECIMIENTOS	322
13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	323
14. ANEXOS	356

RESUMEN

El Rincón de la Vieja ($9^{\circ}58'36.16''\text{N}$ y $83^{\circ}51'11.27''\text{W}$) es el único volcán activo de la cordillera de Guanacaste con una altitud 1916 m s. n. m. y una altura de 1500 m. Constituye un macizo estratovolcánico complejo con una docena de cráteres y conos cuspidales, así como una caldera de avalancha. Su edificio volcánico cubre un área de 400 km^2 para un volumen de 118 km^3 y una edad $\geq 564\,000$ años (= 564 ka), el cual creció posterior al colapso de al menos dos calderas de subsidencia con ignimbritas asociadas. El Rincón de la Vieja posee un registro de depósitos de tefras, coladas de lava, lahares del Holoceno relativamente bien estudiados, así como erupciones históricas freatomagmáticas y freáticas (surtseyanas y freatosurtseyanas) con actividad estromboliana subordinada. Las erupciones históricas hasta el momento han sido de poca monta, con pocos efectos en la población, la economía pecuaria (ganadería de leche), la agricultura y el turismo, o ninguno sobre las plantas geotérmicas y producción de electricidad. En el presente informe se actualizan y se analizan los peligros volcánicos (directos e indirectos). Las consecuencias más probables a mediano plazo son, en el campo proximal ($< 10 \text{ km}$ de radio), la caída de tefras, los gases, la lluvia ácida, los aerosoles; la balística y las corrientes de densidad piroclástica han estado restringidas en las erupciones históricas a $\leq 2 \text{ km}$. En la parte media ($< 10 \text{ km}$), los lahares (calientes sineruptivos y pos-eruptivos) suelen estar asociados con las erupciones, discurriendo principalmente sobre su flanco N; mientras que la lluvia ácida y las cenizas continúan siendo un peligro inherente, particularmente en su eje de dispersión W y SW. Se han registrado varios eventos prehistóricos de coladas de lava, el último relevante hace unos 5 ka y al menos uno de colapso sectorial de edad no establecida. La peligrosidad por la formación de conos piroclásticos y coladas de lava es muy baja. Sobresale una erupción pliniana del año 300 d. C. con importantes efectos por la caída de pómez hacia el WSW y de flujos piroclásticos hacia el flanco N con recorridos de al menos 12 km. Dado que ha transcurrido más de un milenio desde este evento eruptivo relevante, su probabilidad es baja. Los lahares (volcánicos, cosísmicos y secundarios) y los flujos piroclásticos representan un peligro elevado, particularmente para los turistas ilegales que ascienden al cráter Activo y, en relativo menor grado, a los pobladores del flanco N. Con base en los eventos eruptivos (mejor registro para los últimos 6000 años) se puede inferir la ocurrencia de un evento eruptivo importante (índice de explosividad volcánica con sus siglas en inglés: VEI 3-4) quizás mediados o finales del presente siglo. Dichos registros permiten analizar las posibles amenazas y riesgo a la que están expuestas las obras geotérmicas, relacionado con la caída de ceniza, oleadas piroclásticas lahares calientes y eventos más grandes, como lo son las erupciones plinianas y subplinianas, que podrían tener un periodo de recurrencia de unos 600 años. El peligro y el riesgo asociado para las obras de generación geotérmica es muy bajo, aunque no nulo. Además, el análisis de los flujos de lodos (lahares) con el programa LAHARZ indica que, en general, la peligrosidad para las obras de generación del ICE debido a de lahares es muy baja a muy baja, esto en dependencia que se presenten los factores necesarios para que se de este tipo de evento. Una serie de recomendaciones se brindan al final del trabajo, así como una síntesis de los aspectos relacionados con la gestión del riesgo. Se aportan algunas sugerencias para que puedan ser consideradas dentro de los procesos de planificación territorial y regulación del uso del suelo, aspectos turísticos y del manejo e información del Parque Nacional Rincón de la Vieja y sus áreas vecinas.

1. INTRODUCCIÓN

El volcán Rincón de la Vieja se ubica entre las provincias de Alajuela y Guanacaste, a 25 km al NNE de la ciudad de Liberia, Guanacaste. Corresponde con un estratovolcán complejo y el único con actividad eruptiva histórica en la cordillera de Guanacaste (Fig. 1.1). Su elevación máxima es de 1916 m s. n. m., y cuenta con al menos nueve focos eruptivos reconocibles en su cima (Healy, 1969). El cráter activo alberga un lago caliente e hiperácido, foco de las erupciones frecuentes.

Don José Fidel Tristán encontró la mención más antigua del nombre Rincón de la Vieja en la “Estadística de las haciendas y ganados de la provincia de Nicoya”, establecida por el vicario D. Tomás Gómez Tenorio para el cobro de los diezmos en el año de 1751 (León Fernández. Documentos, Tomo IX, p. 478; Tristán, 1921a). En esta se lee: “el Capitán don Manuel de la Zerda tiene su hacienda de Campo nombrada Santa Juana en el sitio del Rincón de la Vieja, y en él ochocientas reses de ganado mayor”. En el mapa Tallis del *Isthmus of Panama* (1848, en Villalobos, 2016) aparece escrito como Bieja [sic]. En otros textos antiguos aparece citado tanto como La Vieja o como Rincón de la Vieja (Frantzius, 1861a, 1861b).

El ilustre científico alemán. Karl von Seebach (1839-1880), exploró con tan solo 25 años la región de Guanacaste en 1864 y dejó una valiosa contribución científica sobre los volcanes, entre ellos, su ascensión al volcán Rincón de la Vieja, quizás la primera claramente documentada recién iniciado el año de 1864 (Seebach, 1865a). Con toda seguridad, el cono y el cráter que exploró el científico alemán fue el que justamente fue bautizado posteriormente con su nombre, dado que por las condiciones meteorológicas (poca visibilidad, lluvia y bajas temperaturas), no logró llegar al cráter que estuvo activo en 1864.

Muchas décadas después, se daría la primera descripción propiamente del cráter activo del Rincón de la Vieja y su lago cratérico, que fue realizada el 4 de abril de 1920, en el relato de Edgar Baltodano (Baltodano, 1920; Trejos, 1959). Durante un nuevo ascenso realizado por José Fidel Tristán y los hermanos Fernández Peralta en abril de 1922, no solo no se describe el lago cratérico (al parecer se había secado), sino que por primera vez mencionan tres conos con cráter en el Rincón de la Vieja y bautizan Von Seebach a uno de ellos (1895 m s. n. m.; cráter de unos 300 m de diámetro). Estos naturalistas a su vez establecen que los cráteres del Rincón de la Vieja se ubican en la provincia de Alajuela y no en Guanacaste.

Aunque el Rincón de la Vieja fue visitado esporádicamente por diversos naturalistas y aventureros, las investigaciones geológicas con cierto grado de detalle (mapeo, petrografía, descripción de algunos depósitos eruptivos, geomorfología) no se iniciaron hasta la década de 1980 (Barquero y Segura, 1983; Thorpe et al., 1985) y en los años subsecuentes (Boudon et al., 1996, 1997a; Bakaar, 2017; Alpízar, 2018).



Fig. 1.1: Marco geográfico y ubicación del área de estudio.

Estudios previos de peligro volcánico, el tema central que compete en el presente trabajo, fueron realizados con diferente grado de detalle (cantidad de información), escala y enfoques.

Benner (1987) realizó un mapeo geológico que le permitió caracterizar la historia eruptiva, categorizar la petrografía básica de las unidades que conforman el edificio volcánico y, lo más importante, con base en el registro estratigráfico, la topografía y las características climáticas, evaluar por primera vez las amenazas potenciales para futuras erupciones, considerando lahares, coladas de lava y caída de tefra. Este estudio excluyó la evaluación de amenazas a largo plazo.

Otros estudios fueron más localizados o focalizados a problemáticas específicas como aspectos de la peligrosidad de los lahares o de las tefras, que, aunque valiosos, no corresponden con verdaderos estudios de amenaza volcánica. Por ejemplo, Fernández et al. (1991) describieron la actividad eruptiva presentada durante los días 6 al 8 de mayo de 1991 y elaboraron un mapa de caída de ceniza a partir de los reportes realizados por los pobladores. Asimismo, realizaron un mapeo de algunas de las zonas afectadas por lahares y sus depósitos, indicando que los flujos fueron producidos por el desbordamiento de la laguna cratérica y que la amenaza volcánica más importante para el flanco N-NW, proviene de los lahares.

Boudon et al. (1996), caracterizaron los depósitos piroclásticos proximales de las erupciones de 1966-1970 y 1991-1992, e incluso realizaron un mapa de distribución para estos materiales. Además, afirmaron que la principal amenaza durante erupciones posteriores podría corresponder a flujos de lodo (lahares), que afectarían los valles localizados en el flanco norte del volcán.

Puesto que es el único volcán con erupciones históricas de la cordillera de Guanacaste, un primer estudio de los peligros y la estimación del riesgo del Rincón de la Vieja fue realizado en 1996 por la UCR, junto con el informe explicativo (mapa escala 1: 50 000), pero desgraciadamente no fue publicado (Paniagua et al., 1996). Incluye una síntesis de la amenaza volcánica considerando el marco geológico y estratigráfico, la petrografía, la geoquímica, las manifestaciones termales, las estructuras, el clima y la actividad eruptiva reciente. Los peligros volcánicos contemplados fueron por caída de piroclastos, gases, lluvia ácida, lahares, coladas de lava, corrientes de densidad piroclástica, deslizamientos (incluyendo las avalanchas de escombros volcánica) y la formación de nuevos cráteres. Concluye que la zona N del volcán es la que presenta una amenaza y vulnerabilidad mayor, aunque el riesgo mayor por eventuales pérdidas económicas se presenta en el sector occidental (un estimado en 1996 de 448.4 millones de colones). En ese momento, en la zona N estaban bajo peligro un total de 750 personas en forma directa y unas 2000 de manera indirecta. Concluyen, además, que el flanco S presenta la menor amenaza y riesgo (un estimado de 165.5 millones de colones). Adicionalmente, hicieron una serie de recomendaciones sobre las acciones a tomar antes y durante una erupción volcánica. Además, estos autores recopilieron información de las erupciones presentadas durante los siglos XVIII, XIX y XX, entre las que se reporta la ocurrencia de erupciones freatomagmáticas, emisión de gases, lahares, caída de ceniza, piroclastos y lluvia ácida (Paniagua et al., 1996). Sin duda un estudio muy completo para la época.

En ese mismo año, se publicaron los resultados de un estudio adicional sobre el peligro volcánico, basado en una tesis de doctorado (Kempton et al., 1996; Kempton, 1997). Resalta el levantamiento del mapa de distribución (mapa de espesores o isopacas) de la erupción subpliniana más grande y reciente del Rincón de la Vieja y de la peligrosidad que representan las coladas de lava, lahares, corrientes de densidad piroclástica concentrada, así como el eventual colapso parcial del edificio volcánico y del lago cratérico, particularmente a lo largo del cañón del río Cucaracho. Igualmente, los investigadores recalcan que el mayor peligro está en el flanco N del volcán (Kempton et al., 1996; Kempton, 1997; Kempton y Rowe, 2000). Kempton et al. (1996) estudiaron la geología del flanco suroeste del macizo y determinaron, a través de estudios de tamaño de grano del depósito de tefra Río Blanco, que la erupción fue subpliniana, con una columna eruptiva que alcanzó aproximadamente 16 km de altura. Además, realizaron una evaluación cualitativa de riesgos, concluyendo que las futuras erupciones de este volcán serían propensas a mantener el estilo explosivo, extendiendo la zona de mayor peligro varios kilómetros al norte del cráter activo.

Posteriormente, Aguilar y Alvarado (2014) llevaron a cabo un estudio sobre las pérdidas económicas asociadas con erupciones volcánicas en Costa Rica entre 1953 y 2005, determinando que las erupciones presentadas por el Rincón de la Vieja, durante las décadas de los sesenta y noventa del siglo pasado, ocasionaron pérdidas al sector agrícola y ganadero,

así como daños a la infraestructura vial (puentes), particularmente a raíz de la caída de ceniza, lluvia ácida y lahares.

El ICE, por su parte, ha realizado estudios detallados sobre la evaluación del peligro enfocado a los proyectos geotérmicos Las Pailas (Soto et al., 2003a) y Borinquen (Soto 2013; Alvarado et al., 2018; Fig. 1.2) o las líneas de transmisión eléctrica y subestaciones cercanas (Vargas y Alvarado, 2017). Incluyen mapas geológicos, estudios de tefroestratigrafía, dataciones de ^{14}C y nueva información sobre las erupciones recientes, incluyendo un detalle de los lahares asociados. Además, presenta un modelo computacional por distribución máxima de corrientes de densidad piroclástica (Alvarado et al., 2018; Alpízar, 2018). Sin embargo, los mapas de peligros fueron presentados sin probabilidades asignadas para cada proceso, aunque estas son discutidas ampliamente en el texto. Los mapas de peligro volcánico del 2003 y del 2013 están en escalas $\sim 1:120\,000$ y $1:200\,000$, respectivamente. Los estudios concluyen que los proyectos y obras geotérmicos así como las líneas de transmisión energética principales se encuentran fuera del área de peligro volcánico relevante ante las amenazas más probables (Soto et al., 2003a; Soto, 2013; Alvarado et al., 2018; Vargas y Alvarado, 2017), aspecto soportado por los estudios previos de la UCR (Paniagua et al., 1996) y la Universidad Texas (Kemper et al., 1996), realizados mucho antes que comenzaran las investigaciones geotérmicas de detalle en el Rincón de la Vieja.

Alpízar (2018) realiza un nuevo estudio sobre la peligrosidad volcánica del Rincón de la Vieja en tu tesis de maestría de la UCR. Allí realiza modelados más detallados de dispersión de cenizas, flujos piroclásticos y de lahares, lo cual es una notable mejora con respecto a los trabajos anteriores, además de incluir encuestas y análisis sobre la percepción del riesgo. Parte de estos resultados los publicó un año después (Alpízar et al., 2019).

En total, se contabilizan 13 estudios de peligro volcánico del Rincón de la Vieja desde 1987 hasta el 2021 con diferentes grados de detalle y enfoques. El Cuadro 1.1 resume los diversos estudios relevantes de índole geológica, sismotectónica, vulcanológica, peligrosidad, entre otros, que se han realizado por más de un siglo, siendo estos una buena base para el presente informe.

Resulta importante el traer a colación, que de los tres cantones en los que se sitúa el volcán Rincón de la Vieja (Upala, Liberia y Bagaces), únicamente existe una propuesta (no vigente) de Plan Regulador para el cantón de Upala (Municipalidad de Upala, 2012). Por lo tanto, cabe afirmar que, hoy, este volcán no cuenta de forma oficial con un mapa de peligros volcánicos, ni con una zonificación de uso del territorio que permita aplicar la gestión del riesgo ante desastres volcánicos a la planificación territorial. Entonces, las municipalidades, como entes administradores del uso del territorio, no disponen de una zonificación definida de los peligros ante el establecimiento de nuevos desarrollos.

En el presente estudio, por lo tanto, se categoriza la vulnerabilidad social a nivel de vivienda-comunidad, asociada a los peligros volcánicos del volcán Rincón de la Vieja y el peligro por comunidad ante la afectación por lahares en el distrito de Dos Ríos y Aguas Claras, del cantón de Upala. Además, se muestra cuales coberturas y usos del suelo se verían afectados ante escenarios por lahares y caída de ceniza, con la finalidad de emitir una serie

de recomendaciones sobre la planificación y ordenamiento del territorio, para una posible zonificación en el área de estudio.

Tal y como lo plantea Alpízar (2018) y se recalca en la presente investigación, el importante, pero relativamente poco explotado potencial turístico, agrícola e industrial presente en las faldas del volcán Rincón de la Vieja, principalmente en el sector norte del macizo, hace que sea de carácter urgente contar con una zonificación de uso de la tierra en la que se delimiten las zonas de mayor amenaza por la actividad volcánica, y se defina el uso más apropiado para la tierra en estos sectores. Estas acciones deben ir de la mano con un proceso de concientización sobre el riesgo, en la población que habita las zonas más expuestas a ser afectadas por una erupción volcánica. Justo para poder emitir recomendaciones, que contribuyan con el desarrollo de un proceso de zonificación integral, es que se aporta el presente estudio de peligro volcánico, elaborado con rigurosidad científica.

Al ser aún el desarrollo socioeconómico y habitacional incipiente en la región, se podría pensar que la aplicación de un plan de ordenamiento territorial, que involucre la evaluación del peligro volcánico, sería de una implementación más viable en esta zona, al tiempo que contribuiría a reducir la vulnerabilidad de las poblaciones ante futuros eventos eruptivos. Existe un plan de contingencia para el parque nacional volcán Rincón de la Vieja (CNE, 2012) elaborado con base en el mapa de peligro volcánico de Soto et al. (2003a), y se enfoca en el área de visitación del parque nacional. Sin embargo, dicho plan merece actualizarse.

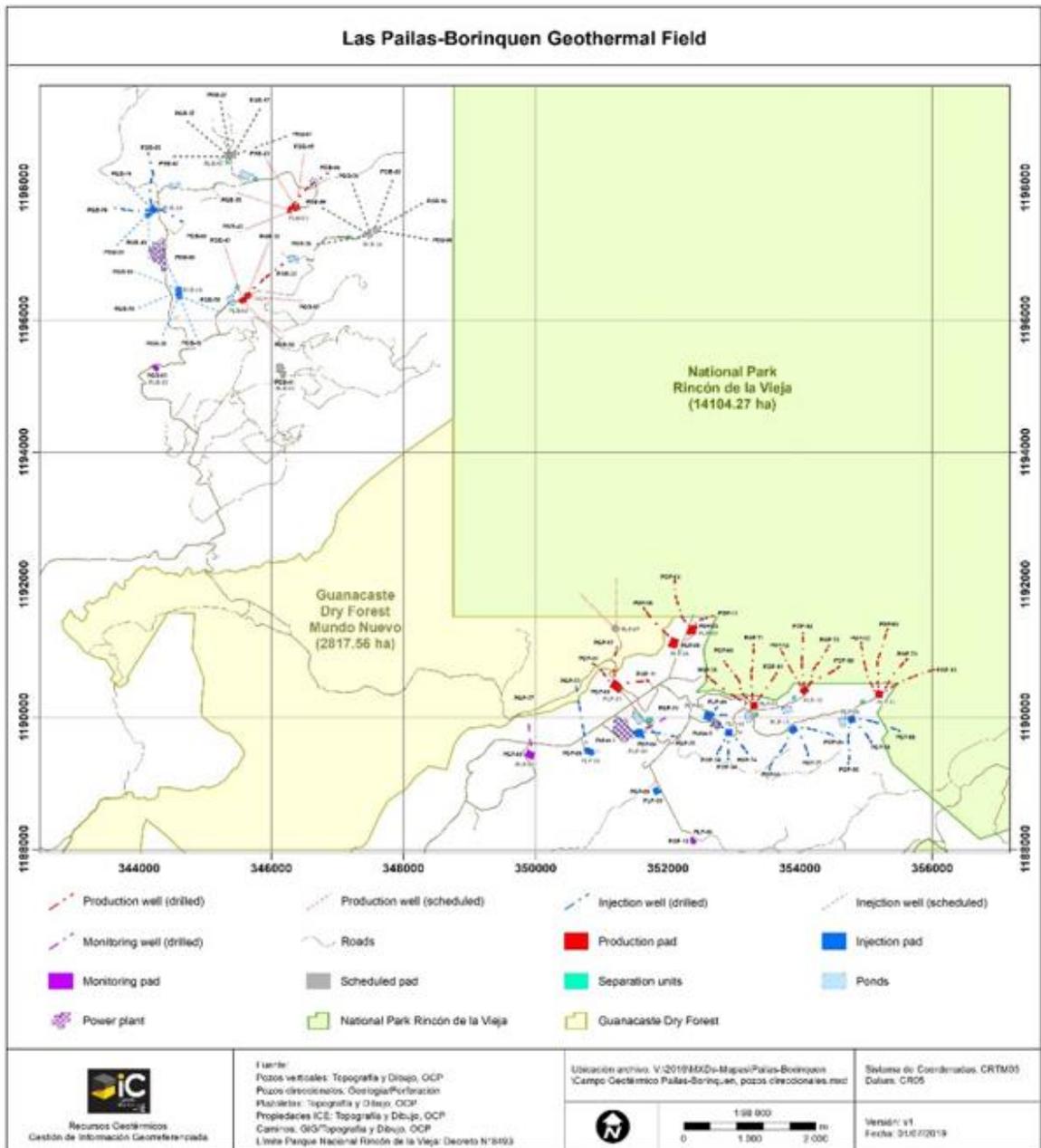


Fig. 1.6: Mapa generalizado de las obras realizada y planeadas del proyecto Borinquen (extremo superior izquierdo) y del centro de producción geotérmica Pailas I y II (parte inferior), incluyendo los pozos direccionales o dirigidos y otras obras. Se muestra parte del límite de parque nacional Rincón de la Vieja y de la reserva Mundo Nuevo (Sánchez-Rivera et al., 2020).

Cuadro 1.1: Estudios geológicos y vulcanológicos relevantes del volcán Rincón de la Vieja.

Tema	Referencias relevantes
Actividad eruptiva histórica	Montessus de Ballore (1884), Sapper (1917, 1925), González (1910), Tristán (1921), Fernández (1920b), Soto et al. (2003b), Alvarado (2000, 2021), Alvarado et al. (2018), Aguilar y Alvarado (2020), Alpízar (2018)
Geomorfología	Healy (1969), Bergoeing (1978, 1979, 1998, 2007, 2009), Alvarado (1989, 2000, 2021), Bergoeing et al. (1983, 2010), Soto et al. (2003a), Bakkar (2017)
Geología regional	ICE (1991), Alvarado y Denyer (2019)
Geología local	Kempton (1997), Barahona et al. (2001), Molina et al. (2014), Alvarado y Denyer (2019)
Geofísica	Quesada (1989); Molina (2000), Molina et al. (2014), Solís (2016), Solís y Meneses (2020)
Geocronología	Kempton et al. (1996), Carr et al. (2007), Alvarado y Gans (2012); Aguilar y Alvarado (2020)
Sismotectónica	Quesada (1989), Climent et al. (2014), Molina et al. (2014), Bakkar (2017)
Sismología volcánica	Bakkar (2017)
Gases volcánicos y desgasificación difusa	Tassi et al. (2005), Aiuppa et al. (2014), Bakkar (2017), Battaglia et al. (2019)
Geoquímica acuosa	Kempton (1997), ICE (1991), Kempton y Rowe (2000), Zimmer (2002), Zimmer et al. (2004), Tassi et al. (2005, 2009), Sáenz (2020)
Petrografía, petrología, geoquímica de rocas y minerales	Tournon (1984), Alvarado (1985), Carr et al. (1986), Kempton (1997), Funaioli y Rossi (1991), Malavassi (1991), Chiesa et al. (1994), Soto et al. (2003a, b), Schindlbeck et al. (2016a, b),
Tefroestratigrafía	Soto et al. (2003a, b), Schindlbeck et al. (2016a, b), Aguilar y Alvarado (2020)
Dispersión de cenizas	Campos (1997), Alpízar (2018), Alpízar et al. (2019)
Estudios de peligro volcánico	Benner (1987), Paniagua et al. (1996), Kempton et al. (1996), Kempton (1997), Kempton y Rowe (2000), Soto et al. (2003a), Soto (2010, 2013), Soto y Martínez (2016), Vargas y Alvarado (2017), Alvarado et al. (2018), Alpízar (2018) y Alpízar et al. (2019).
Estimación de pérdidas	Paniagua et al. (1996), Aguilar y Alvarado (2014), Abarca y Alvarado (2017)
Planes de emergencias/contingencias	CNE (1991, 2012), CNE-CMEU (2019)
Percepción del riesgo	Vargas et al. (2017), Leyton (2020); Alpízar (2018) y Alpízar et al. (2019)

Así pues, surge la pregunta válida: ¿qué sentido o aporte tiene el realizar un nuevo estudio? La respuesta se puede desglosar en cuatro puntos principales, que se desarrollan a continuación:

a) Enfoque en el peligro y gestión del riesgo: Diversos estudios, aunque valiosos e innovadores, tienen varios años de haberse realizado; dentro de los más completos son los de Paniagua et al. (1996), Soto et al. (2003a), Alvarado et al. (2018) y Alpízar (2018). Desgraciadamente, dichos trabajos poseen poca distribución y no contaban con las nuevas edades de radiocarbono (Aguilar y Alvarado, 2020) y las 6 nuevas edades incluidas en el presente informe. Más que todo, se enfocaron en una actualización sobre los efectos, así como la utilización de nuevas herramientas computacionales. El presente trabajo trata de sintetizar todas estas diferentes visiones y aplica nuevas técnicas de evaluación del peligro y su zonificación. Dentro del enfoque de la gestión del riesgo, resulta de vital e imperante importancia el modelado de los lahares y de los flujos piroclásticos, así como su afectación hacia el sector caribeño, tal y como se desarrolla en el presente estudio y la evaluación de la peligrosidad volcánica de las obras ICE en el flanco Pacífico.

b) Nueva información: Se debe de tener presente que todos estos estudios contaban, hasta finales del 2020, con 9 dataciones de radiocarbono y que dichas edades fueron la base para la cronoestratigrafía de los últimos 20 000 años. El presente trabajo aporta 6 nuevas edades de radiocarbono, reinterpretación geomorfológica y trabajo de campo, que reescribe parte de la historia geológica Holocena, tanto explosiva, efusiva y volcanosedimentaria. Lo anterior es fundamental dentro de los requerimientos y recomendaciones internacionales para los estudios de peligro volcánico, aunque se comprende que no siempre se cuenta con los medios económicos para poder cumplir con este requisito técnico y otros faltantes. Otro aspecto relevante es que el territorio carece de un plan regulador, por lo que no se han podido realizar zonificaciones sobre los usos de suelo enfocada a la reducción del riesgo de dichos peligros volcánicos (Municipalidad de Upala, 2020). Se puede mencionar de esta manera que, dicha municipalidad, carece de un instrumento que le permita generar una zonificación en las comunidades afectadas por los peligros volcánicos, como un mecanismo que regule el uso del suelo, en relación con la planificación y ordenamiento del territorio (Alpízar, 2018). Esto genera una alta vulnerabilidad de las poblaciones localizadas en las comunidades del cantón de Upala, además, del riesgo asociado a los peligros volcánicos, sobre todo si se toma en consideración que los permisos de construcción asignados por el gobierno local se otorgan con base en el mapa de riesgos y peligros naturales generado por la CNE (Municipalidad de Upala, 2020). En la presente investigación se generaron como insumos, mapas de amenazas y sobre las coberturas y usos del suelo, del nivel de vulnerabilidad de las viviendas y comunitario, e índice de peligro asociado a la afectación por lahares. Dicha información será un insumo valioso para la toma de decisiones sobre la implementación de un sistema de alerta temprana, la gestión del riesgo por parte del Comité Comunal de Emergencias, así como también, la planificación territorial de las comunidades.

c) Integridad: El presente estudio no solo integra y actualiza todos los estudios previos (incluyendo información valiosa inédita o restringida en informes internos y tesis), al tomar las contribuciones relevantes de cada uno, sino que, además, analiza y revisa con criterios tefroestratigráficos, geológicos, tectónicos y geocronológicos la actividad pasada del volcán (últimos 11 ka). Por su parte, se considera el real alcance del término peligrosidad, al englobar la probabilidad de ocurrencia.

d) Validación institucional: Relevante es que el borrador del presente estudio fue entregado para su revisión al Comité Asesor Técnico (CAT) de Sismología y Vulcanología con representantes de la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE) y del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA), así como por el parque nacional Rincón de la Vieja (PN Rincón de la Vieja) del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) y el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT) de la UNA.

El propósito del presente informe fue el aumentar el grado de comprensión de los peligros volcánicos y sus incertidumbres, como una base para la gestión de los riesgos actuales y futuros, en todas las escalas, tanto espaciales como temporales. Mediante una serie de enfoques, incluyendo la modelación, se espera que se logre aumentar el grado de comprensión de la naturaleza multidimensional y las interacciones dinámicas de los peligros y sus riesgos, con el fin de poder afrontar los sistemas críticos, tales como las líneas vitales, la economía y salvaguardar la vida y la salud humana.

Se debe reconocer que es posible lograr una reducción del riesgo si se comprenden y abordan los patrones y los contextos fundamentales de vulnerabilidad y exposición. La frecuencia o recurrencia con la que ocurren los eventos, sin embargo, si posee una incertidumbre conceptual mucho mayor, la cual justamente es la que incide en la probabilidad, parámetro que define en buena medida la peligrosidad de un tipo de evento particular. Para ello, se trató de determinar el nivel de vulnerabilidad social y el riesgo comunitario en los distritos de Dos Ríos y Aguas Claras ante la amenaza de los peligros volcánicos generados por el volcán Rincón de la Vieja, para la toma de decisiones del Comité Comunal de Emergencias sobre la gestión del riesgo y la planificación territorial. Con el fin de cumplir con este objetivo, se planteó delimitar la cobertura y el uso de suelo de las comunidades afectadas por la actividad volcánica producida por el volcán Rincón de la Vieja, para la identificación de las actividades agroproductivas y turísticas en ambos distritos. Además, de diseñar un índice de riesgo volcánico ante la afectación de lahares para las comunidades de los distritos Dos Ríos y Aguas Claras, para finalmente, elaborar una serie de recomendaciones hacia el Comité Local de Emergencias y la Municipalidad de Upala, sobre la planificación territorial del área de estudio.

También, en un futuro cercano se espera incluir la figura del vigilante volcánico en las comunidades alrededor del volcán Rincón de la Vieja, eno donde representantes de la comunidad van a ser capacitados sobre los peligros volcánicos y serán los encargados de tomar muestras de ceniza, gases y características del agua, como una forma de involucramiento entre las instituciones y la sociedad, para así, generar ciencia ciudadana con la participación y la generación de información química sobre el ambiente volcánico.

En general, se considera que el presente estudio será de gran valor para el desarrollo de estrategias para la aplicación de la información en los planes reguladores municipales y el plan general de manejo del PN Rincón de la Vieja.

Aparte de las obras de generación geotérmica Pailas I y II, el proyecto geotérmico Borinquen está en proceso de construcción desde el año 2016 y ya tiene un 34 % de avance con la perforación de pozos y obras colaterales. Se estableció el inicio de la construcción y montaje el equipo electromecánico y sistemas auxiliares para el año 2025. La finalización de la obra y entrada en operación comercial de la Planta está en este momento para el primer semestre de 2027, sin embargo, existe un grado de presión para que pueda salir antes, es decir, a finales del 2026. De ahí la importancia en una actualización de la amenaza volcánica para estas obras vitales de generación eléctrica en la región de Guanacaste.

Además, ayudará a la concientización de los gobiernos locales en el uso y la divulgación de las amenazas volcánicas frecuentes, como una medida anticipada, así como promover el acervo de datos e información digital y en línea para todos de forma eficaz y confiable (digital y accesible a la población y desarrolladores en la Web de la CNE), con el fin de prever e informar sobre la exposición de la población al riesgo volcánico.

Al final, se vierten una serie de recomendaciones que podrían ser paulatinamente acatadas en el corto plazo, algunas de ellas, incluso, ya se están poniendo en práctica.

1.1 MARCO GEOGRÁFICO

Desde al menos mediados del siglo XIX, el área cratérica ha sido visitada por nacionales y extranjeros como un paseo de entretenimiento, con la finalidad de admirar su paisaje y naturaleza. La travesía originalmente se hacía a caballo y después a pie con una duración de unas 6 horas de ascenso hasta la cumbre.

El volcán Rincón de la Vieja se ubica en línea recta a 25 km al nor-noreste de Liberia, entre las provincias de Alajuela y Guanacaste, de las cuales comprende parte de Liberia y Upala, respectivamente (Fig. 1.3). Abarca parte de las hojas topográficas Curubandé y Cacao (escala 1: 50 000) del instituto Geográfico Nacional (IGN).

Para acceder al Parque Nacional Rincón de la Vieja se cuenta con una carretera asfaltada y en relativamente buenas condiciones. Desde San José se toma la autopista General Cañas o la Ruta 27 con dirección a Liberia (distante 199 km y unas 3 hora de viaje) y se continúa por unos 5 km al norte sobre la carretera; aquí se toma hacia el NW por una carretera de lastre de 20 km hasta llegar a la entrada del parque nacional. Por las características de los caminos se recomienda utilizar vehículo de doble tracción. El tiempo de manejo desde San José (199 km) es de unas 4-5 horas y desde Liberia unos 30-45 minutos en recorrer una distancia de 26 km.

También se puede visitar los alrededores del volcán en su sector pacífico, incluyendo los poblados de Cañas Dulces y Curubandé, así como varios hoteles e instalaciones con

fuentes termales. Lo mismo se puede realizar en su flanco caribeño, entre los poblados de Dos Ríos y Buenos Aires, donde también hay hoteles, cabinas y lugares termales, así como gran cantidad de cascadas.

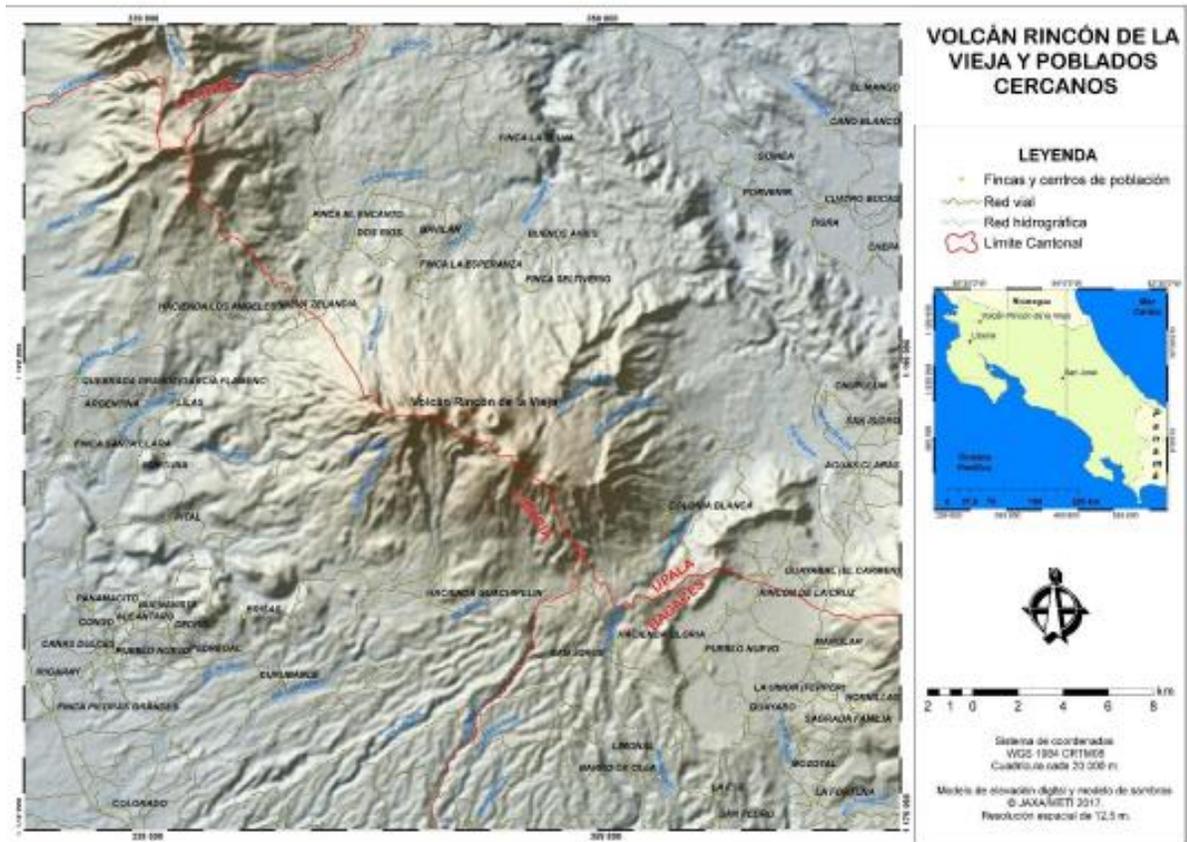


Fig. 1.3: Marco geográfico del volcán Rincón de la Vieja (Alpízar, 2018).

Rincón de la Vieja fue creado como parque nacional por Ley N.º 5398 del 23 de octubre de 1973 y formalizado el 16 de noviembre de ese año, con el fin de proteger y conservar las cuencas hidrográficas que abastecen de agua a la ciudad de Liberia, así como a la flora y fauna que aquí se encuentran (Fig. 1.4). Forma parte del Área de Conservación Guanacaste (ACG) y además es catalogado como Patrimonio de la Humanidad. El parque se encuentra ubicado en la parte noroeste de Costa Rica, y comprende un complejo volcánico abarcando los volcanes Rincón de la Vieja y Santa María, así como el cono Von Seebach. Su extensión es de 14 300 hectáreas. Se encuentra dividido en dos sectores de visitación turística: a) el Sector Las Pailas ubicado en el extremo occidental del parque y b) el Sector Santa María se localizó en el extremo suroeste del parque, que fue desde finales del siglo XIX y hasta 1973 una de las haciendas más grandes de la zona.

Debido a la actividad volcánica, y por recomendación de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), desde 2012, el sendero de turistas que conduce hacia el sector del cráter Activo se encuentra cerrado (Arguedas, 10 de abril de

2016). Para realizar este tipo de recomendaciones al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), la CNE cuenta con criterios técnicos obtenidos a través del Comité Asesor Técnico en Vulcanología y Sismología (Ley N° 8488).

Entre las zonas de vida en los alrededores de Cañas Dulces y el flanco pacífico del Rincón de la Vieja se puede mencionar que se encuentra presente el Bosque húmedo tropical y Bosque húmedo tropical transición a Pre-montano. Los niveles promedio anuales de precipitación varían desde 3200 mm en las zonas altas del macizo volcánico hasta los 1400 mm en las partes bajas, zona que a la vez en la época seca o de estiaje se ve influenciada por los vientos del NE o alisios de esa época del año que dominan en intensidad y frecuencia.

Los principales ríos en el flanco Pacífico son Salitral, Ahogados y Tizate. Estos ríos nacen en la ladera suroeste del volcán Rincón de la Vieja a una altura de 1800 m. s. n. m. aproximadamente y forman parte de la subcuenca del río Ahogados, que a su vez es tributaria del río Tempisque.

La cobertura actual presenta los siguientes ecosistemas: herbazal (potrero), herbazal arbolado (potrero arbolado), matorral (charral) y bosque que incluye tres tipos: maduro, ripario y secundario. A continuación, se realiza una descripción general del flanco sur basado en el informe del ICE (2013). En general, la mayoría de los terrenos contienen gran cobertura boscosa que ha sido intervenida. La vegetación principal de este tipo de vegetación la constituyen los pastos mejorados tales como *Brachiaria brizantha* y *B. decumbens*, al igual que pastos naturalizados de jaragua (*Hyparrhenia rufa*) y estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en asocio con otros nativos como jengibrillo (*Paspalum notatum* y *P. conjugatum*). En el caso de potreros arbolados el componente arbóreo en la zona de vida bosque húmedo tropical transición a premontano, lo componen individuos aislados de especies arbóreas remanentes del bosque original como carey (*Elaeouma glabrecens*), zapotillos (*Pouteria* spp.), cuero de vieja (*Mortonioidendro s. anisophyllum*), manteco (*Trichilia irta*), higuerones 12 (*Ficus* spp.), aguacatillos y quizarras (*Nectandra hypoleuca*, *N. umbrosa* y *Ocotea stenoneura*), ocoras (*Guarea* spp.), entre otros. El charral está compuesto por vegetación arbustiva con algunos árboles dispersos. En algunas zonas más abiertas con alta luminosidad hay pasto jaragua (*Hyparrhenia rufa*) pero predomina la vegetación arbustiva de especies como rabo de zorro (*Stachytarpheta jamaicensis* y *S. frantzii*), *Cordia guanacastensis*, *Croton morifoliosus*, cinco negritos (*Lantana camara*), caregre (*Lippia oxyphyllaria*), dormilona (*Mimosa pudica*), cornizuelo (*Acacia collinsii*), rabo de ratón (*Piper marginatum*) amapola (*Malvaviscus arboreous*), son algunas de ellas.

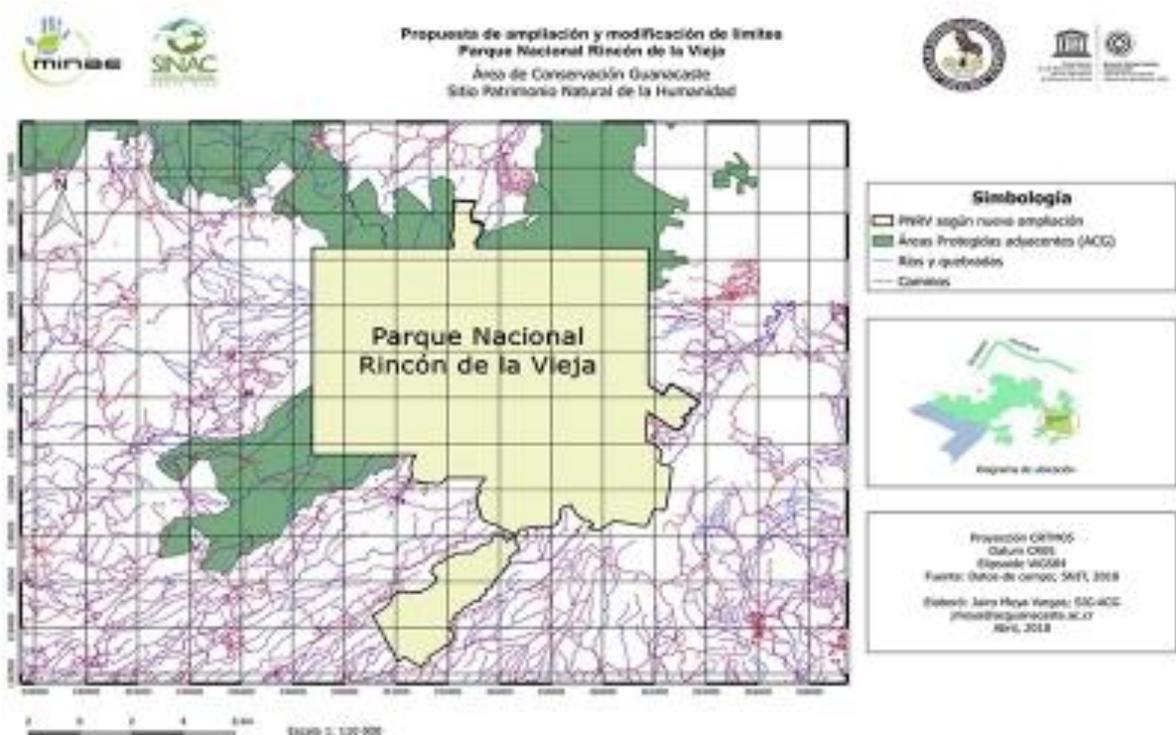
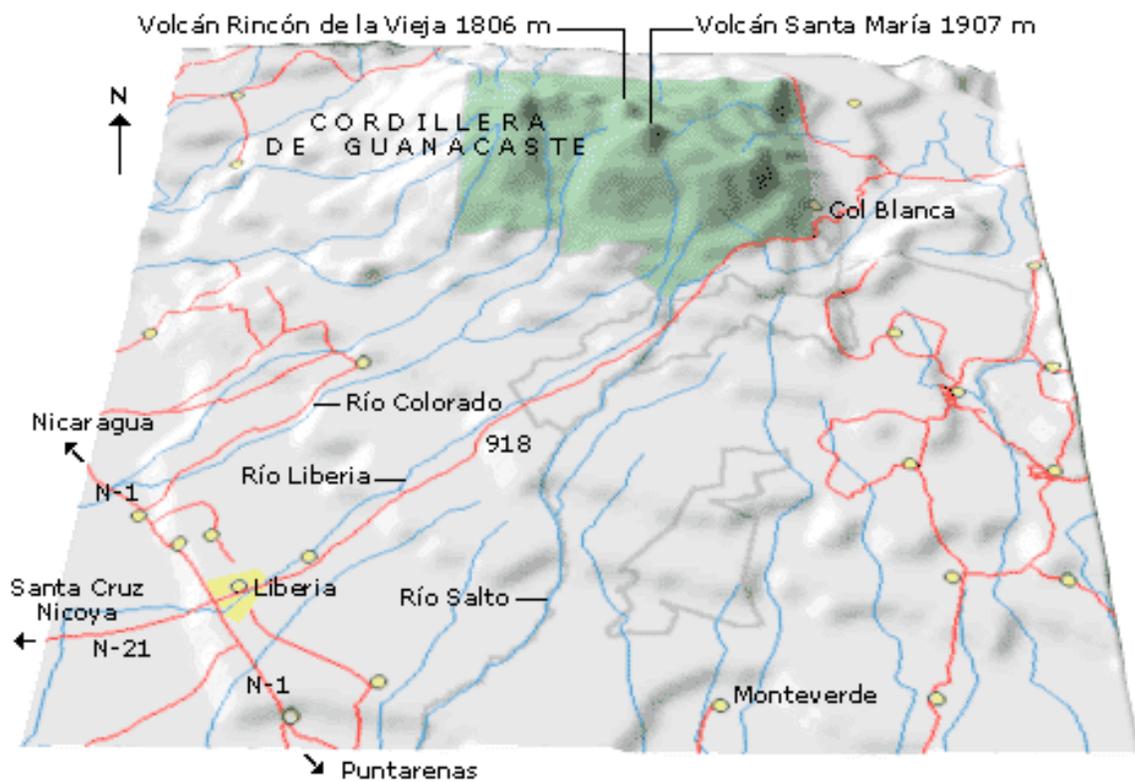


Fig. 1.4: Límites del Parque Nacional Rincón de la Vieja (tomado de internet) y algunos poblados en su sector pacífico.

El bosque maduro posee una diversidad florística y estructura vertical diversa y compleja con tres estratos bien definidos, el dosel o estrato superior, estrato intermedio de 10 m a 25 m de altura, los cuales en su mayoría poseen frutos apetecidos por la fauna silvestre.

El piso del sotobosque es ralo en vegetación donde se camina fácilmente y abundan arbustos de varias familias como Piperaceae con anisillo, hoja de estrella y rabos de ratón. Este bosque maduro es un ecosistema de alta biodiversidad en equilibrio ecológico, su estrato superior presenta dominancia de especies arbóreas de gran porte pertenecientes a las familias Moraceae, Lauraceae y Sapotaceae, las cuales desempeñan un rol sumamente relevante al brindar alimento y refugio a gran variedad de avifauna y mamíferos pequeños que constituyen presas importantes para el mantenimiento de la megafauna incluyendo los felinos, actualmente en peligro de extinción. El bosque ripario se encuentra en las márgenes del río Salitral localizado a menor altitud en la zona de vida bosque húmedo Tropical, con una menor humedad y así lo evidencia la presencia de especies arbóreas como guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), guapinol (*Hymenaea courbaril*), guácimo (*Guazuma ulmifolia*), entre otras. El bosque secundario se encuentra en una fase intermedia de la sucesión natural, con dos estratos y una diversidad florística baja con predominio de especies arbóreas heliófitas y esciófitas parciales. En el sotobosque predomina la vegetación arbustiva junto con regeneración natural de especies arbóreas del dosel (ICE, 2013).

La época seca se limita a los meses de febrero y marzo. En el mes de julio y principios de agosto se produce una disminución en la precipitación, conocida como “la canícula o veranillo de San Juan”, el puede durar de una a tres semanas, sin embargo, es menos marcado que en el Valle Central Occidental o la vertiente del Pacífico (Clima en Costa Rica: <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica>). Presenta un clima variado, según la altitud de las tierras. En las llanuras costeras su clima es cálido y húmedo, con una temperatura de 28°C. En el interior de la meseta central, la temperatura anual varía entre los 15 °C y los 25 °C y a partir de los 2000 m, el clima es frío (Clima en Costa Rica: <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica>).

La zona ubicada en el flanco norte del volcán Rincón de la Vieja (FNVRV), se caracteriza por ser caliente durante todo el año, donde la temperatura varía entre los 18 a 30 °C. Las condiciones climáticas durante la temporada de lluvia por lo general son nubladas y con densas precipitaciones. La precipitación registrada en la zona durante el periodo de estudio indica que la estación seca abarcó desde mediados del mes de diciembre 2018 a mediados de mayo 2019 (Fig. 1.5). La estación lluviosa inició desde mediados de mayo 2019. La precipitación diaria máxima en la época lluviosa en promedio no superó los 150 mm. Durante la época seca, la precipitación diaria promedio durante el periodo de muestreo para este estudio fue inferior a los 40 mm (Sáenz, 2020).

Los ríos Ahogados y Cucaracho limitan el macizo del Rincón de la Vieja en su flanco occidental mientras que la quebrada Provisión y el río Caño Negro lo limitan en el oriente. En el flanco pacífico del volcán, varios ríos y quebradas drenan desde el volcán, sobresaliendo los ríos Negro, Colorado, Blanco, Tizate y Salitral, así como las quebradas Zopilote, Azufrales, Zanja Tapada, Tibio y San Antonio. Varias quebradas que nacen en el flanco occidental tales como la Honda, Campos Azules, La Ré, Lucía y Granadilla, que

confluyen hacia el río Ahogados, que desagua a su vez en el río Tempisquito. En cambio, las diversas quebradas que nacen en el flanco oriental del Rincón de la Vieja desembocan en el río Caño Negro que drena la Caribe. En el flanco caribeño, sobresalen los ríos Cucaracho, Blanco, Azul, Pénjamo y Negro, así como las quebradas Azufrosa, Azufrada y Zanjonuda, todos ellos drenan al cañón del río Cucaracho.

En las comunidades bajo estudio se desarrollan tres actividades laborales principales: a) la ganadería de leche, b) la actividad turística bajo un sistema de ecoturismo y c) la actividad laboral que se desarrolla en los centros de producción de energía geotérmica. Estas actividades se pueden ver afectadas de manera directa o indirecta ante escenarios con presencia de lahares y caída de ceniza, por lo que se hace necesario determinar el nivel de vulnerabilidad social que posee su población y el riesgo asociado a la presencia de lahares y caída de cenizas, pues, es el peligro de mayor frecuencia que afecta a las comunidades.

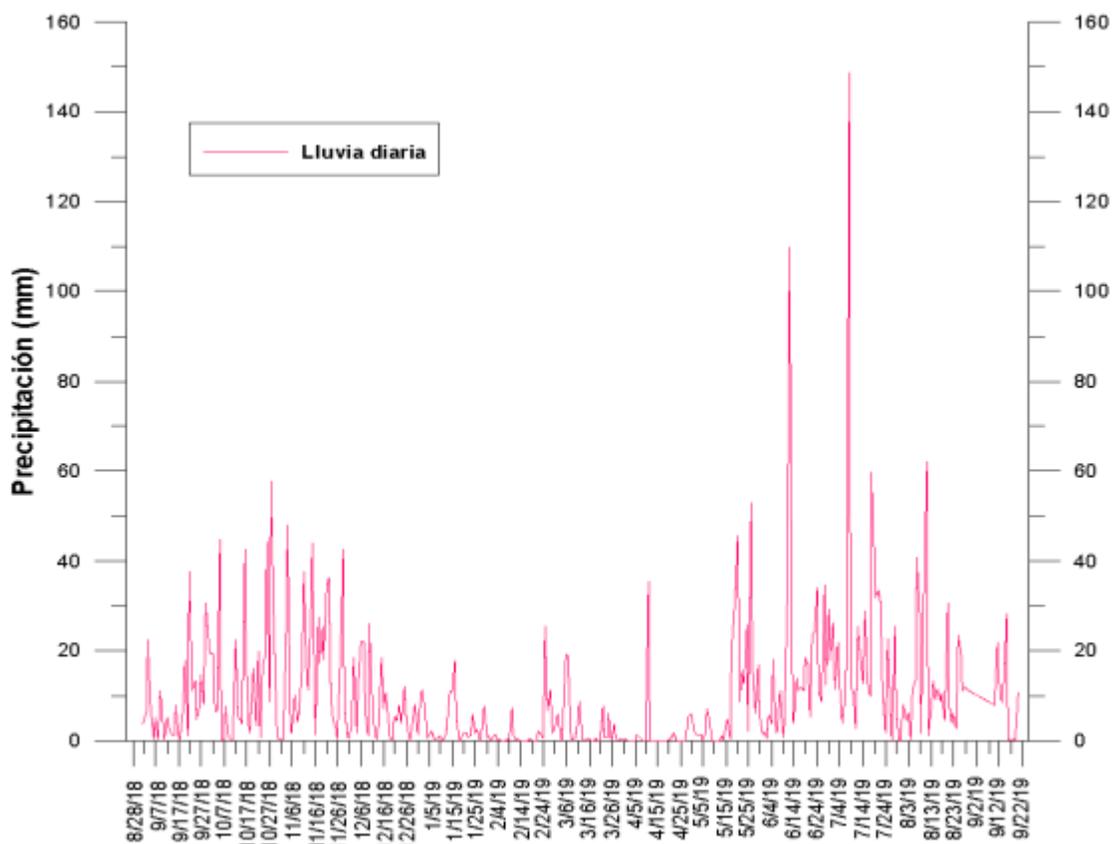


Fig. 1.5: Precipitación registrada en la zona del estudio desde setiembre 2018 a setiembre 2019 en estación de San Cristóbal, Dos Ríos de Upala, Área de Conservación Guanacaste (Sáenz, 2020).

1.2 LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS PAILAS Y BORINQUEN

A la fecha se han perforado 27 pozos profundos en el sector de Las Pailas y cinco en el sector de Borinquen (Fig. 1.6 y 1.7). Una planta geotérmica se desarrolló en julio del 2011, la de Las Pailas I, con una generación de 35 MW netos, atendiendo el consumo eléctrico de 95 000 hogares. En abril del 2013 inició la construcción y entró en operación comercial en el 2019 el proyecto geotérmico Las Pailas II de 55 MW (ICE, 2015). Pailas II se convirtió en la sexta planta geotérmica de Costa Rica y con ella se benefician 137 mil hogares. Las Pailas II empleó sus pozos (12 pozos de producción y 9 de reinyección) distribuidos en seis plataformas (las plataformas son las plazoletas desde donde se pone la máquina de perforación profunda), pero construidos con la tecnología direccional, es decir, desde una misma plataforma se pueden perforar varios pozos geotérmicos en diferentes direcciones. Dicho de otra manera, esta tecnología consiste en que, en lugar de perforar de modo vertical, se permite hacer una desviación con lo que alcanzará el reservorio o yacimiento geotérmico con una mayor facilidad. Además, disminuye los efectos en la superficie, al utilizar una sola plataforma para ubicar varios pozos. La casa de máquinas no solo ocupará un espacio menor a las que ya operan en el país, sino que empleará un novedoso sistema de paneles de concreto liviano, para mejorar el aislamiento del sonido de los equipos. Entre otras obras, Las Pailas II comprende un sistema de acarreo, una subestación eléctrica y una línea de transmisión de 230 kv y 2 km de largo (ICE, 2015; Sánchez-Rivera et al., 2020).

En los proyectos geotérmicos previos anteriores se construyeron torres de enfriamiento en concreto y madera, pero nunca en fibra de vidrio que, a su vez, disminuye la inversión del proyecto y baja los costos de operación. La construcción de la torre de enfriamiento (16.5 m de altura; 1500 m²) posee como innovación el uso de la fibra de vidrio, que representa un ahorro de materiales y un menor impacto ambiental. Esta obra tiene la función de disminuir la temperatura del líquido condensado proveniente del escape de la turbina (ICE, 2015).

Además, ya se concluyó la factibilidad del sector de Borinquen I, donde se plantea la futura instalación de dos unidades de 55 MW cada una. Tal y como se dijo al principio, Borinquen está en proceso de construcción desde el año 2016 y ya tiene un 34 % de avance con la perforación de pozos y obras colaterales. Se estableció el inicio de la construcción y montaje el equipo electromecánico y sistemas auxiliares para el año 2025. La finalización de la obra y entrada en operación comercial de la Planta está en este momento para el primer semestre de 2027, sin embargo, existe un grado de presión para que pueda salir antes, es decir, a finales del 2026. Si se llegara a desarrollar los campos geotérmicos Borinquen, se añadirán dos plantas más en el 2027, lo cual aumentará la capacidad instalada en estas fuentes de energía a 372 MW en el país.

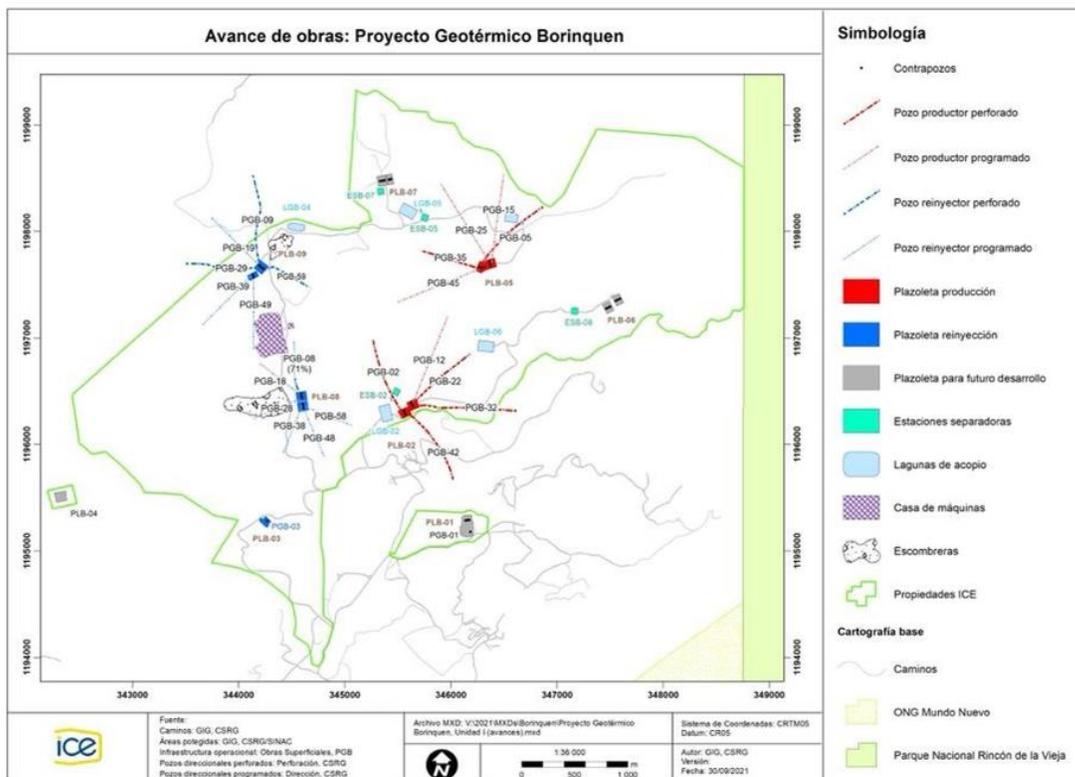
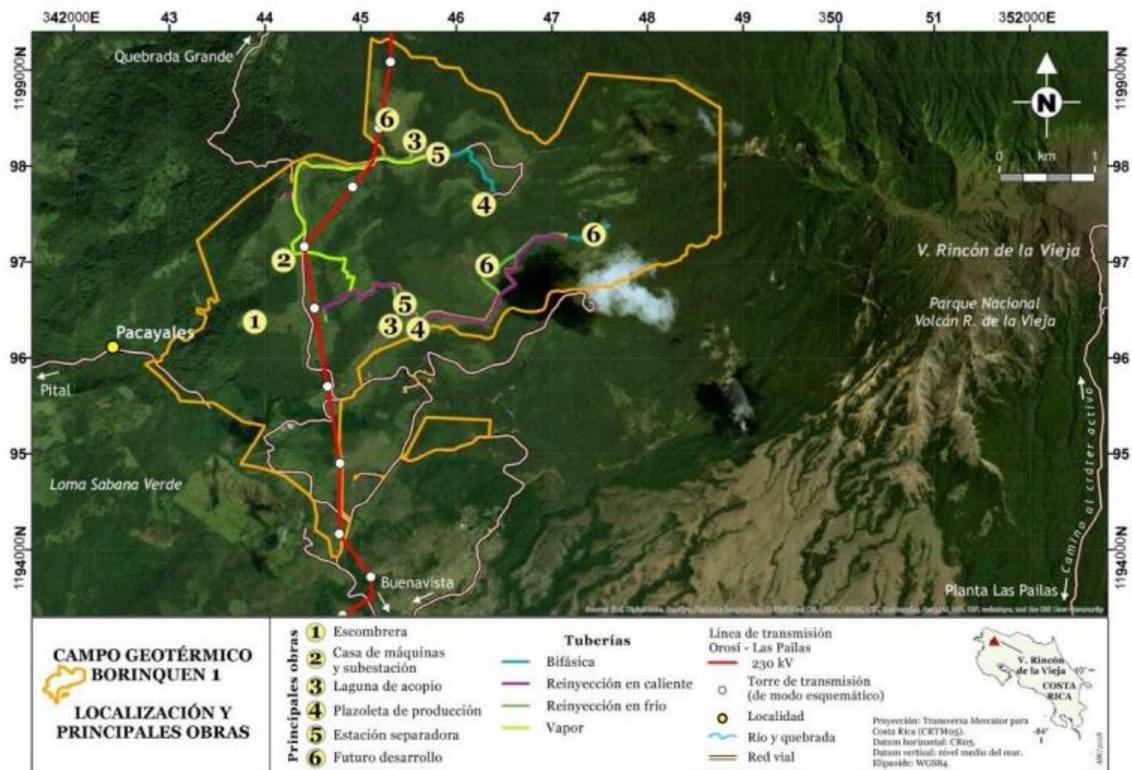


Fig. 1.6: Ubicación del proyecto geotérmico Borinquen y las obras principales (Alvarado et al., 2018; Sánchez-Rivera et al., 2020).

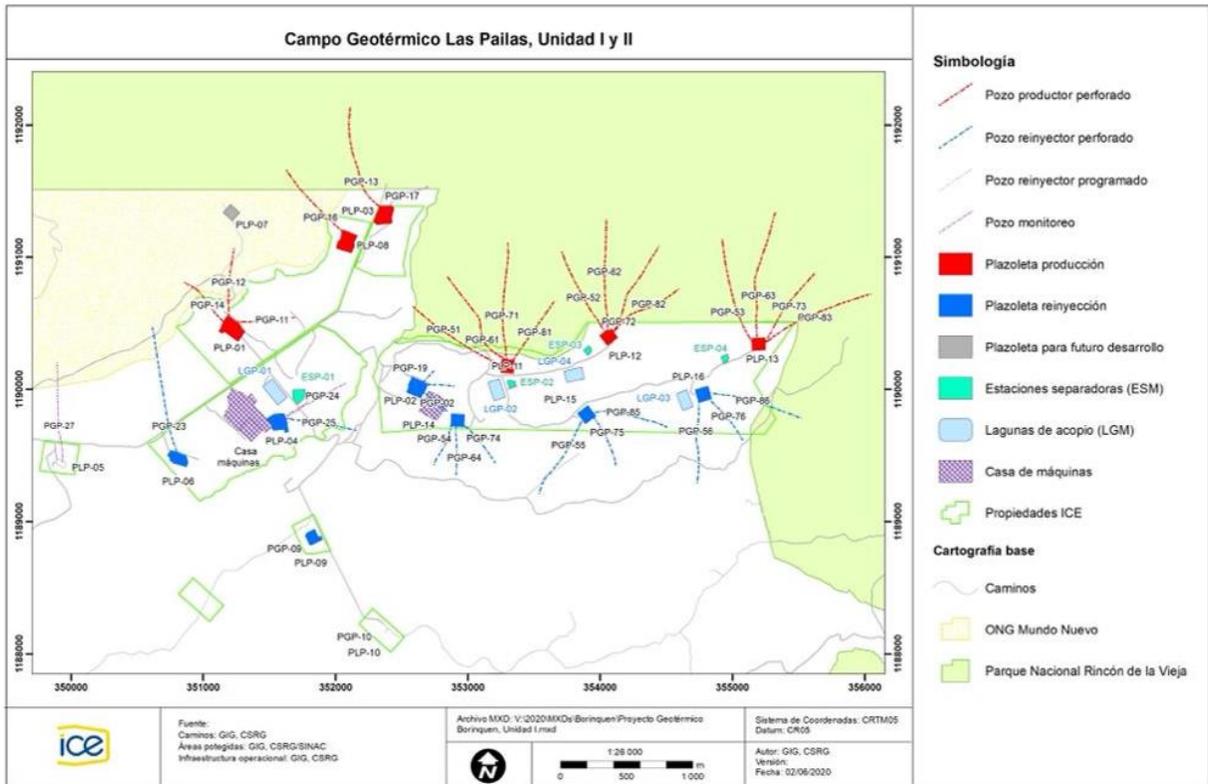


Fig. 1.7: Ubicación del centro de producción geotérmica Pailas I y II y las obras principales (Sánchez-Rivera et al., 2020).

2. METODOLOGÍA

Los estudios de peligro volcánico abarcan diferentes ramas de la geología (geología de campo, geocronología, tefroestratigrafía y geostatística), en donde la utilización de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los modelos computacionales son muy valiosos para el reconocimiento y la evaluación de este, presentándose generalmente diferentes escenarios de bajo, medio y máximo peligro. Los escenarios analizados presentan las diferentes situaciones y las áreas con mayor probabilidad de ser afectados ante cada tipo de peligro, sino que se incluyen plazos (recurrencia y probabilidad de erupción). Sin embargo, todos los estudios de detalle requieren de un soporte económico y tiempo para poder realizar los trabajos necesarios que los sustenten.



Fig. 2.1: Metodología aplicada (Tomado de Alpizar, 2018).

Revisión bibliográfica: Se recopiló información bibliográfica extensa con el fin de conocer los trabajos previos sobre este tema, abarcando las diferentes ramas de la geología como la geomorfología, la tectónica y la sismología. Se consultaron textos y mapas, tanto en físico como en digital, ubicados en la base de datos de la biblioteca de Geología de la Universidad de Costa Rica, bibliotecas privadas e información académica de la RSN: UCR-ICE y del OVSICORI-UNA. Se le dio particular énfasis a la temática de los peligros volcánicos que ha presentado históricamente el volcán del Rincón de la Vieja y la afectación de estos a las comunidades localizadas en el flanco norte.

Levantamiento y mapeo geológico: Por su parte, se realizó trabajo de campo para el levantamiento y descripción de cortes geológicos y observación de la geomorfología. Para el análisis morfotectónico del macizo del Rincón de la Vieja, se utilizaron fotografías aéreas de *drone*, también las tomadas con cámara manual. Varias columnas tefroestratigráficas relevantes fueron realizadas.

Información satelital: Se utilizó imágenes satelitales de *Google Earth*, pares estereoscópicos de fotografías aéreas del proyecto TERRA y sobrevuelos del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Para la creación de mapas, se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG), como ArcGis e imágenes satelitales ALOS PALSAR con resolución de 12.5 m (ASFDAAC, 2015); también una base topográfica con curvas de nivel extraídas del IGN (2016). Estos mapas tienen una escala 1:25 000, con curvas guía cada 20 m y auxiliares cada 10 m, lo que permitió la generación de modelos de sombras y de elevación digital (MED). Se obtuvo 50 imágenes satelitales, con una resolución espacial de 1 m y 3 bandas espectrales, sin embargo, parte de los inconvenientes presentados para realizar el procesamiento de las imágenes, es el efecto Fohn en el lado norte de la Cordillera Volcánica de Guanacaste, debido a la influencia del Lago de Nicaragua (Barrantes y Castillo, 2011), el cual genera nubosidad, lo que dificulta el proceso de la toma de los datos espaciales. Por ello es necesario realizar trabajo de campo con el fin de confirmar vía terreno ciertos tipos de usos presentes en el territorio.

Dataciones de radiocarbono: Se recolectaron 6 muestras de suelos con diferentes contenidos de materia orgánica para seleccionar los prioritarios con el fin de determinar la edad absoluta con C-14 de los productos eruptivos recientes. Las muestras que se utilizaron estuvieron constituidas de paleosuelos café y troncos de madera. Algunas muestras seleccionadas, sin embargo, no tenían suficiente materia orgánica antigua para datar, por lo que fueron substituidas por otras. Las nuevas seis dataciones radiométricas fueron realizadas en los laboratorios de la empresa International Chemical Analysis Inc. (10001 Lewis Dr Suite A-100, Damascus, MD 20872, EE. UU.) mediante la datación con espectrometría de masas con aceleradores (AMS). Las muestras fueron empacadas con cuidado, sin tocarse con las manos y se colocaron en papel de aluminio para evitar su contaminación con carbono procedente de las bolsas de muestreo y del ambiente. Ya en el laboratorio, se extrajo la fracción orgánica de la muestra mediante su tamizado y un baño ácido para eliminar los carbonatos. En esa fracción orgánica se midió la razón $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ utilizando un acelerador de partículas. El programa de calibración de las dataciones de radiocarbono fue realizado utilizando el programa 288 INTCAL20 (Reimer et al., 2020). Una explicación más detallada

del procedimiento de análisis se puede consultar en la web de una de las empresas dedicadas a este método radiométrico ([https:// www.radiocdating.com](https://www.radiocdating.com)).

La distribución estratigráfica y espacial de las muestras según el interés estratigráfico y problema a resolver, permitió optimizar los resultados de las dataciones y asignar una edad cercana a los productos explosivos. Así, las nuevas dataciones de radiocarbono tenían por objetivo el siguiente: a) reconfirmar la edad del flujo piroclástico más grande y reciente del Rincón de la Vieja, b) datar niveles pumíceos antiguos, c) datar una discordancia eruptiva importante entre las tefras Holocenas y las previas, d) datar de modo indirecto y directo los dos campos de lavas más recientes y e) datar eventos laháricos antiguos. Dichas dataciones complementarían el cuadro cronoestratigráfico de los eventos más importantes previamente identificados por Aguilar y Alvarado (2020).

Estimación de la concentración de partículas en el aire: Se realizó una estimación de las emisiones anuales del volcán Rincón de la Vieja, con base en el modelo computacional AERMOD. Se tomaron datos meteorológicos de 10 años de zonas alrededor del volcán, ya que no hay un registro de valores del propio lugar. Se estimó una emisión de partículas (ceniza) y de dióxido de azufre (SO₂) de 30 kg/s y de 1000 ton/día, respectivamente. Los mapas que se generaron son de concentración de material particulado suspendido en el aire (PTS) y del gas SO₂ en el aire y en la lluvia, para un mes y a nivel anual. El modelo tiene un alcance de 50 km a la redonda.

Modelado de lahares: Para el modelado de los lahares se han elaborado modelos determinísticos de afectación utilizando la herramienta Laharz (Schilling, 1998). Este programa utiliza un método objetivo y reproducible para la previsión de los límites de inundación laterales y distales que permitan definir zonas de riesgo. Se ejecuta dentro de un Sistema de Información Geográfica (p. ej. ArcGIS ®), y proporciona a los vulcanólogos un método automatizado para estimar áreas de posible inundación por lahar. La herramienta parte de la premisa que zonas inundadas por lahares recientes, proporcionan una base para el pronóstico de los futuros límites de inundación en determinados lugares. Como se muestra en la Fig. 2.1, cualquier flujo avanzando por el valle produce límites laterales y distales, es decir, secciones transversales y planimétricas de inundación (A y B) que son influenciadas por la topografía y el volumen de flujo (V) (Schilling, 2014). Así pues, en su funcionamiento, LAHARZ considera topografía y volumen. El método utiliza solo tres variables: V, A, B. Donde el volumen de flujo V de interés en LAHARZ, es el volumen máximo alcanzado a lo largo de la trayectoria del flujo (Fig. 2.2).

La base para establecer dicho pronóstico (Schilling, 2014), parte de el volumen de flujo (V), es la variable independiente que predice la sección transversal (A) y los límites de inundación planimétrica (B). El volumen (V) no se conoce de antemano, y la selección de los valores se basa en el conocimiento geológico y el objetivo de la previsión de inundaciones (por ejemplo, comparando el peor escenario con la hipótesis más probable). En eventos reales V puede cambiar y evolucionar a lo largo de la trayectoria de flujo, pero esta evolución no se considera en LAHARZ. El volumen de interés es el valor máximo que se produce durante el curso del flujo. El área planimétrica de las zonas con probabilidad de inundación por lahar generalmente aumenta en anchura y longitud conforme aumenta el volumen de lahares. Para

el volcán Rincón de la Vieja, se elaboró un modelo que abarca todos los flancos del macizo, este considera volúmenes variables ($1 \times 10^5 \text{ m}^3$, $5 \times 10^5 \text{ m}^3$, $8 \times 10^5 \text{ m}^3$, $1 \times 10^6 \text{ m}^3$, $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ y $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$) y un modelo de elevación digital con resolución espacial de 12.5, m obtenido de imágenes PALSAR, captadas por el satélite ALOS de Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA).

Los puntos potenciales de disparo se ubicaron en las partes altas de los ríos y quebradas que nacen en las laderas del volcán, considerando especialmente cauces por los que históricamente han descendido flujos. A manera de validación del modelo, los resultados obtenidos fueron comparados con el mapa de puentes afectados por los flujos durante la década de 1960. Se debe tener claridad en el hecho que estos modelos representan áreas potenciales de inundación por lahares de volúmenes específicos, sean estos de tipo no eruptivo, sin-eruptivo o pos-eruptivo. Los límites de una eventual inundación podrían variar según las condiciones específicas del momento, como saturación del suelo, cantidad de material depositado (en el caso de los lahares sin y pos-eruptivos), uso del suelo, condiciones del tiempo atmosférico (principalmente las precipitaciones) y nivel freático de los acuíferos más superficiales en las cuencas afectadas.

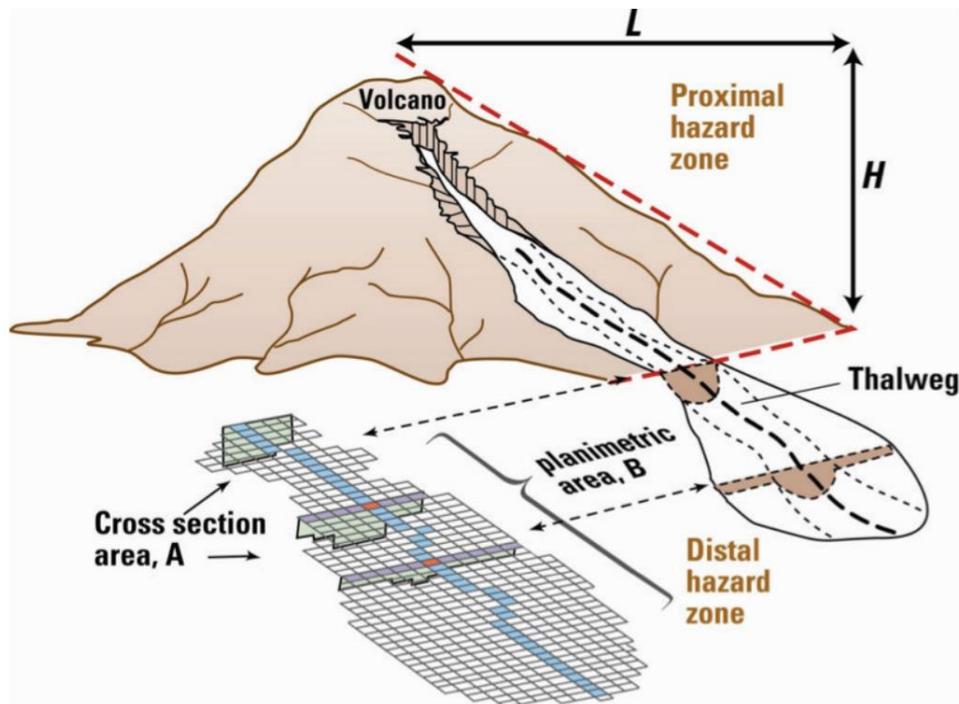


Fig. 2.2: Diagrama que muestra la asociación entre las dimensiones de un lahar idealizado y las áreas transversales (A) y planimétricas (B) calculadas por Laharz para un volcán hipotético. La relación entre la caída vertical (H) y la distancia de salida horizontal (L) describe la extensión de los peligros volcánicos proximales (Schilling, 2014).

Dispersión de cenizas y análisis de la caída de ceniza de la pliniana de con ayuda del programa FALL3D: Para ayudar a cumplir con ese objetivo, dado el carácter científicamente complejo de los procesos en cuestión, se utilizaron modelos simplificados 1D preparados de la literatura, que fueron corridos en una *laptop*, los cuales deben ser aprovechados en la academia en cursos intermedios para posibilitar analizar los efectos de una variable en específico, en presentaciones en comisiones multidisciplinarias, pero teniendo cuidado en dejar claro las aproximaciones que se utilizaron en su codificación. En nuestro caso en particular, además, se está estudió el problema de una manera novedosa en nuestro medio: aprovechando las capacidades de supercomputadoras para utilizar el mejor *software* sobre el tema, recurriendo al modelo fractal y, en este trabajo, explorando la unión de ambas avenidas para generar mapas muy específicos. Para facilitar su comprensión nos hemos concentrado exclusivamente en la información sobre la erupción pliniana incluida en los trabajos de Kempter et al. (1996), Soto et al. (2003) y Aguilar y Alvarado (2020). El impacto que este informe tenga en la reducción efectiva del riesgo dependerá, en parte en que sea adoptado por el mayor número de personas. Por tanto, es posible que el lector de esta parte del informe de riesgo volcánico del Rincón de la Vieja encuentre algunas soluciones (esperamos) y recomendaciones no tradicionales.

En los últimos años se han desarrollado un grupo de modelos tanto analíticos como de solución numérica en 1, 2 o 3 dimensiones. Los modelos 1D consideran que la tefra se transporta lateralmente dentro de la sombrilla, donde se mezcla debido a la turbulencia y, eventualmente, cae al suelo a velocidad terminal; son, por lo tanto, utilizados para sedimentación proximal. Requieren normalmente conocer la tasa de flujo volumétrico en la capa de boyancia neutra. Para los casos de plumas débiles, algunas veces se supone que esa tasa varía con la distancia siguiendo el modelo de difusión de Fick. Están destinadas a ser corridas en *laptops* o computadoras con capacidad media, con su inherente baja rapidez de cómputo, por lo que es de esperar que en el modelo se implementen aproximaciones, tanto en el algoritmo de cálculo como en la física utilizada (Andronico et al., 2008; Scollo et al., 2007, 2013; Bonadonna y Costa, 2013).

Los modelos numéricos 2D describen la dispersión como un transporte pasivo debido a la advección por el viento, con una difusión turbulenta. Para aplicarlos, además de la velocidad horizontal del viento, se requiere también conocer su velocidad vertical y los coeficientes de difusión horizontal y vertical. No incluyen factores como la agregación, por lo que características como el pico secundario no se esperaría que aparezca en los resultados. Si el modelo es analítico, entonces el término de la fuente es típicamente descrito por una o varias funciones de distribución de masa. Si se utiliza una distribución Gaussiana hay que tener los parámetros de forma de la columna, en particular, hay que tener cuidado si se aplica a columnas bajas de altitud por que los vientos tienden a ser muy variables, donde la componente vertical no es despreciable; este aspecto es aún más importante para dispersiones a larga distancia (Bonadonna y Costa, 2013).

Una primera aproximación la constituye el modelo de Suzuki (1983), basado en una solución semi-empírica en 2D de la ecuación de dispersión, que para posibilitar su solución numérica por medio de PC supone una distribución gaussiana de los clastos dentro de la columna y una distribución vertical de velocidad de viento W , donde λ una constante. El viento se supone que siempre se moverá uniforme y horizontalmente, sobre una superficie plana “infinita”:

$$W(z) = W_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right)^\lambda$$

Esta formulación impone automáticamente que el patrón de caída sea una elipse, una forma que se ha usado en varias publicaciones. Connor et al. (2001) consideraron que ese modelo es muy simplificado, a lo que Carey (1996) indicó que un modelo que incluya la advección-dispersión describiría mejor la caída de ceniza que el modelo de Suzuki (1983). La observación se incluye porque existen varios programas (por ejemplo, el TEPHRA2, el ASH3D), hacen otro tipo de aproximaciones para que el programa de resultados rápidamente, por lo que los resultados merecen verse con cautela. Por ejemplo, según se indica en el manual de uso del ASH3D (USGS, 2021), primero se debe especificar el área geográfica en que se tiene interés y hacer una corrida en baja resolución, lo que implica dividir esa área de interés en 25x25x10 celdas, para tener una primera idea de por donde se moverá la pluma, lo que requiere 1 minuto de cómputo. El área geográfica por donde se moverá la pluma se escogería como una nueva área que se analizaría en alta resolución (dividiéndola en una grilla de 100 x100 celdas), como un compromiso entre un resultado que se vea “realista” y una corrida que solo requiera unos pocos minutos. En el manual también se advierte que el modelo solo abarca 1.3 veces la altura de la columna (lo que para el volcán Sabancay de Perú, de una altitud de 6 km, implica que solo se analizaran plumas de 1 km de altura sobre el cráter), también que la topografía alrededor del volcán es incluida como una escalera, una técnica que, en lugares montañosos, puede generar artefactos (valores ficticios) matemáticos, y que no se simulará ninguna erupción que dure menos de 0.1 horas.

En la Fig. 2.3 se muestra una simulación de la pluma de una erupción de 3 km de altura sobre el cráter del Rincón de la Vieja con el patrón de vientos del 14 mayo 2022. En el Apéndice 3 se comparan los resultados obtenidos con los 2 métodos en igualdad de condiciones.

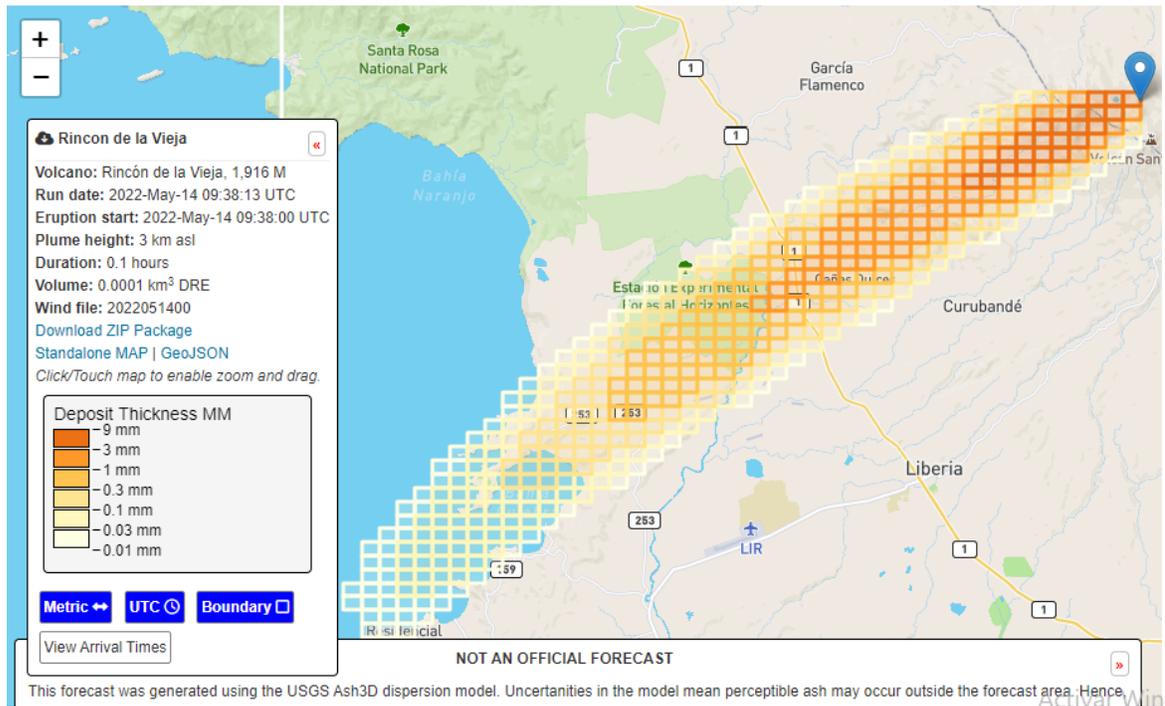


Fig. 2.3: Cálculo por medio del ASH3D de la caída de ceniza de una columna eruptiva de 3 km de altura sobre el cráter del Rincón de la Vieja, según los vientos presentes en el área el 14 mayo 2022.

Los modelos numéricos 3D, como lo es el FALL3D que se utilizó en el presente informe, calculan la concentración de masa en la atmósfera y la carga en el suelo resolviendo las ecuaciones de conservación de masa usando, tanto para la formulación Lagrangiana, como la Euleriana (i.e., transporte explícito de partículas versus el cambio de densidad en un volumen dado). Para ello se requiere conocer con detalle el campo de vientos en las 3 dimensiones. Ya que estos modelos se basan en la solución numérica de las ecuaciones de advección-difusión-sedimentación (ADS), los resultados tienden a ser más realistas, sujetos siempre a la incertidumbre de los valores de entrada utilizados (Folch et al., 2019). Además, ya que usan un patrón de vientos que varía en las 3 dimensiones, en lugar de solo 1, los pronósticos son potencialmente más exactos, especialmente en los casos en que los patrones de viento son más complejos (como en el caso de una altura de 16 km). Por lo anterior, permite una indicación de que áreas están en riesgo por caída de ceniza, en lugar de solo dar la distribución de ceniza.

La observación es aún más necesaria en el caso de erupciones del Rincón de La Vieja, porque, como quedará en evidencia en los resultados obtenidos con el programa Lagrangiano FALL3D, solo con formulaciones en 3D que incorporen un campo de viento por capas con una alta resolución, se puede incorporar el alto contraste topográfico a que están expuestas los clastos: una relativamente corta zona terrestre plana justo después del volcán bordeada luego por una amplia zona marítima con propiedades termodinámicas muy diferentes, lo que

genera vórtices, así como gradientes de dirección y magnitud en las velocidades de las capas de viento.

En el caso concreto del programa FALL3D es un modelo Euleriano *open-source* que analiza el transporte atmosférico pasivo y su eventual deposición basado en la ecuación de Advección-Difusión-Sedimentación (ADS). Este modelo permite, además de distribuciones log-normales e incluir distribuciones totales de tamaño de grano de Weibull y Bi-Weibull. Se puede también singularizar cada uno de los bins utilizados para caracterizar la fuente, para analizar selectivamente un subconjunto para efectos de transporte. También es posible escoger entre varios mecanismos de agregación de partículas en vuelo (Folch et al., 2019).

En lo referente a los nuevos algoritmos numéricos, se incluyó una nueva discretización espacial, el mapeo y escalamiento de coordenadas con un decaimiento lineal que suaviza las oscilaciones numéricas de bajo nivel sobre terrenos muy complejos. La nueva estrategia resolutive basada en el esquema Kurganov-Tadmor (que sustituye la Lax-Wendorff) se puede combinar tanto con una solución vía un Runge-Kutta de cuarto orden, como una de primer orden de Euler para integrar directamente en el tiempo. Al tener opción a dos posibles métodos resolutive, cada usuario puede escoger entre una mayor exactitud, o una mayor eficiencia computacional. La formulación de Kurganov-Tadmor de tipo de volumen finito es mucho menos difusa lo que la hace más valiosa cuando se modelan sustancias con altos gradientes de concentración. Con esto se resuelven los problemas de sobredifusión inherentes al esquema Lax-Wendorff de diferencias centrales para aquellos casos con abruptos gradientes de concentración.

Los nuevos resultados que se presentan han sido obtenidos recientemente por Santiago Núñez al correr en un supercomputador, por un total de 47 horas (casi 3.5 horas por mapa), la versión a junio del 2021 de FALL3D (ver 8.0; Folch et al., 2019), un programa aún en desarrollo, por lo que en un futuro se pueden presentar cambios a los resultados preliminares acá planteados. Este es una de las advertencias que se indican en el presente trabajo: el uso de metodologías de punta que puedan no tener un impacto práctico inmediato, pero que al evidenciar aspectos inadvertidos pueden llevar a mejoras en el análisis de de la peligrosidad.

Para cada una de las 24 horas del 28 marzo 2022, el campo de viento detectado para todo Costa Rica por NOAA desde el nivel del mar hasta una altura de 50 kilómetros con una resolución de 0.5° , fue seccionado en 36 niveles, cada uno representado por un conjunto de 256 puntos. Posteriormente, se escogieron los patrones de viento para las 11 a. m. y para las 3 p. m. por mostrar cambios apreciables de dirección, magnitud o ambos de la velocidad al ir aumentando la altura. Estos abruptos cambios en altura ya se habían detectado en pruebas anteriores. La idea es presentar cómo estas simulaciones, casi en tiempo real, pueden ser utilizadas para mejorar la logística de prevención y atención de una posible emergencia. Ambos patrones de viento fueron utilizados para generar mapas de caída de ceniza para cada una de las 7 granulometrías incluidas en Soto et al. (2003a), para una pliniana de 16 km de altura, aunque Aguilar y Alvarado (2020) hablan que la altura de la columna pudo alcanzar los 30 km. Se escogió una concentración mínima de 0.2 kg/m^2 que, aunque baja, quizá pueda

causar problemas alergias, malestar en los ojos, conjuntivitis, respiratorios y, quizás, silicosis.

Se aclara que, para facilitar la comparación en las cercanías del cráter, aunque el modelo permite diferenciar diversas concentraciones de ceniza, todas las que son igual o mayor a 20 kg/m^2 (equivalentes a isopacas de 0.2 mm) fueron asimiladas a un mismo color, pues todas serían altamente peligrosas. Para la granulometría se tomaron los datos aportados por Soto et al. (2003a) según su cuadro 4:

Dentro de las condiciones de frontera para la simulación se deben de tener en consideración varios aspectos. Al no tenerse información amplia y detallada de un número apreciable de eventos sub-plinianos o plinianos, solo queda suponer que las granulometrías ya mencionadas son representativas de eventos similares en los años por venir. Un punto clave en el análisis de la caída de ceniza es el de obtener información que permita prepararse antes, durante y después de la emergencia que causaría de darse nuevamente una sub-pliniana o pliniana. La dispersión de la ceniza se debe a las condiciones atmosféricas presentes durante la erupción, que no solo cambiaban diariamente durante el año en que se dio el evento, sino que hasta puedan ser diferentes a las que se observan hoy en día. Sin embargo, si con los patrones de viento recientes se reprodujeran similares caídas tan asimétrica como las de hace un poco más de un milenio y se identificaran las dos corrientes de viento predominantes que Soto et al. (2003a) argumentan, entonces al utilizar las 7 granulometrías identificadas, se tendría una visión más unificada del proceso eruptivo, que permitiría no solo ampliar las deducciones de ambos trabajos, sino también analizar nuevas perspectivas. Los mapas correspondientes a las 7 muestras pueden consultarse en el Apéndice 2 al final.

Por todas estas consideraciones se decidió llevar a cabo las simulaciones de caída de ceniza de la siguiente manera:

1. Para mantener razonablemente delimitado el tiempo de supercómputo, se escogería las condiciones atmosféricas de un día en particular, lo más cercano a la fecha límite de publicación de los resultados, en este caso el 28 marzo 2022, aunque se incluyan algunas características muy propias de la época de transición de periodo seco a período lluvioso.
2. En ese día, se escogerían dos horas en particular que mostraron variaciones apreciables en el campo de viento, y así examinar casos extremos: las 11 a. m. y las 3 p. m. De esta manera no solo se analizarían dos casos con advección bastante diferentes, sino que también, debido al patrón general de soleado en la mañana y lluvioso en la tarde que suele darse en nuestro país, indirectamente se incluiría ese factor en el análisis.
3. Las granulometrías reportadas en Soto et al. (2003a) son en algunos casos bastante diferentes entre sí, por lo que es de esperar que los patrones de caída resultantes también lo sean.
4. Dado que es la primera vez en el país que se llevaría a cabo una simulación tan detallada, los autores tomaron la decisión correr cada simulación por un período de casi 3.5 horas, para obtener los mapas con una mayor resolución. Esto implicó:

a) Trabajar con un campo de vientos con una resolución de 0.5° (o sea 256 puntos por nivel) con 32 niveles de presión desde el nivel del mar hasta una altura de 30 km, o sea un total de 8192 puntos por corrida. Previendo que por la localización del volcán la dispersión llegaría hasta el lago de Nicaragua, se incluyeron los vientos prevalecientes en esa área. Si bien la dirección de los vientos (provenientes del ENE) al momento de la erupción (Kempter et al., 1996) es muy diferente a la NW del día 28 marzo 2022, el día de la simulación, si son lo suficientemente fuertes como para causar un patrón altamente asimétrico. Si la velocidad horizontal del viento es mayor que la velocidad vertical de subida de la columna la columna se denomina débil y se dobla pues la columna vertical no se puede desarrollar, mezclándose con la corriente turbulenta de aire que la transporta. Los eventos sub-plinianos tienen velocidades verticales menores a los plinianos, de manera que la sombrilla y la región vertical de la columna tienen mayor tendencia a doblarse en presencia de vientos fuertes (Cioni y Pistolesi, 2015, p. 532).

b) En algunos casos, las erupciones menores llegan a tener formas irregulares al ser susceptibles a las condiciones locales de la atmósfera. Por ende, pueden mostrar más de un lóbulo a diferentes alturas, debido a los cortantes del viento. Esa combinación de un viento horizontal con una corriente vertical puede originar vorticidad que, ocasionalmente, se manifiesta en una línea de tornados al margen de la pluma, como sucedió en las plumas débiles generadas durante la erupción del Surtsey en 1963 (Carey y Busik, 2015, p. 580). Esto nos permite estudiar tanto el efecto de una columna débil como la influencia del mar cercano.

c) De esta manera, para cada una de las 7 granulometrías disponibles (está la que habíamos realizado para SFT) se tendrían dos mapas: uno para las condiciones imperantes a las 11 a. m. y otro para las imperantes a las 3 p. m., para un total de 14 mapas

d) Las corridas fueron programadas para que los mapas finales tuvieran una resolución de 250 dpi, lo que al final implicó un total de 47 horas de supercómputo.

Por otro lado, una erupción subpliniana/pliniana del Rincón de la Vieja enfrenta al vulcanólogo a una situación no muy común, debido a la locación geográfica donde se encuentra el volcán, la orografía circundante y la dirección del viento. Tal y como se conoce, la subida y dispersión de una pluma es afectada por la estratificación de la atmósfera cerca de la fuente, que conlleva una variación vertical de la temperatura la diferencia de calentamiento entre la tierra, la atmósfera y el mar en este caso. Además, la troposfera depende débilmente de la estratificación, contrariamente a la fuerte dependencia de la estratósfera. La altura de la tropopausa depende fuertemente del calentamiento en superficie (Carey y Bursik., 2015; p. 581). Adicionalmente, la superficie terrestre modifica los primeros kilómetros de la troposfera, que conforman la capa fronteriza atmosférica (ABL, por su nombre en inglés). Stull (1988) la define como aquella parte de la troposfera que está directamente influenciada por la presencia de la superficie terrestre, y que responde a sus forzamientos en escalas temporales de horas. Sobre océanos y mares la ABL evoluciona lenta espacial y temporalmente durante un ciclo diario debido a la elevada capacidad calórica del agua, contrario a lo que sucede sobre la tierra, cuya temperatura tiene una amplitud térmica

más elevada. La ABL se descompone en tres sub-capas: la capa de mezcla (ML), la capa de mezcla convectiva (CBL) y la capa estable nocturna (SBL). En el lapso de un día, la ML está completamente desarrollada durante la tarde. Una hora antes de que el sol se oculte, la formación de masas de aire caliente ascendentes (*thermals*) cesa, y el balance de radiación cambia de signo al enfriarse el suelo por radiación de onda larga. La capa adyacente al suelo se estabiliza dando origen a la capa estable nocturna (SBL). Aunque el resto de la atmósfera sigue similar a la capa de mezcla (ML), conforme la capa estable nocturna (SBL) la capa de mezcla va perdiendo espesor, al igual que la ABL como un todo. Con la salida del sol se vuelve a desarrollar aires calientes ascendentes que inestabilizan la atmósfera adyacente al suelo, de manera que durante las primeras horas del día una nueva capa de mezcla (ML) se desarrolla debajo de la SBL hasta que la ML se desarrolla completamente (Banta, 1982; Whiteman, 2000).

Entonces, al tener en cuenta que en esta parte del país las montañas son bajas (alrededor de 2000 m), donde hay pasos de montaña amplios, así el viento predominante que viene de la costa Caribe primero atraviesa los pasos de montaña que hacen que aumente de velocidad, para rápidamente encontrar una gran masa de agua oceánica, que lo afectará. Por ello hay que incorporar en el análisis de la pluma las ondas de montaña que se generan al incidir el viento en el flanco este del volcán. Las ondas de montaña son cambios periódicos de presión atmosférica, temperatura y altura ortométrica en una corriente de aire provocados por desplazamientos verticales, incluso por vientos superiores desviados sobre una corriente térmica ascendente. Los meses más favorables para la ocurrencia de ondas de montaña son enero, febrero y marzo debido a las condiciones de estabilidad, las brisas de valle-montaña, de baja frecuencia y magnitud, resultan opacadas por brisas mar-tierra en donde la orografía y la cercanía al mar permiten su generación (Campos y Castro, 1992).

Para tasas de masa pequeñas el arrastre (*entrainment*) y la convección de humedad atmosférica pueden ser la fuente de energía dominante que fuerza la columna hacia arriba. Al subir la columna, se satura de vapor y se condensa; el calor latente que se libera permite a la columna seguir subiendo (Carsey y Bursik, 2015, p. 582). El viento intenso en dirección de la tierra hacia la costa hará que esa sea una pluma débil, por ello, una mayor parte del área externa de la columna queda expuesta a una brisa mar-tierra más húmeda que opaca las brisas valle-montaña. Por otra parte, la proximidad de la costa generará un viento en dirección opuesta hacia la tierra y que también puede aportar humedad. Esta corriente de aire, que se da por la capacidad calórica del mar y su interacción con la atmósfera podría ir disminuyendo conforme aumenta la cantidad de pómez que caería sobre el mar y que, debido a su baja densidad, quedaría flotando en la superficie del océano. Surge entonces la interrogante: ¿podría suceder que las relaciones empíricas entre parámetros de interés volcánica utilizadas por Kempter et al. (1996) para calcular la altura de 16 km o Aguilar y Alvarado (2020) para calcular los 30 km no sean aplicables en este caso? Además, bien podría suceder que la erupción pliniana se haya dado bajo condiciones atmosféricas tales que los finos se movieran paralelo a la costa, alcanzando mayores distancias al estar sometida a turbulencias que aminoren la caída.

La interrogante se complica cuando, para simplificar su análisis, se analiza con un modelo simple basado en el algoritmo de Tephra2 (Bonadonna et al., 2005; Connor y Connor,

2006) como el desarrollado por Constantinescu et al. (2021). Ahí se modela la sombrilla de ceniza insertada en la atmósfera como una región bien mezclada en forma de un disco elíptico o bien circular a una altura de boyancia neutra sobre el cráter (Bonadonna y Phillips, 2003; Costa et al., 2013). Esta simplificación no incluye la dinámica del desplazamiento lateral de la sombrilla, y supone que la tefra se desprende de la base de la sombrilla para ser luego advectada por un viento de velocidad horizontal y dirección constante, no considera difusión vertical y supone que la deposición ocurre en una topografía plana, todo con miras a calcular la masa total eyectada.

Los modelos estadísticos usados para estimar el volumen eruptado incluyen relaciones exponenciales, de potencia y de Weibull, que se usan con parámetros estimados de interpolaciones de isopacas (Bonadonna y Costa, 2012; Fierstein y Natheson, 1992). Así, estos modelos pueden o no describir los datos adecuadamente, sobre todo cuando se utilizan para extrapolar tendencias más allá de los límites del área disponible de tefra depositada.

Cobertura y uso del suelo en el flanco norte: La cobertura y usos del suelo para el año 2021 dentro de las comunidades bajo estudio, se determina a través del proceso de fotointerpretación que permite obtener información de la imagen satelital seleccionada (Bolaños, 2003). La obtención de las imágenes satelitales para dicho proceso se obtuvo del programa gratuito SasPlanet, ya que este permite obtener un nivel alto de detalle. Además, se tomó en consideración el obtener información espacial a pequeña escala, como la identificación del uso turístico y pequeñas plantaciones de cultivos anuales.

Se revisó en los instrumentos a nivel municipal sobre la planificación relacionado al uso de suelo en su territorio de jurisdicción (municipalidad de Upala), y posteriormente se realizó una revisión de las metodologías aplicadas por diferentes autores para medir la vulnerabilidad asociada a los desastres naturales y el diseño de índices de riesgo.

Se realizó un mapa de cobertura y uso del suelo presente en las comunidades del flanco caribeño, dado que suelen ser las más afectadas, con el fin de identificar las actividades agro-productivas y turísticas que son desarrolladas. Las comunidades de estudio pertenecen al distrito de Dos Ríos (Dos Ríos, Manzanares, Argelia y El Gavilán) y el distrito de Aguas Claras (Buenos Aires), ambos pertenecientes al cantón de Upala (Fig. 2.4).

El mapa de coberturas y usos del suelo se elaboró a través del proceso de fotointerpretación de imágenes satelitales a una escala de 1:5000, siguiendo los criterios de textura y forma de las coberturas y usos sobre el terreno. Esto con el fin de identificar las actividades agro-productivas presentes en el área de estudio y su posible afectación ante posibles escenarios por lahares y caída de ceniza con la finalidad de emitir una serie de recomendaciones sobre la planificación y ordenamiento del territorio, para una posible zonificación en el área de estudio. Se determinó la cobertura y el tipo de uso de acuerdo con el criterio técnico establecido por el Ministerio de Agricultura y Ganadería e INTA (2015), bajo los criterios de textura y forma de las coberturas sobre el terreno, expuestos en su clasificación *Leyenda clc-cr para la generación de mapas de uso y cobertura de la tierra de Costa Rica*. Luego, se realiza una superposición de las coberturas y usos del suelo con los

diferentes escenarios de afectación y peligros presentes en el área de estudio, de acuerdo con el estudio realizado por Alpízar (2018), modificado por Aguilar y Alvarado (2020).

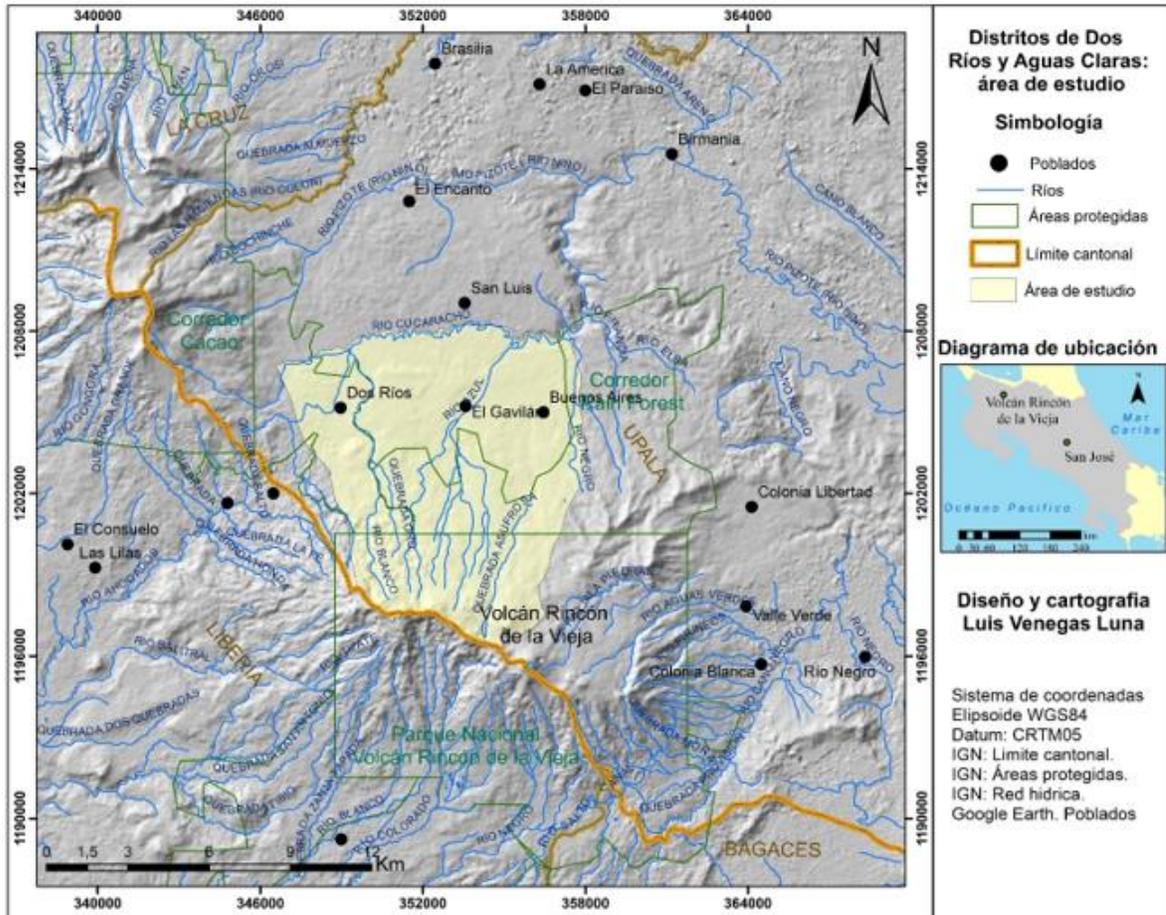


Fig. 2.4: Comunidades bajo estudio particular en el flanco norte del volcán por estar bajo un escenario de una peligrosidad más elevada.

Estimación de la vulnerabilidad flanco norte: En relación con el nivel de vulnerabilidad que poseen las viviendas y las comunidades, este se establece de acuerdo con la cuantificación de las variables incluidas en el instrumento aplicado (encuesta). La vulnerabilidad según Thomas (2012), es entendida a partir de la fragilidad de los grupos humanos de acuerdo con su exposición al efecto directo de los desastres naturales, siendo fundamental las características relacionadas a los factores socioeconómicos, culturales e institucionales. Estas características de los grupos familiares quedan representadas a través de una serie variables, y que a su vez se ponderan con un peso porcentual. Los puntos generales para seguir son los siguientes: a) Digitalización de las viviendas, por medio de la fotointerpretación de imágenes satelitales, b) Selección del tipo y variables que conformaran la vulnerabilidad social, c) Elaboración del instrumento para la recolección de datos, d) Cálculo de la muestra mínima representativa y muestreo aleatorio simple a las en las

viviendas y aplicación del instrumento, e) Procesamiento de los datos, f) Diseño del índice de riesgo, y g) Análisis espacial con el SIG.

El nivel de vulnerabilidad vivienda-comunidad, se obtuvo a partir de las características socioeconómicas, organización local y percepción del riesgo que poseen la población de estudio. En lo que respecta al nivel de peligrosidad en las comunidades, se establece de acuerdo con la probabilidad de frecuencia de lahares y el nivel de exposición con base en los daños generados hacia la infraestructura vial (incomunicación de las rutas de evacuación). Por último, realiza el diseño del índice de riesgo comunitario.

Se aplicó una serie de instrumentos para la recolección de datos de campo, como entrevistas a actores claves (Cámara de turismo Rincón de la Vieja y Comité Comunal de Emergencias) y una encuesta de tipo cerrada aplicada en la población local, donde se establece la relación que de acuerdo con la cantidad de variables se obtiene el nivel de vulnerabilidad social en las viviendas y luego se pondera dichos niveles para la comunidad a la que pertenecen. Posteriormente, de acuerdo con el mapa de probabilidades de frecuencia de peligros volcánicos, elaborado por Alpízar (2018) y modificado por Aguilar y Alvarado (2020) y el estudio de Soto et al. (2016) sobre la influencia de los lahares en la red vial, se elabora un índice de riesgo por afectación de lahares en las comunidades.

Sin embargo, las comunidades no cuentan con cartografía sobre el desarrollo habitacional en su territorio, de esta manera se hace necesario establecer la cantidad de viviendas presentes. Se realiza través de la fotointerpretación de imágenes satelitales obtenidas del programa SasPlanet; además, la unidad a aplicar el instrumento (encuesta) son las viviendas, por lo tanto, se hace necesario georreferenciar cada una de estas, así como otorgarles un código.

3. GEOLOGÍA DEL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA

El volcán Rincón de la Vieja es uno de los más estudiados del país en su base por las investigaciones geotérmicas, pero no tanto su macizo eruptivo. De allí que numerosos estudios se han realizado enfocados a la geotermia, pero pocos sobre la actividad eruptiva de los últimos 11 000 años, tal y como se desprende del Cuadro 1.1, incluido varias páginas atrás.

3.1 MARCO ESTRATIGRÁFICO

El volcán Rincón de la Vieja y sus calderas poseen estudios geológicos de diversa índole, más que todo enfocados a la geotermia, aunque estudios recientes han contemplado su actividad eruptiva. A continuación, se describirán brevemente los diferentes aspectos relevantes con base en la revisión exhaustiva de la literatura, complementado con el trabajo de campo, en parte inédito realizado entre el 2017 y el 2022.

Aunque se habían realizado varios mapas geológicos a diferente escala y grado de detalle, particularmente del sector pacífico (Funaioli y Rossi, 1991; Kempter, 1997; Molina, 2000; Barahona et al., 2001; Soto et al., 2003a y Zamora et al., 2004; Chavarría et al., 2007), los primeros trabajos que realizan la carta geológica completa de la hoja Curubandé y Cacao (1:50 000), la cual cubre el macizo eruptivo del Rincón de la Vieja, son los de Alvarado et al. (2019a, b) con su texto explicativo (Alvarado y Denyer, 2019).

Desde el punto de vista geocronológico (dataciones radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), estratigráfico macro y geomorfológico, la historia crono-eruptiva del Rincón de la Vieja, con base en Alvarado y Gans (2012) y Molina et al. (2014), se sintetizan los eventos de este complejo volcánico de la siguiente forma:

- :
- a) Formación del volcán Alcántaro y la ignimbrita Río Colorado: 2.17-1.78 Ma.
 - b) Formación de varias calderas multicolapso, de contorno festoneado (calderas Alcántaro y San Vicente), con varios depósitos de CDPc asociados: 1.48 Ma (Toba Río Liberia).
 - c) La procedencia de las corrientes de densidad piroclástica concentradas (CDPc) o flujos piroclásticos que dieron origen a la Toba Salitral (1.36 Ma) y la Toba Buena Vista (1.35 Ma) todavía están bajo discusión acerca de si proceden de esta caldera o de una caldera precedente a la de Guayabo.
 - d) Formación del campo de domos intracaldéricos y pericaldéricos de Cañas Dulces, entre 1.40 y 0.80 Ma.
 - e) Inicio de la formación del Proto-Rincón de la Vieja: 1.6-0.85 Ma.
 - f) Continuo crecimiento del paleo- y neo-Rincón de la Vieja: 0.56-0 Ma.

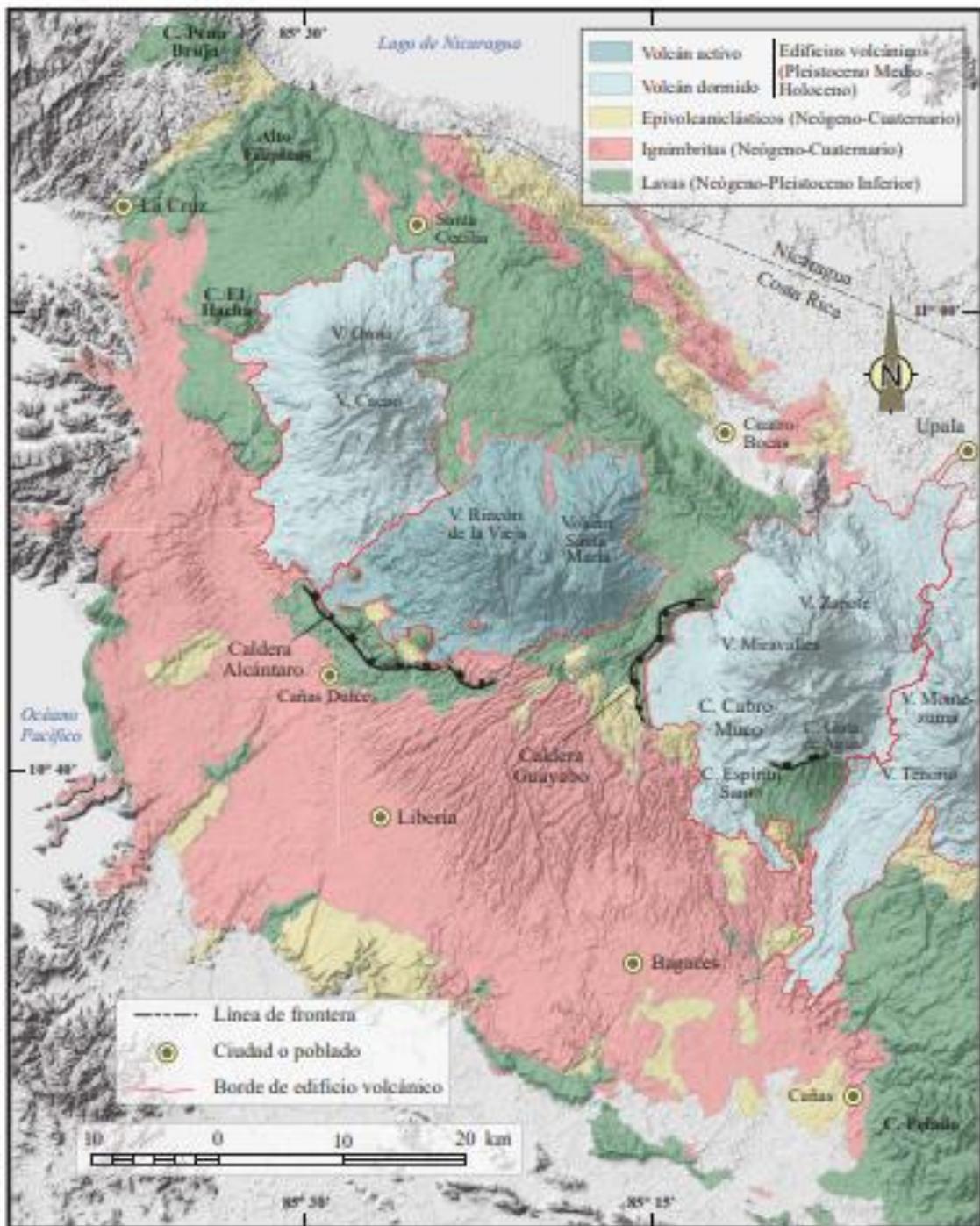


Fig. 3.1: Mapa geológico regional simplificado y de las estructuras volcánicas principales de la cordillera de Guanacaste (Alvarado y Denyer, 2019).

3.1.1 Petrografía

Las coladas de lava del Rincón de la Vieja (paleo y neo) son de composición predominantemente tanto andesítica como andesítico basáltica (SiO_2 53.03-61.76 %); mientras que las coladas de lava del paleo-Rincón son andesíticas (Tournon, 1984; Alvarado, 1985; Carr et al., 1986; Kempster, 1997; Funaioli y Rossi, 1991; Malavassi, 1991; Chiesa et al., 1994).

Por lo general, estas tienen textura hipocristalina, glomeroporfirítica, seriada, rica en fenocristales de plagioclasa (25-45 %), clinopiroxeno (6-12 %), olivino (0-8 %) con bordes de iddingsitización, minerales opacos (2-4 %) y, raramente, con ortopiroxeno (0-10 %) en una matriz hialopilítica a intersertal con microlitos de plagioclasa, clinopiroxeno y minerales opacos; como minerales secundarios se presentan óxidos de hierro, epidota, sericita y calcita (Kempster, 1997; Barahona et al., 2001; Alvarado y Denyer, 2019). Quizás aquellas lavas con más altos contenidos de olivino (> 6 %) puedan corresponder con basaltos, pero no se dispone de análisis químicos.

Ciertas andesitas ricas en magnesio (SiO_2 57.62-58.54 %, MgO 4.46-5.05 %) en el proto-Rincón de la Vieja (campo de coladas de Mata de Caña-Loma Verde) exponen megacristales de olivinos algo alterados a iddingsita, con borde de reacción de piroxeno y estructura en malla por la formación de serpentina (p. ej. sitio Hornillas), mientras que otras poseen olivino con espinelas sin borde de reacción (Tournon, 1984; Funaioli y Rossi, 1991).

Contrario a las coladas de lava, los productos explosivos Holocenos poseen espectros más amplios puesto que varían desde andesitas basálticas hasta dacitas (SiO_2 53.30-69.26%). Las pómez dacíticas del Rincón de la Vieja no solo son las únicas tefras hasta el momento geoquímicamente analizadas del Holoceno de los volcanes de Guanacaste, sino que, además, son los productos, geológicamente recientes, más ácidos estudiados. Más análisis sobre las tefras del Cuaternario Superior son requeridos, aunque, usualmente, los afloramientos no se prestan para realizar dichas investigaciones por su grado de alteración (Alvarado y Denyer, 2019).

La cristalización fraccionada de las fases mineralógicas observadas (principalmente 33 % plag + 8 % cpx + 4 % opx + 4 % mt \pm 3 % ol) es el proceso dominante en la generación de estos magmas (Alvarado, 1984; Tournon, 1984; Funaioli & Marinelli, 1991 y Kempster, 1997).

La mezcla de magmas heterogénea y homogénea (*mingling* y *mixing*), así como la anatexia de corteza andesítica, son aspectos adicionales dentro del proceso petrogenético cortical que dio origen a diferentes rocas en volcán Rincón de la Vieja (Funaioli y Marinelli, 1991 y Kempster, 1997).

3.1.2 Unidades morfoestratigráficas

A continuación, se presenta un resumen estratigráfico del macizo del Rincón de la Vieja, aunque para el peligro volcánico, lo que suele evaluarse son los últimos 50 000 años (=50 ka), por lo anterior, los aspectos geológicos más antiguos de 50 ka se tratan de modo muy breve y no se incluyen las unidades pre-Rincón. Las principales unidades constructivas del Rincón de la Vieja se pueden resumir en las siguientes unidades (Fig. 3.2):

Pre-Rincón

Está compuesto por rocas volcánicas y sedimentarias del Paleoceno Superior – Mioceno Medio tales como areniscas y lutitas con intensa alteración hidrotermal, brechas volcánicas silicificadas y, en menor cantidad, depósitos piroclásticos (Zamora et al., 2004).

La base del volcán se considera como el paleovolcán Alcántaro que, principalmente, está constituido por coladas de lava vidriosas piroxénicas (sin minerales hidroxilados), lajeadas, con estructuras fluidal, perlítica, así como depósitos de CDPc (¿reignimbritas?), ambos con pliegues, fallas sineruptivas, de manera que conforman el borde festoneado de la caldera Alcántaro y San Vicente. Las edades de las rocas del borde de la caldera varían entre 2.17 y 1.79 Ma: 2.1 en Quebrada Tempisquito; 1.86 Ma en el cerro Atravesado; 1.81 Ma en la finca Aprecio; y 1.78-1.79 Ma en Buena Vista. La ignimbrita Rodeo Viejo parece estar asociada con este paleovolcán. Esto se puede interpretar como que el volcán Alcántaro pudo haber colapsado en varios eventos menores y, finalmente, en una sucesión de eventos mayores, posterior a 1.78 Ma (edad más joven de las lavas) y antes de la formación de los domos y lavas poscaldéricas, cuyas edades más seguras se ubican alrededor de 1.4 Ma (Alvarado & Gans, 2012). La caldera Alcántaro se encuentra relacionada con la actividad del complejo volcánico Rincón de la Vieja en sus etapas iniciales (proto y paleo-Rincón) y del campo de domos de Cañas Dulces.

Proto-Rincón

Las coladas de lava del proto-Rincón de la Vieja que afloran en los sitios Pacayales, Mata de Caña (Loma Sabana Verde), Coyol, Lagunilla y Guanacastillo; conforman coladas extensas y espesas, que aún guardan la morfología de lenguas de lava con frentes morfológicos bien definidos, aunque poseen una espesa cubierta (2-4 metros) de suelo rojizo y meteorización esferoidal, indicativa de su edad antigua. Por lo general, estas tienen textura hipocristalina, glomeroporfirítica, rica en fenocristales de plagioclasa (25-45 %), clinopiroxeno (7-12 %), olivino (5-8 %) con bordes de iddingsitización, minerales opacos (4 %) y, raramente, con ortopiroxeno (0-10 %) en una matriz hialopilítica a intersertal con microlitos de plagioclasa, clinopiroxeno y minerales opacos (Barahona et al., 2001).

El campo de coladas de Mata de Caña-Loma Verde es complejo; en su base, cerca de finca Dos Quebradas, aflora una andesita rica en magnesio (MgO 5.05 %) que contiene olivino con espinelas, pero sin borde de reacción (Tournon, 1984); mientras que el camino al sitio Mata de Caña corresponde con una andesita con fenocristales de plagioclasa (30 %), clinopiroxeno (6 %), ortopiroxeno (5 %) y opacos (2 %) en una matriz intersticial con

microlitos de piroxeno, plagioclasa y opacos (Kempfer, 1997). En efecto, las andesitas (sitios Pacayales y Mata de Caña, Cuesta Diablo y Borinquen) del proto-Rincón de la Vieja cuentan con fenocristales de plagioclasa (26-30 %), clinopiroxeno (6-12 %), olivino (0-2 %) xenomórficos iddingsitizados, ortopiroxeno (2-6 %) y minerales opacos (2-4 %) en una matriz hialopilitica con las mismas facies de los fenocristales; como minerales secundarios se presentan óxidos de hierro, epidota, sericita y calcita (Barahona et al., 2001).

Ciertas andesitas en el proto-Rincón de la Vieja exponen megacristales de olivinos algo alterados a iddingsita, con borde de reacción de piroxeno y estructura en malla por la formación de serpentina (p. ej. sitio Hornillas). Estas andesitas son ricas en magnesio (SiO_2 57.62-58.54 %, MgO 4.46- 4.53 %; Funaioli y Marinelli, 1991).

Las edades de las lavas más antiguas del volcán Rincón de la Vieja fueron realizadas en rocas recolectadas en el flanco S del volcán, en los sitios llamados Coyol, Lagunilla, Guanacastillo y en la cuesta Diablo. Las mismas definen un espeso campo de lavas (al menos 290 m de espesor), quizás en asocio con un escudo o plataforma de lava, con varios frentes morfológicamente visibles en el terreno, con edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre 1.6 ± 0.2 y 1.1 ± 0.03 Ma para las partes basales (cronológicamente contemporáneas con el vulcanismo de Monteverde), mientras que 0.85 ± 0.05 Ma para las más recientes, incluso bifurcándose estas al chocar con el domo cerro Fortuna. La edad de 1.6 posee un grado de error de 0.2 Ma, por lo que se puede inferir que el campo de lavas del Diablo (proto-Rincón) se formó entre 1.3 (edad del cerro Fortuna) y 0.85 Ma (Alvarado & Gans, 2012).

Paleo-Rincón

Sobre esta plataforma de lava o volcán en escudo (Proto-Rincón) creció el Rincón de la Vieja hace unos 564 000 años (Carr et al., 2007; Alvarado y Gans, 2012).

Dentro de las coladas de lava de paleo-Rincón de la Vieja, por ejemplo, sobresalen las que afloran en el cerro Gallo (764 m s. n. m., aproximadamente 1 km²) del relieve circundante, el cual está constituido de andesitas piroxénicas con textura seriada y un desarrollo de suelo bastante importante; posiblemente forma parte del paleo-Rincón, aunque se carece de edades. Lo mismo sucede con el cerro Chato (1130 m s. n. m.), localizado al noreste del Rincón de la Vieja (ambos en la hoja Cacao), conformado por restos de partes de focos volcánicos antiguos, que, en la actualidad, se encuentran fuertemente denudados por la erosión.

Por lo general, las coladas de lavas del paleo y neo-Rincón de la Vieja son predominantemente andesíticas, medianas a ricas en K, porfiríticas (30-60 % fenocristales), con textura glomeroporfíricas, fenocristales de plagioclasa (17-50 %), clinopiroxeno (2-7 %), ortopiroxeno (0.5- 5 %) y cantidades variables de olivino (0-3.5 %) y minerales opacos (0.5-4 %); zircón como accesorio casual. Las plagioclasas suelen mostrar un aspecto criboso con inclusiones de vidrio y minerales (Alvarado, 1985). Como minerales secundarios se presentan zeolitas, hidróxidos de hierro, cloritas, minerales de arcilla, así como calcita y epidota dentro del núcleo de las plagioclasas (Funaioli y Marinelli, 1991). Ciertas andesitas en el proto-Rincón de la Vieja exponen megacristales de olivinos algo alterados a iddingsita,

con borde de reacción de piroxeno y estructura en malla por la formación de serpentina (p. ej. sitio Hornillas). Estas andesitas ricas en magnesio (SiO_2 57.62-58.54 %, MgO 4.46- 4.53 %; Funaioli y Marinelli, 1991) se parecen a las de la colada Mata de Caña (Tournon, 1984).

Las coladas de lava más recientes del paleo-Rincón aportan edades de 0.56 Ma para uno de los flancos antiguos del macizo más reciente.

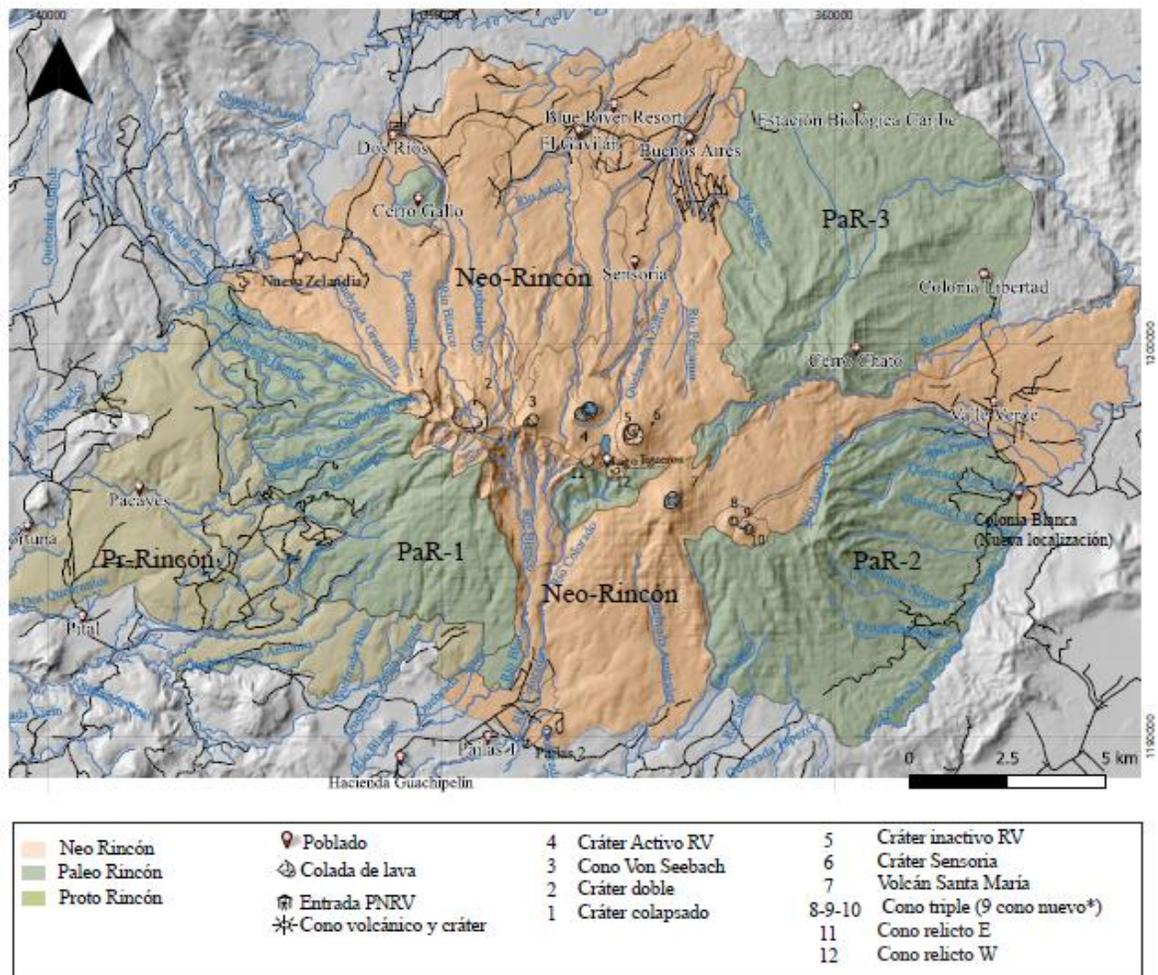


Fig. 3.2: Distribución de las macrounidades geológicas y geomorfológicas de las unidades Proto-Rincón, Paleo-Rincón y Neo-Rincón, incluyendo sus focos eruptivos recientes y sus fallas relevantes.

Neo-Rincón

Kempton (1997) agrupa los depósitos eruptivos del flanco SW del cráter Activo en cuatro grupos, e incluye un grupo indiferenciado para el resto del macizo eruptivo (Cuadro 3.1). Dataciones de radiocarbono de tefras básicas a ácidas y CDP en facies de flujos de escorias con pómez (p. ej. ríos Azul y Pénjamo), aunadas a las erupciones históricas, brindan edades de entre 27 ka hasta el presente (Kempton, 1997 y Soto et al., 2003a, b; Alvarado et al., 2018), donde se incluyen las 6 nuevas edades aportadas por el presente estudio (Cuadro 3.2). La reinterpretación de todas las edades nos indica una historia nueva del Neo-Rincón (Fig. 3.3):

A) Unos lahares antiguos afloran cerca de la cascada denominada El Santuario o Catedral (río Azul), desde donde se realizó una edad en un tronco contenido que dio superior a 42 ka. Una colada de lava le sobreyace, por lo que ha de tener una edad superior a los 10 ka, que corresponde con la edad de los paleosuelos datados por el puente del río Azul (Fig. 3.3 y 3.4).

B) Algunas capas plinianas de pómez meteorizadas (anarajandas) afloran tanto en el flanco SW como entre Nueva Zelanda y Gavilán. Su edad es cercana a los 10 ka (Fig. 3.5).

C) Una sección estratigráfica expuesta en la plataforma del pozo geotérmico PLB-05 (sector pacífico del Rincón de la Vieja) permitió complementar y correlacionar cronológicamente la estratigrafía con la del sector Caribe. Allí se dató un suelo desarrollado sobre una discordancia erosiva, con una edad (muestra RV 11E) de unos 6400 años a. C. (=8.4 ka), pero el suelo bajo la capa pómez infrayacente (muestra RV 11E) posee una edad más reciente de 5650 años a. C. (~7.6 ka), es decir, existe una contradicción. Puesto que el nivel más antiguo datado por Aguilar y Alvarado (2020) del paquete explosivo reciente del Rincón es de 3650 a. C. (~5.6 ka), que le sobreyace, perfectamente la discordancia debió de ocurrir alrededor del 8.4 ka. Quizás la edad de la capa de pómez esté contaminada, por ello, más joven. Perfectamente, esta capa de pómez anarajandas por el grado de meteorización podría ser equivalente a alguna de las plinianas presente entre Nueva Zelanda y Gavilán datadas alrededor de los 10 ka (Fig. 3.6).

D) El campo de coladas de lava más reciente (aflorante por Gavilán) tendrían una edad de tendrían unos 5 ka y estaría cronológicamente sobre la discordancia observada en la plataforma geotérmica (Fig. 3.7 y 3.8).

E) Un evento pliniano de caída con flujos piroclásticos asociados ocurrió en el año 300 A.D. Este evento quizás profundizó el cráter Activo, dándose su morfología actual (Fig. 3.6 y Fig. 3.8).

F) Posteriormente, los eventos explosivos subsiguientes generaron un anillo de piroclastos alrededor del cráter Activo (Fig. 3.8) y los lahares subsiguientes, incluyendo los eventos históricos (Fig. 3.9 y 3.10).

Cuadro 3.1: Tabla comparativa de los cuatros grupos estratigráficos identificado por Kempter (1997) para el flanco SW del cráter Activo del Rincón de la Vieja y su comparación con otros depósitos explosivos y efusivos del Rincón de la Vieja del Pleistoceno Superior-Holoceno. La numeración de 1 a 4 corresponde con la original de Kempter.

Grupo	Litología	Edad	Espesor (m)	Comentarios
1b	Capa de pómez Río Blanco y depósitos piroclásticos sobreyacentes	300 A.D. al Presente	30	Kempter (1997) describe un nivel erosivo bajo la capa Río Blanco, que no se observa en los depósitos distales.
1a	Capas piroclásticas y paleosuelos pre-Río Blanco y el campo de lavas de Neo-Rincón Superior (Gavilán)	6400 a. C. al 300 A.D.	~5-20	Una discordancia marca la base de esta secuencia explosiva subreciente ubicada alrededor de 8.4 ka
2	Capas piroclásticas café a beige (incluyendo plinianas meteorizadas) con abundantes fragmentos líticos con algunas intercalaciones de coladas de lava de color gris de < 10 m espesor	25 000 al 6400 a. C.	100	Kempter (1997) data la base del grupo en 27 ka. Resulta probable que las coladas de lava que conformas cascadas en el flanco caribeño sean parte de este grupo. Kempter piensa que la mayoría de esas coladas provienen del cono Von Seebach
3	Capas piroclásticas café a café amarillentas con coladas de lava andesíticas (5-15 m de espesor), con pronunciada meteorización	> 27 ka	120	Aflora en el anfiteatro de avalancha de escombros volcánico cerca de la cima
4	Coladas de lava gris oscuro a gris púrpura, con brechas de progresión basal y superior, algunas superando los 30 m de grosor.	?	>80	Representa un paquete lávico longitudinal en dirección a las Hornillas

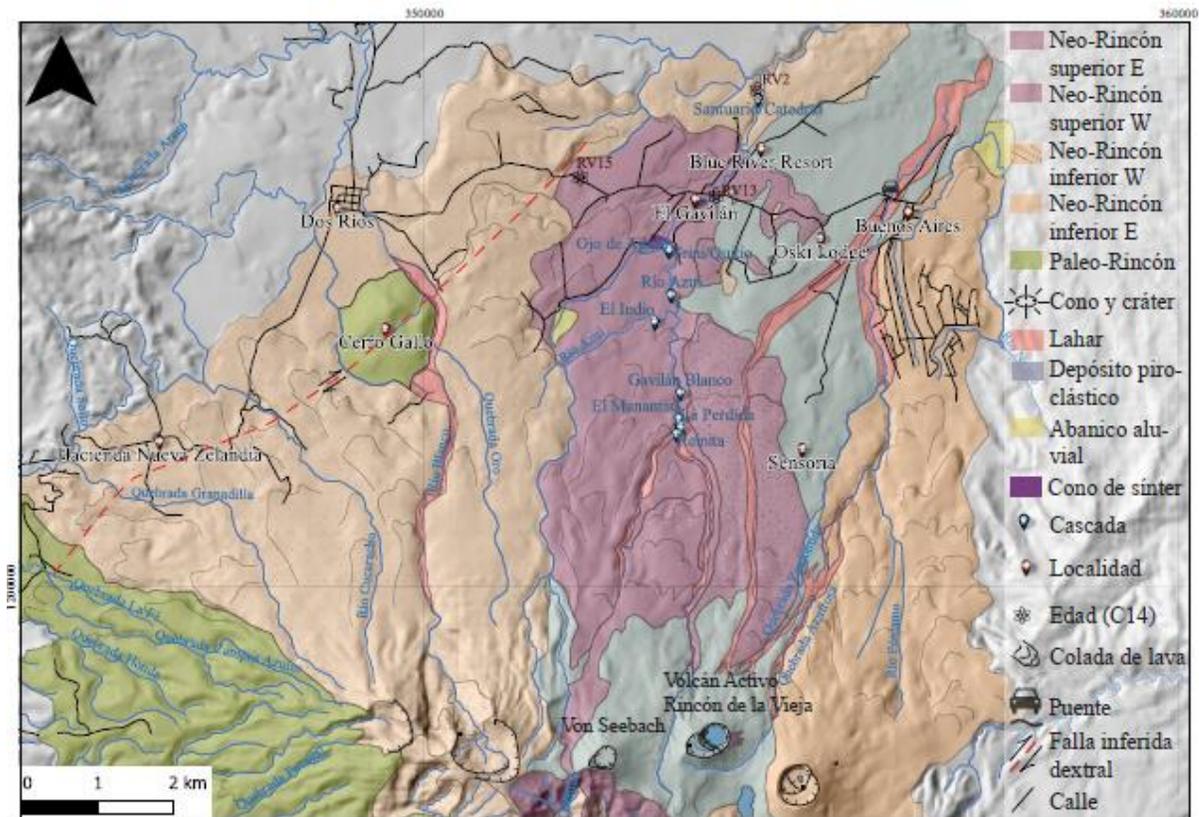


Fig. 3.3: Mapa geológico simplificado del sector caribeño del volcán Rincón de la Vieja, donde predominan las grandes unidades asociadas con el Neo-Rincón (con excepción de los depósitos plinianos de cañada), por lo que su peligrosidad es comparativamente mayor que el sector pacífico.



Fig. 3.4: Colada de lava que aflora en la cascada El Santuario o Catedral. Se observa su estructura prismática (disyunción columnar) y sobreyace al depósito de lahar datado en >42 ka. Estas coladas de lava deben de tener una edad cercana estimada en los 12 ka, dado que son similares a las que afloran cerca del puente sobre el río Azul con un desarrollo de suelo de tan solo de un metro.



Fig. 3.5: Dos tomas diferentes del mismo afloramiento cerca del punto sobre el río Azul. En la parte inferior se observa la brecha asociada con la parte superior de una colada de lava (marcado en azul), donde se desarrolló un paleosuelo. En líneas discontinuas anaranjadas se observa una capa de pómez meteorizada de color anaranjado, bajo la cual se tomó una muestra cuya edad de radiocarbono dio unos 10 ka. Esta colada de lava posiblemente es la misma que aflora en la cascada El Santuario y tendría una edad del fin del Pleistoceno. Al tope un coluvio y suelo húmico.



Fig. 3.6: En la parte inferior del corte de la plataforma del pozo geotérmico PLB-05 (sector pacífico del Rincón de la Vieja), se presente un posible flujo de cenizas antiguo sobreyacido por dos capas de pómez plinianas (trazos en negro). Allí se dató un suelo desarrollado sobre una discordancia erosiva (delimitado con las líneas rojas a trazos), con una edad (muestra RV 11E, punto azul superior) de unos 6400 años a. C. (=8.4 ka), pero el suelo bajo la capa pómez infrayacente (muestra RV 11E, punto azul inferior) posee una edad más reciente de 5650 años a. C. (~7.6 ka). Arriba se encuentra el paquete explosivo reciente del Rincón de 3650 a. C. (~5.6 ka), que le sobreyace. Esta capa de pómez anaranjadas podría ser equivalente a alguna de las plinianas presente entre Nueva Zelanda y Gavilán, datadas alrededor de los 10 ka.



Fig. 3.7: Estructura blocosa de de los afloramientos del campo de coladas de lava en bloques de Gavilán o Neo-Rincón Superior, con una edad de unos 5000 años.

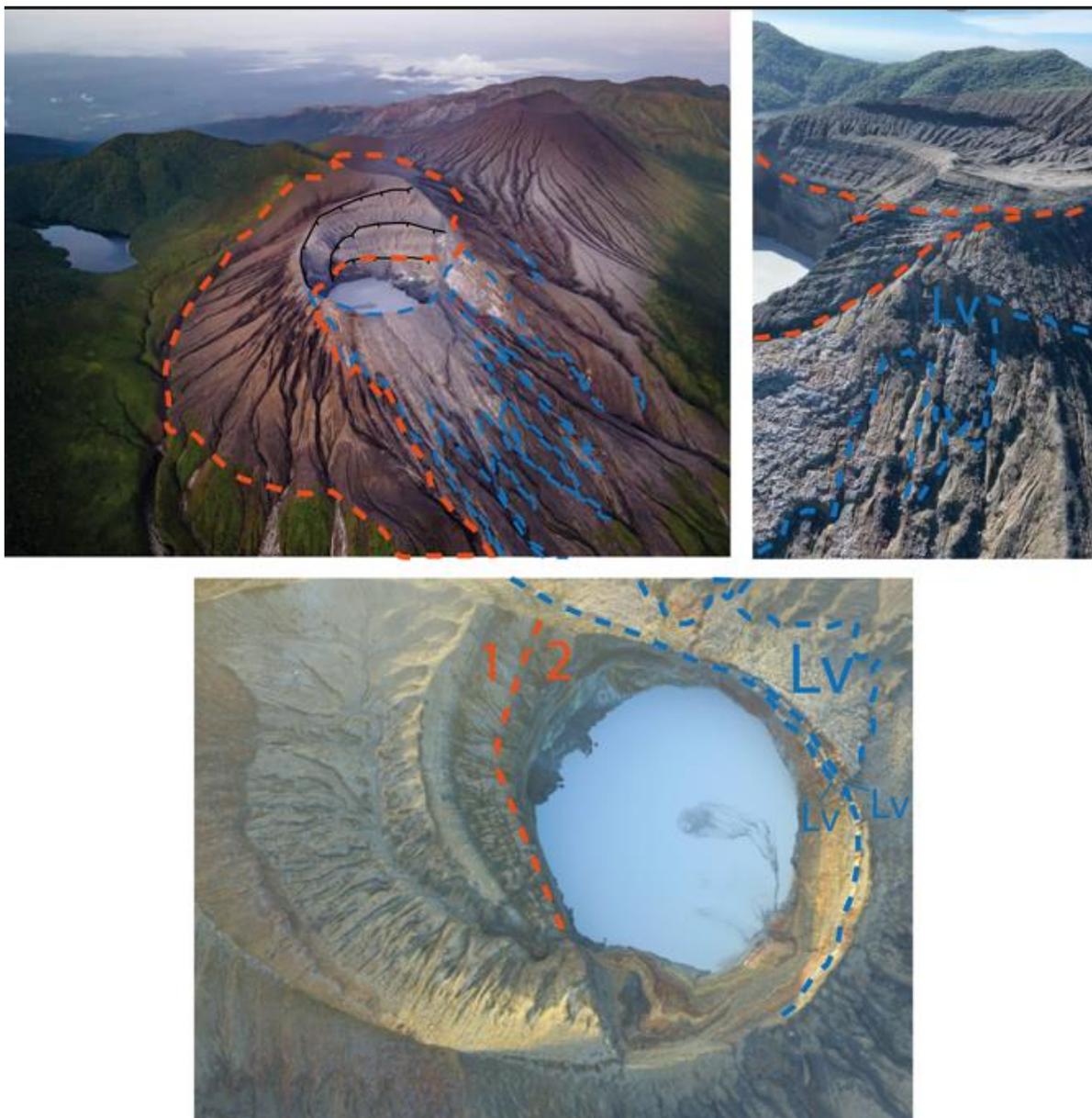


Fig. 3.8: Arriba, la fotografía de bajo ángulo izquierda muestra en el cráter Activo del Rincón de la Vieja el cono piroclástico (trazos anaranjados discontinuos) desarrollado sobre las coladas de lava (Lv: trazos azules) infrayacentes, que podrían ser el equivalente proximal del campo de coladas Gavilán (Neo-Rincón Superior). A la derecha se observa el cono visto desde el occidente, donde se distingue una discordancia erosiva entre la fase constructiva piroclástica. Abajo, el cráter del Rincón con las coladas (azul) y el anillo asimétrico de piroclastos sobreyacente (1), que sobreyace a la secuencia más antigua (2).

En la periferia del cráter Activo, una espesa secuencia de depósitos explosivos (tefras) de caída forman un anillo en el borde septentrional del cráter, lo que documenta la historia volcánica de los últimos miles de años, que está coronada por los depósitos históricos. Los aproximadamente 30 m de espesor del anillo de productos explosivos, corresponden con eventos que han variado desde netamente freáticos con eyección de bloques líticos y sedimentos procedentes del lago cratérico termomineral, hasta freatomagmáticos, pasando por eventos estrombolianos. De estos 30 m, al menos unos 20 m corresponden con los depósitos asociados con la erupción pliniana (Kempster, 1997) y los flujos piroclásticos del año 460 A.D. (Aguilar y Alvarado, 2020). Este depósito a 1.3 km al SW del cráter Activo está representado por depósitos de pobremente seleccionados de bombas y bloques, junto con cenizas y lapilli, que descansan sobre una superficie erosional, sugiriendo un significativo período de tiempo que precedió a la erupción (Kempster, 1997).

Algunas escorias, bloques y pómez holocenas en el cráter activo son de composición andesítica hasta dacítica (SiO_2 57.50-69.26 %) con mezcla de magmas (Funaioli y Marinelli, 1991; Kempster, 1997), mientras que escorias, pómez y pómez bandeadas que afloran en el flanco N del Rincón de la Vieja, presentes como CDPc medianamente soldadas no soldadas, son andesitas basálticas hasta dacitas (SiO_2 55.30-66.40 %; 10-20 % plag + 0.5-5 % px + 5-10 % mt + 0-1 % ol), ligeramente más básicas (Soto et al., 2003b).

Tal y como se mencionó, en el flanco N se presentan una serie de coladas de lava de diferente grosor que llegan a originar saltos morfológicos bajo la forma de múltiples cascadas, con diferentes nombres locales. Una de ellas sobreyace a un lahar antiguo conteniendo un tronco vegetal, que fue datado aportando una edad de > 42 ka. En ese sector existen coladas de lava morfológicamente más recientes, algunas de ellas como coladas en bloques, las cuales ya se había argumentado que podían ser relativamente jóvenes en el tiempo geológicos, quizás del Pleistoceno Superior Tardío o incluso Holoceno, pero no se habían datado hasta el presente informe. En efecto, de acuerdo con Soto et al. (2003a), las coladas de lava más recientes, en apariencia tuvieron como foco de emisión al cráter Von Seebach, alcanzando entre 3 y 8.5 km de distancia. Su edad se estimaba en 4000 años o más.

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. Se visitó el lugar de la datación y alrededores y corresponde con un suelo laterítico antiguo con bloques desarrollado sobre coladas de lava igualmente antiguas. Se desconoce por qué fue asociado con un lahar y menos su edad reciente, a menos que se datara el suelo húmico superior y se confundiera con un lahar.

Un evento relevante lo representa el depósito de flujo piroclástico del año 460 d. C. (Aguilar y Alvarado, 2020), recalibrado y calculado en el presente trabajo como del año 300 d. C., el cual presenta mala selección, pudiendo contener desde ceniza, hasta bloques métricos subangulares a subredondeados, con baja esfericidad y clastos de pómez. El depósito está soportado por una matriz de ceniza y se observaron estructuras características de los flujos piroclásticos, tales como estructuras mala selección, bombas, bloques vidriosos, madera quemada, chimeneas de desgasificación (Fig. 3.9 y 3.10).

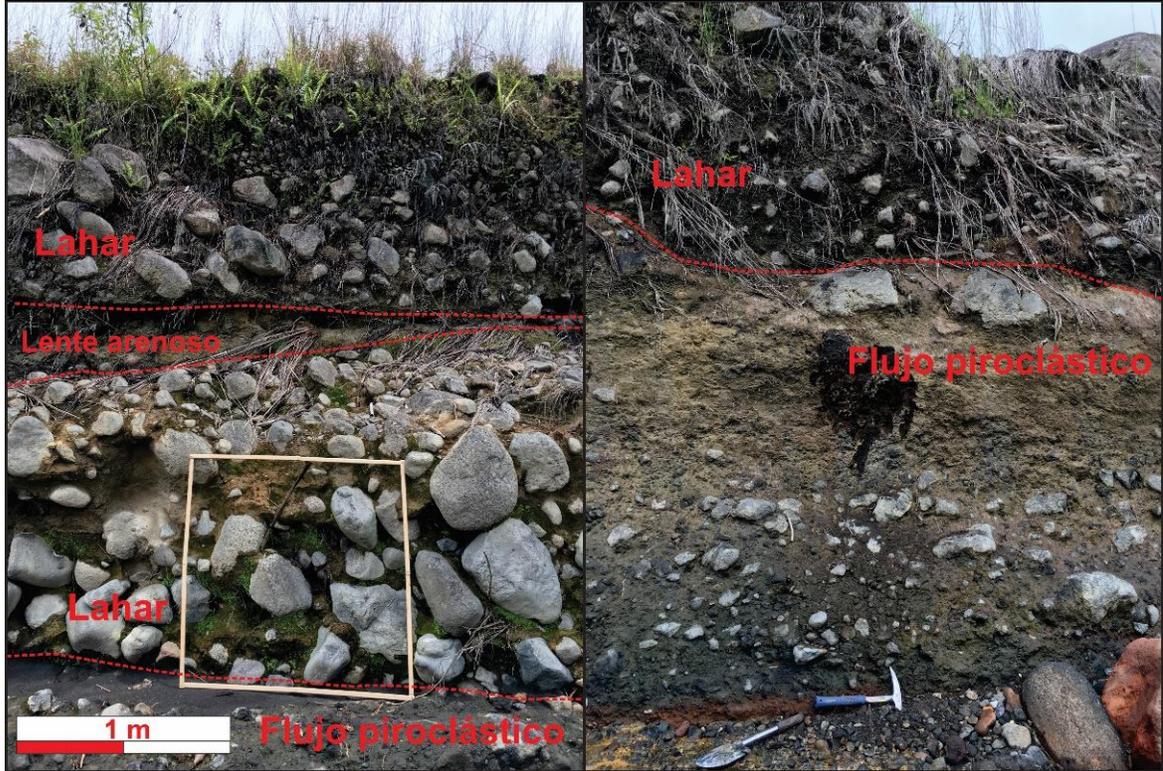


Fig. 3.9: Afloramiento donde los lahares sobreyacen a los depósitos del flujo piroclástico (Alpízar, 2018).

Sobreyaciendo al flujo piroclástico, se observaron varios depósitos de lahares, caracterizados por la presencia de arcilla en la matriz, mala selección, gradación inversa y presencia de materia vegetal y vesículas en la matriz. En este sitio se identificaron los depósitos de al menos dos lahares recientes y al comparar con las descripciones de Soto et al. (2003a), se interpreta que la unidad inferior corresponde a los lahares calientes de 1991, mientras que la unidad superior es más reciente. A unos 150 m aguas abajo desde el puente sobre el río Pénjamo, se identificaron un flujo piroclástico está sobreyacido por lahares. En este punto, además, se identificó lo que podría corresponder con un lahar más antiguo que el depósito de flujo piroclástico. En este punto se observó gran cantidad vegetación en la base de los depósitos de 1991 (Fig. 3.9), y remanentes de los depósitos de los lahares ocurridos durante los últimos años, con espesores de hasta 1 m.

Las bombas históricas del Rincón de la Vieja son andesitas (SiO_2 56.55-60.62 %) piroxénicas vidriosas con fenocristales (~40 %) de ortopiroxeno, clinopiroxeno (algunos con corona de opx), plagioclasas y magnetita, así como glomeropórfidos con textura pilotaxítica a intergranular (Alvarado, 1984; Tournon, 1984 y Carr et al., 1986).



Fig. 3.10: a) Vista general de lahares antiguos (quizás previo a los últimos 2 milenios), depósitos de flujos piroclásticos y lahares; b) Depósitos de los lahares de 1991 con vegetación en la base; c) depósitos de los lahares del 2017-2018 (Alpízar, 2018).

Referente a los depósitos de avalancha de escombros volcánicos (*volcanic debris avalanche*) con una extensión aproximada de 18 km² está presente en la falda S del volcán. Estos depósitos están mapeados, aunque su morfología pobremente preservada. Esta unidad ha sido relativamente bien estudiada, dado que la cortan 3 perforaciones profundas (> 1 km) y en 5 pozos para medir gradientes geotérmicos (< 340 m), además de los afloramientos. Presenta topografía de lomas (*hummocky*) que, aunque pobremente desarrollada, representada por relieves de hasta 20 m de altura cerca del cañón del río Colorado y en los límites del parque, en el sitio Azufrales (Barahona et al., 2001). Se encuentra constituido por clastos centimétricos a decamétricos de lavas angulares a subangulares con diferentes composiciones y grados de alteración (opalitizadas e hidrotermalizadas, meteorizadas), con ocasional pómez gris y rojiza, fragmentos de toba lítica, escorias y clastos de ignimbrita, en una matriz limo-arenosa de tonalidades café, violeta, crema, rojo y gris. En las cercanías de Azufrales se observan bloques laminados, masivos o vesiculares, o ambos, algunos porfiríticos y otros afaníticos, con grado de alteración muy variable; resalta la presencia de fracturas rellenas de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso. Los clastos de lavas pueden tener texturas de dirección de flujo (Fig. 3.11).



Fig. 3.11: Vista general del depósito de avalancha de escombros volcánica, en una plataforma del campo geotérmico. Se observa la estructura tosca imbricada (inclinada a modo de dominó) de los mesobloques con mala selección, indicativa de una dirección de flujo de derecha a izquierda. La alteración meteórica es avanzada, indicado de una edad no muy reciente.

3.1.3 Tefroestratigrafía

Hasta el año 2017, solo existían 4 dataciones de radiocarbono en el volcán Rincón de la Vieja, donde cada autor y su trabajo respectivo aportaba una edad: Melson et al. (1986), Melson (1988), Kempter et al. (1996) y, finalmente, 4) Soto et al. (2003a, b). El trabajo de Alvarado et al. (2018), publicado formalmente como Aguilar y Alvarado (2020), casi duplica el número de edades de radiocarbono y precisa mejor la cronoestratigrafía Holocena y aporta datos tefrocronoestratigráficos en la parte media del Rincón de la Vieja.

Schindlbeck et al. (2016a, b) reconocen en sus estudios de tefras depositadas en el océano Pacífico, varios niveles de cenizas presuntamente asociados con el Rincón de la Vieja, entre ellos la capa Río Blanco, y otra más denominadas *s1* (27 ka), *s5* (0.21-0.25 Ma), *s7* (0.27 Ma) y *s8* (0.29 Ma), entre otras menos claras, con volúmenes estimados entre 1.1 y 2.8 km³, concluyendo que son procesos eruptivos que ocurren con cierta frecuencia, geológicamente hablando.

El presente trabajo realizó nuevas secciones estratigráficas y seis dataciones de radiocarbono en el flanco Caribe y Pacífico, de niveles efusivos, explosivos y volcániclasticos donde se tenía poca información, complementando el cuadro cronoestratigráfico (Cuadro 3.2).

En general, los niveles explosivos del Holoceno están constituidos predominantemente por capas de cenizas y de lapilli, niveles de bloques (juveniles y no juveniles) y de bombas, con sus equivalentes litificados (tobas, tobas de lapilli, aglomerados y aglutinados). La selección granulométrica suele ser buena en las capas de caída y oleadas piroclásticas, a mala en los aglomerados, aglutinados y brechas explosivas proximales. La gradación puede ser normal, inversa, no gradados o sus combinaciones. Los espesores pueden variar desde un centímetro hasta varias decenas de metros en la parte proximal.

Los estratos de tefra estudiados suelen tener una morfología tabular, aunque los hay cuneiformes, sigmoidales y lenticulares (principalmente cóncavoconvexo y planocóncavo). Se pueden presentar masivos, estratificados y laminados, incluyendo la estratificación inclinada o cruzada. La superficie basal y superior puede ser bien definida (neta) o transicional. La bioturbación no es infrecuente y las estructuras de removilización (erosión, *slumps*, deslizamientos) pueden estar presentes a nivel local. Las estructuras de grietas de desecación pueden observarse en las cercanías al cráter Principal.

Cuadro 3.2: Nuevas dataciones de radiocarbono de madera, carbón y paleosuelos asociados con eventos volcánicos al Rincón de la Vieja, por orden creciente de edad, no necesariamente estratigráfico. A. P.: antes del presente, donde el presente es el año 1950 de nuestra era; a. C.: *antes de Cristo*; d. C.: *después de Cristo* o similar A. D.: *Anno Domini*.

Número de muestra	Material	Edad convencional a. P.	Edad calibrada	Latitud/ Longitud	Detalle sitio/ubicación
RV-19	Madera mineralizada	1900 ± 30	60-230 A.D.	10.865530630, -85.321832599	Enjambre de pómez contenido dentro del depósito del flujo piroclásticos masivo en la quebrada Zanjonuda
RV15 (14C-6315)	Paleosuelo poco orgánico	4670±30	3520-3370 a. C.	10.898406, -85.353594	Paleosuelo rojizo a la base de las coladas en bloques
RV11F (14C-6316)	Paleosuelo poco orgánico	6780±30	5730-5630 a. C.	10.816636, -85.411257	Paleosuelo a la base capa de pómez meteorizada
RV11E (14C-6313)	Paleosuelo poco orgánico	7560±30	6470-6380 a. C.	10.816636, -85.411257	Justo por arriba de la discordancia erosiva, en la base del suelo que se desarrolló
RV13 (14C-6314)	Paleosuelo poco orgánico	8830±40	8020-7740 a. C.	10.8962303800, -85.33698601	Sección del puente sobre el Río Azul. Paleosuelo a la base capa de pómez meteorizada
RV2 (14C-1611)	Tronco	>42 000	-	10.90837718, -85.33171140	lahar viejo debajo de las lavas en la cascada Santuario o Catedral

Las relaciones entre los estratos analizados son principalmente de tres tipos: a) *conformidad*, cuando no existió erosión ni ningún hiato significativo, es decir, existe concordancia y continuidad; b) *discordancia erosiva local* o *disconformidad*, donde existe una superficie irregular de carácter erosivo y c) *discordancia progresiva*, cuando las discordancias se van presentando de modo paulatino en el tiempo y espacio, principalmente en la parte proximal.

Cerca de la cima, por lo general en un radio de 4 km, las discordancias erosivas locales y los hiatos en la sedimentación piroclástica suelen ser frecuentes, ya sea por las fuertes pendientes que favorecen la erosión, por el efecto de sombra o sombrilla que presentan las laderas escarpadas, por la direccionalidad de la mayoría de los eventos o los continuos deslizamientos que modifican y cubren la estratigrafía.

Los suelos recientes (superficiales) pueden variar entre < 10 cm hasta > 2 m de espesor en función del flanco del volcán y su distancia. Su desarrollo edafológico puede variar desde tefras muy sanas o con cierto grado de meteorización, donde se reconoce aún su origen (cenizas y lapilli meteorizados), hasta suelos cafés con un mejor desarrollo edáfico, o bien, suelos oscuros ricos en materia orgánica. Justo en algunos de los paleosuelos fue de donde se recolectaron muestras para dataciones de radiocarbono, algunos de ellos con rico contenido orgánico (incluso trozos de materia carbonizada), mientras que otros sin contenido evidente de materia orgánica, resultaron estériles para una edad, mientras que otros sí dieron resultados convincentes (Fig. 3.12).



Fig. 3.12: Corte de carretera en el sector caribeño del Rincón de la Vieja donde depósitos de pómez y capas de cenizas se presentan profundamente meteorizadas, con edades de 10 ka o mayores.

En el Rincón de la Vieja existe una capa piroclástica guía o marcadora que corresponde con el nivel explosivo bautizado como capa Río Blanco (Kempster et al., 1996), llamada también Tefra Quebrada Grande (Melson, 1988), que representa 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, por lo que las tefras estudiadas estarán referidas con base en su posición estratigráfica con respecto a dicho nivel (Fig. 3.13).

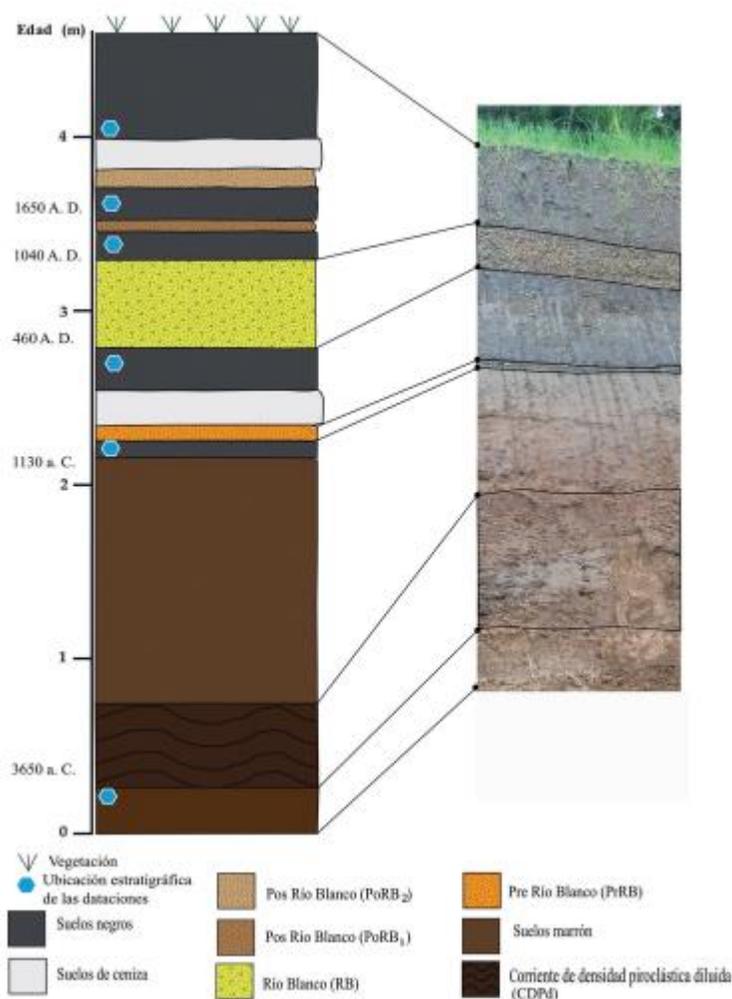


Fig. 3.13: Columna estratigráfica: representación de los distintos niveles estudiados en campo en el flanco Caribe con la fotografía de un afloramiento (1197694N/346336E). Las edades de las dataciones se presentan en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3: Niveles de tefra y lahares con dataciones de radiocarbono en el Rincón de la Vieja y su lugar de recolección (Aguilar y Alvarado, 2020).

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.	-	-
RV-CH-D6	Suelo negro debajo PoRB ₂	560±30 a.P.	1428-1890 A. D.	1650 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.
RV-P5-D13	Suelo sobre PrRB	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 debajo PrRB	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 (Kempster 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 Kempster et al. (1996).

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 PoRB ₂	1195012N/347957E
RV-CH-D6	Suelo negro debajo PoRB ₂ 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

Tefras antiguas: Kempter et al. (1996) data una muestra con ^{14}C en 27000 ± 560 años, del lado sur del cono Von Seebach, correspondiente a la erupción explosiva más antigua datada con radiocarbono (Cuadro 3.3) de la fase eruptiva subreciente del Rincón de la Vieja (Tefra Unidad Grupo 2, *sensu* Kempter, 1997). Las rocas piroclásticas provienen de las estructuras volcánicas más occidentales y son en su mayoría de composición andesítica con escasas andesitas basálticas y dacitas (Chiesa et al., 1994; Kempter et al., 1996).

Corrientes de densidad piroclástica diluida pre-Río Blanco: 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. 3.14). 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.

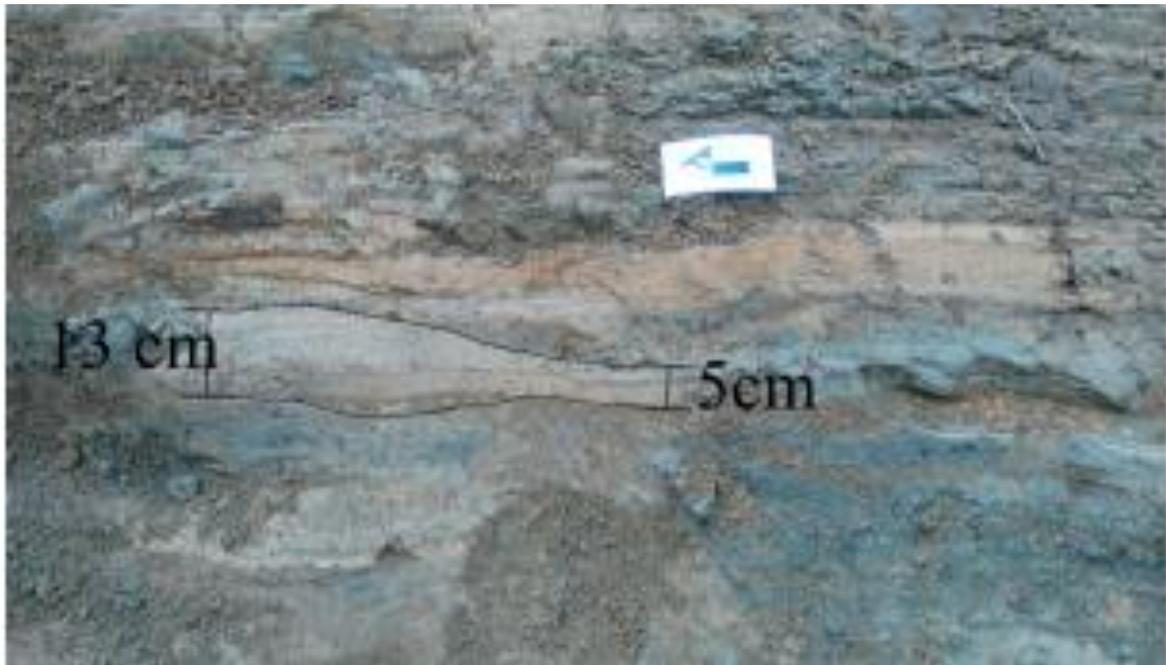


Fig. 3.14: Capas de cenizas lentiformes interpretadas como corrientes de densidad piroclástica diluida del 3650 a. C., a los 4 m desde la superficie se encuentran estas capas de ceniza con acuñamientos (1197694N/346336E; Aguilar y Alvarado, 2020).

Capa subpliniana pre-Río Blanco (PrRB): Los estudios de campo 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 (Fig. 3.15).

Sin embargo, en el lugar donde se va a establecer el centro de producción del campo geotérmico Borinquen (aprox. $10^{\circ}49'21.03\text{N}$, $-85^{\circ}25'23.90''\text{W}$) y alrededores, en los cortes de carretera y en la excavación donde se va a construir la planta, se observa que bajo la capa pliniana Río Blanco (que se describirá a continuación), a unos 25-35 cm bajo el suelo negro, existe una capa de cenizas grises, masiva, de unos 45 a 55 cm de espesor (adelgazamiento y engrosamiento en pocas centenas de metros), con lapilli y cenizas pumíceas en su parte inferior, indicio que podría ser un depósito de oleada piroclástica precedido por uno de caída de pómez.

Dado que el espesor de suelo sobreyacente es de unos pocos decímetros, se podría pensar en que es el equivalente eruptivo de la capa subpliniana de 1130 a. C., aunque no se excluye la posibilidad de que corresponda con las oleadas piroclásticas descritas por Aguilar y Alvarado (2020) del año 3650 a. C., que sobreyacen a un suelo marrón, situación que también ocurre en dicho sector (Fig. 3.15). Sin embargo, si correspondiera con esta última edad más antigua, sorprende que el desarrollo del suelo no sea extenso.

En tal caso, en el sector donde se va a instalar la central geotérmica, se encuentra en un punto elevado, distante 9.5 km al W del cráter activo del Rincón de la Vieja, lo que ayuda o le protege, en cierta medida, a las futuras instalaciones en caso de un evento explosivo fuerte y extraordinario que genere oleadas piroclásticas, pero no así para un pliniano de caída, aunque su probabilidad es baja. Resulta muy probable que dichas erupciones pre-Río Blanco, particularmente las oleadas del 3650 a. C., provengan del con Von Seebach.

Otro aspecto relevante, es que no existe una capa volcánica importante sobre la capa pliniana Río Blanco, lo que induce a pensar que en los últimos 1500 años no ha habido un evento eruptivo importante que afectara dicho sector (Fig. 3.15).

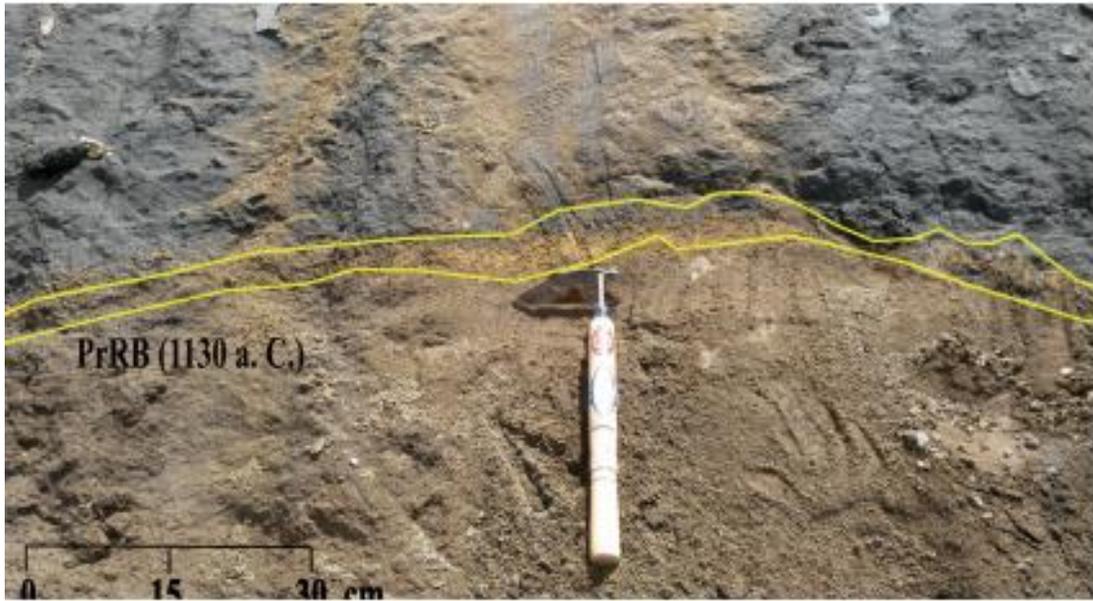


Fig. 3.15: Arriba, Capa PrRB resaltada en amarillo, cuya edad fue determinada en 1130 a. C. (1196288N/345567E; Aguilar y Alvarado, 2020); abajo, la capa de pómez Río Blanco infrayacida por una capa de cenizas con un nivel pequeño de lapilli de pómez hacia la base sobre un suelo rojizo. Esta última localidad corresponde donde se va a establecer la planta geotérmica Borinquen. Un espeso suelo oscuro sobreyace a la capa pliniana.

Capa pliniana Río Blanco y flujos piroclásticos del flanco norte (CDPd y RB): Como bien lo hacen notar Kempter (1997) y Kempter et al. (1996), indican 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 (Fig. 3.15 y 3.16).

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. A juicio de dicho trabajo, comentan que se dio 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 (Fig. 3.17).

La capa pliniana RB constituye un nivel guía para el flanco occidental del volcán Rincón de la Vieja, mientras que las otras capas volcánicas sobreyacentes e infrayacentes suelen no siempre estar presentes en los afloramientos, debido a que muchas de ellas corresponden con oleadas piroclásticas o se entremezclaron con los suelos.



Fig. 3.16: En la parte superior el aspecto de la capa pliniana Río Blanco (RB) dividida en 3-4 supcapas o pulsos. En la parte inferior, un acercamiento donde se observa un fragmento de cerámica indígena pre-RB. Obsérvese el suelo de color negro profundo (andisol rico en humus) desarrollado tanto arriba como debajo de la capa.

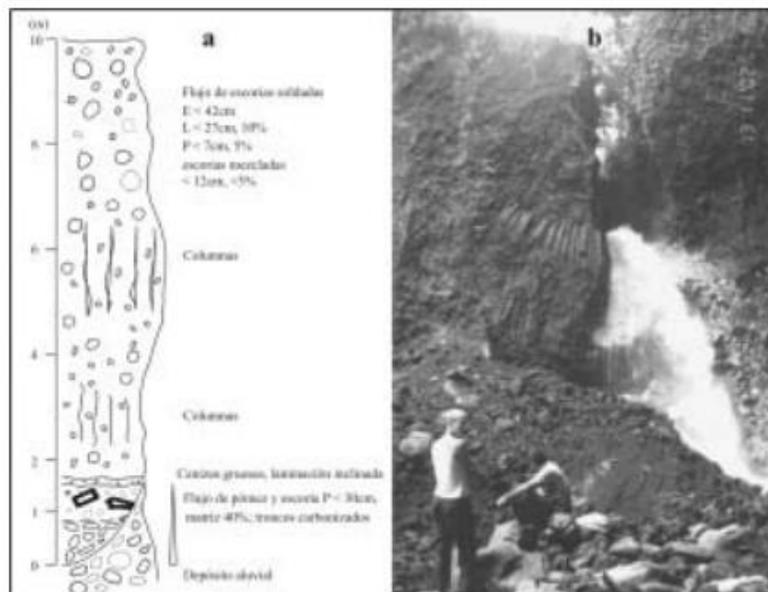
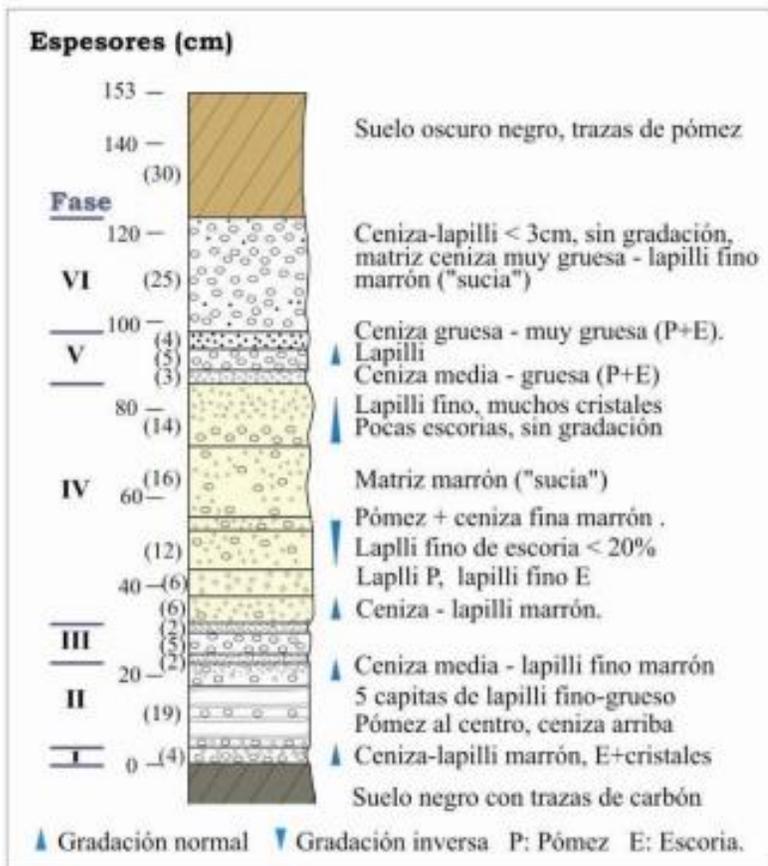


Fig. 3.17: Arriba, columna estratigráfica del depósito de caída de la Tefra Río Blanco en el sitio Borinquen, donde se muestran las diferentes fases de la erupción (reformado de Soto et al., 2003a, b) y abajo, columna del depósito del flujo piroclástico y afloramiento en la quebrada Zanjonuda.

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. 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.

Schindlbeck et al. (2016b) estima el volumen de 1.1 km^3 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 km^3 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 km^3 (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/m^3 y una densidad del magma dacítico de 2600 kg/m^3 y se utilizó el valor del volumen total, lo que da un valor de volumen DRE de 0.46 km^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. 3.18). La integración de las isopacas muestra líneas muy distorsionadas (no regularmente ovaladas), posiblemente producto de vientos fuertes en varias direcciones (quizás hasta vientos encontrados) al momento de la erupción. Aguilar y Alvarado (2020) estimaron la altura de la columna en 30 km, lo cual, sumado a las características del depósito y a su volumen, concuerda con una erupción pliniana con un VEI 5.

Referente a la corriente de densidad piroclástica concentrada (flujo piroclástico), asociada con el río Blanco, que aflora en algunos cauces y llanos en el flanco Caribe del Rincón de la Vieja, particularmente en los ríos Azul y Pénjamo hasta la confluencia con el río Cucaracho, a unos 10 km del cráter Activo (Kempter, 1997; Paniagua et al., 1996; Soto et al., 2003a, b). El depósito está constituido por escorias negras, centimétricas a decimétricas, muchas de ellas bandeadas (mezcla mecánica de magmas), enjambres de pómez blancuzcas a rosadas de similar granulometría, bloques juveniles de lavas con forma de bombas coliformes con corteza de pan, algunos mesobloques métricos con disyunción columnas, y un bajo porcentaje de líticos no juveniles, todos inmersos en una matriz de ceniza predominantemente escoriácea y pumícea. Posee mal selección, a veces gradación inversa y puede presentarse desde un depósito inconsolidado hasta soldado con disyunción columnar, pasando por un depósito masivo bien compacto. Su espesor puede superar los 6 m de grosor (Fig. 3.17 y 3.19).

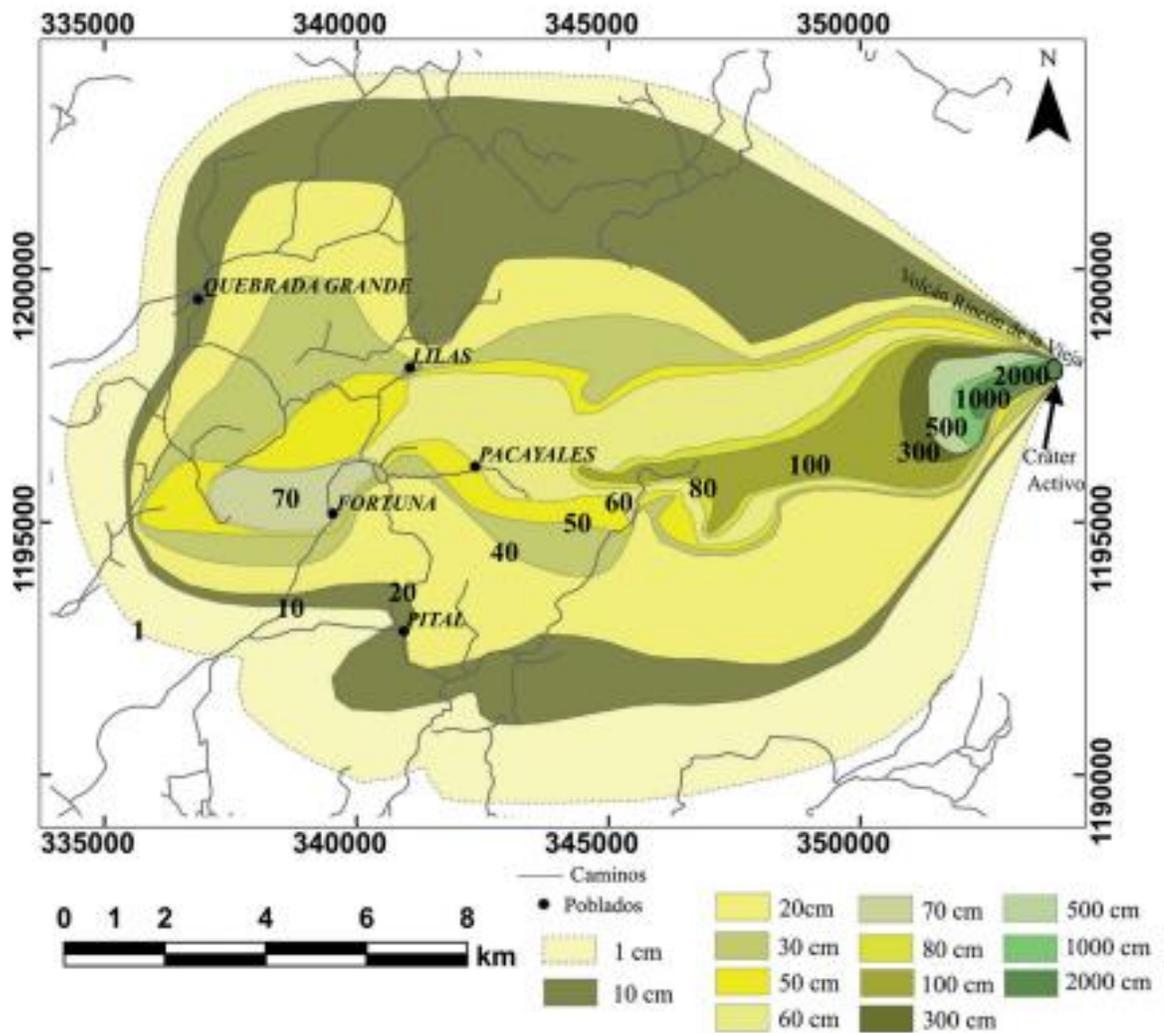


Fig. 3.18: Isopacas de la pliniana RB, se observa cómo se dan dos máximos, uno cercano al cráter y otro al WSW en la parte distal, cerca de Fortuna con un grosor de unos 70 cm (Aguilar y Alvarado, 2020).



Fig. 3.19: Diferentes aspectos texturales (compactación, estructura, selección y granulometría), de fábrica y componentes litológicos (escorias, bloques juveniles, pómez, bombas con estructura coliflor y corteza de pan) del depósito de flujo piroclásticos asociado con el evento RB.

Referente a la edad, Melson (1988) realizó la primera datación ^{14}C en el suelo (dató un fragmento de copal) a la base de RB aportado una edad convencional de 3490 ± 60 años a. P., es decir, 1540 a. C., edad que investigadores posteriores (Kempter, 1997; Soto et al., 2003a, b; Alpízar, 2018, entre otros) tomaban como referencia este dato para designar la edad de este depósito y como una capa clave cronológica.

Kempter (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 (1600 ± 60 a. P.), 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) no los correlacionan estos flujos (=CDPc) 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 en el informe de Alvarado et al. (2018) y publicadas por Aguilar y Alvarado (2020), permiten restringir la edad del evento de forma más apropiada y reciente (Cuadro 3.3), correspondiendo al año (490 A.D.). Puesto que el carbón datado por Soto et al. (2003a, b) se encontraba bajo una CDPc 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 por el evento volcánico en sí aporta una mejor edad que los suelos que encierran la capa de pómez, es por esto por lo que se escogió la edad de 460 A.D., como fecha 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. Aguilar y Alvarado (2020) no solo concluyen que son eventos contemporáneos, sino, además, que son comagmáticos, dado que las relaciones de los elementos trazas son similares.

La edad aportada por Aguilar y Alvarado (2020) queda *grosso modo* confirmada con base en el estudio arqueológico que realizó Hernández (2018). En dicha investigación se realizaron varias dataciones de radiocarbono a 5-40 cm bajo la capa RB aportando edades calibradas en el ámbito de 510 a. C. a 125 años d. C. y otro número de dataciones a 50-60 cm sobre la RB con edades en entre 1320 y 1635 d. C. Es decir, la RB estaría encerrada entre el año 125 d. C. y 1320 d. C., que corresponderían con las fechas más restringidas de dicho estudio (emparedado o sándwich de la capa RB). Aunque el rango es muy amplio, por haberse tomado las muestras a cierta distancia estratigráfica de la RB (tanto hacia arriba como hacia abajo), puesto que dichas edades fueron realizadas con fines arqueológicos, no tefroestratigráficos, confirman, sin embargo, que su edad ha de estar en el primer milenio de nuestra era y no en el milenio previo, como se había establecido hace algunos pocos años atrás.

Una nueva edad se realizó de un tronco carbonizado y mineralizado contenido en un enjambre de pómez dentro de la CDPc de Río Blanco, aflorante en la quebrada Zanjonuda (Sensoria). La edad de laboratorio fue de 1900 ± 30 años a. P., que una vez calibrada aporta

un rango del 60 al 230 A.D. (Cuadro 3.2). Esta edad es uno o dos centenares de años más joven que la edad aportada por Aguilar y Alvarado (2020).

Si se aplica el método de ponderación explicado en Long y Rippeteau (1974) para las dos edades tomadas en el mismo flujo piroclásticos (1600 ± 60 de Soto et al. y 1900 ± 30 a. P. del presente trabajo), tendríamos una edad media 1800 ± 27 años a. P., que una vez calibrada daría un rango de 321 a 253 A.D., por lo que el evento debió de ocurrir hacia el año 300 A.D.; esta es la nueva edad del evento RB, la que se toma como valedera para esta importante unidad estratigráfica y capa guía.

Eventos Pos-Río Blanco (PoRB1 y PoRB2): En opinión de Kempter (1997) y Soto et al. (2003a, b), 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. Los estudios de campo realizados por Alvarado et al. (2018) y Aguilar y Alvarado (2020) durante el 2017-2018, aportan nuevos datos que restringen la edad de los depósitos más recientes, donde se evidencian varios eventos subplinianos pos-RB (Fig. 9). Esta secuencia consiste en 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. 3.20). Estas capas fueron datadas en 1040 A. D. y 1650 A. D., lo cual indica que hay erupciones 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.

Es un hecho conocido por aquellos geólogos que han trabajado la tefroestratigrafía que no resulta fácil la correlación de las capas explosivas cuando no se dispone de capas guías o son pocas; adicional a que los afloramientos son limitados, ya sea por estar distanciados o por la cobertura vegetal y el intemperismo con desarrollo de suelos, hecho particularmente frecuente en los trópicos. Si a ello se le agregan las discordancias locales, lo cual genera que el registro sedimentario sea incompleto, en particular si se tiene en cuenta que los depósitos explosivos pueden estar condicionados por la dirección del viento al momento de la erupción y por la topografía, aspecto que no solo genera depositación a modo de lóbulos superpuestos parcialmente, sino grandes variaciones de facies laterales y verticales; todo ello agrega dificultades en la correlación.

Además, las capas volcánicas no se extienden indefinidamente, sino que tienen un límite espacial y lateralmente acaban en acuñaamientos, interdigitación o cambios en sus aspectos texturales supra mencionados, incluso en cortas distancias.

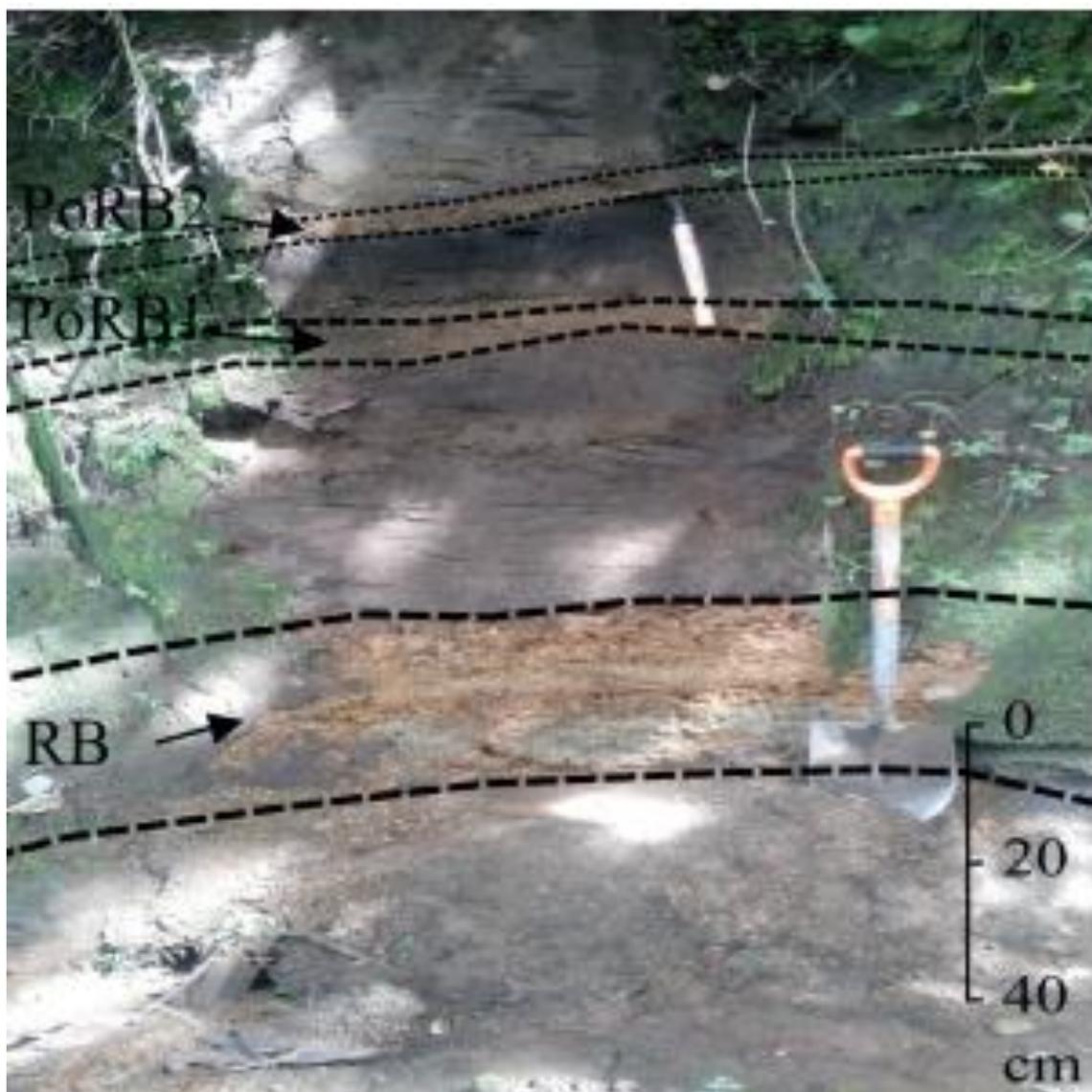


Fig. 3.20: Detalle de los eventos posteriores a Río Blanco, PoRB1 y PoRB2, intercalados por cenizas grises (1195012N/347957E; Aguilar y Alvarado, 2020).

Discusión sobre la tefroestratigrafía y la recurrencia eruptiva reciente

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 km³ 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 > 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 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. 3.21).

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. Las erupciones se volvieron a presentar a partir del 2011 al presente (las últimas a al tiempo de cierre de este trabajo (setiembre, 2022), 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 \geq 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.

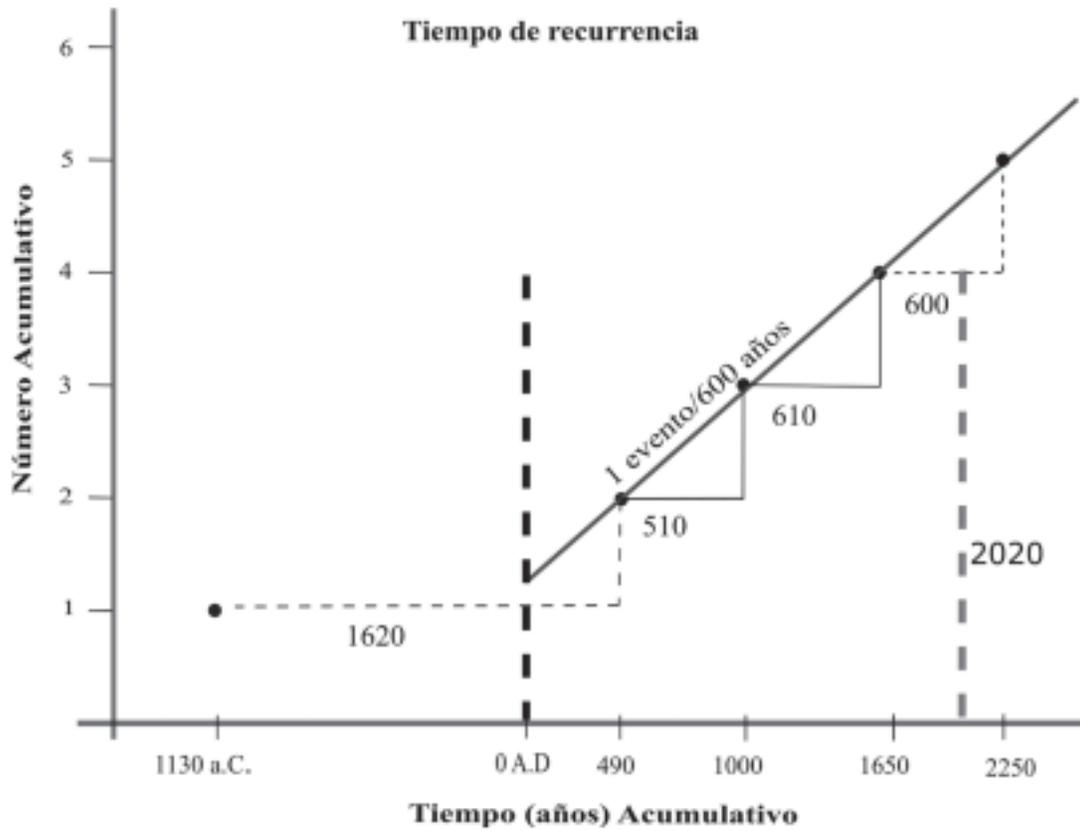


Fig. 3.21: Estimación de la recurrencia. La línea recta inclinada es la de mejor ajuste. La línea punteada en negro marca el año cero de nuestra era. El último punto de la recta representa la proyección de una erupción importante (VEI 4-5) en el futuro, la cual correspondería al año 2250. La línea punteada gris representa el año 2020 (Aguilar y Alvarado, 2020).

3.2 GEOMORFOLOGÍA

El volcán Rincón de la Vieja exhibe una forma elíptica de 20 km de largo, con el eje mayor en sentido WNW-ESE. La parte cuspidal se presenta como una arista alargada y arqueada con dirección NW-SE, relativamente plano-ondulada, con un ancho de 1-1.5 km. Posee pendientes primarias elevadas en su cima de entre 20° y 33°, que en su parte disminuyen a 17°-22°, mientras que en las partes bajas son de 3° a 8°. Claramente, existen escarpes pronunciados que se deben a contactos litológicos contrastantes (coladas de lava con depósitos piroclásticos), deslizamientos y cascadas (muchas en el contacto entre dos coladas de lava). Las partes más antiguas suelen tener una mayor incisión fluvial y, en muchos casos, pendientes generales mayores (Fig. 3.22 y 3.23).

Healy (1969) realizó una descripción morfológica de la cima del volcán, utilizando fotografías aéreas y su propio trabajo de campo; fue el primero en mencionar que la estructura está conformada por al menos nueve conos distribuidos a lo largo de dos alineamientos. Bergoeing (1978, 1998, 2007, 2009) y Bergoeing et al. (2003, 2010), realizan descripciones geomorfológicas generales de los rasgos más sobresalientes del macizo del Rincón de la Vieja. Sin embargo, sobreestiman el número de estructuras caldéricas, muchas de las cuales no poseen soporte geológico ni geomorfológico. Además, al compararse sus libros y aún, dentro del mismo trabajo, la extensión, geometría, número y ubicación de las calderas propuestas cambia notoriamente. Alvarado (1989, 2000, 2021) y Soto et al. (2003a) realizan descripciones geomorfológicas y aportan mapas con diferente grado de detalle que vienen a complementar y actualizar la distribución de las principales unidades, tanto geológicas como geomorfológicas. Abarca et al. (2021) revisa toda la literatura y actualiza el mapa geomorfológico, particularmente incluyendo detalle de campo en su flanco Caribe. Bakkar (2017), realizó un estudio morfotectónico y propuso un total de 11 fallas corticales en el flanco meridional del macizo.

Los ríos Ahogados y Cucaracho limitan el macizo del Rincón de la Vieja en su flanco occidental, mientras que la quebrada Provisión y el río Caño Negro lo limitan en el oriente. En el flanco caribeño, sobresalen los ríos Cucaracho, Blanco, Azul, Pénjamo y Negro, así como las quebradas Azufrosa, Azufrada y Zanjonuda. El río Cucaracho, el colector principal del flanco Caribe, posee un patrón meándrico encajado, debido al ascenso generado por el bloque levantado asociado a la falla Caño Negro; su cañón puede alcanzar los 325 m de profundidad.

Contrario a muchos volcanes de la cordillera de Guanacaste y Central, donde el grado de disección el flanco norte (caribeño) es más profundo con respecto al flanco Pacífico, lo opuesto ocurre en el Rincón de la Vieja. La razón está relacionada con que muchos de los conos volcánicos recientes (Cuaternario Superior asociados con el Neo-Rincón) vertieron sus coladas de lava, flujos piroclásticos y lahares hacia el flanco Caribe, cubriendo el paisaje rugoso previo y suavizando con ello el relieve. Una excepción es el cerro Chato (1130 m s. n.m.), un volcán extinto y muy derruido (disectado) por la erosión.

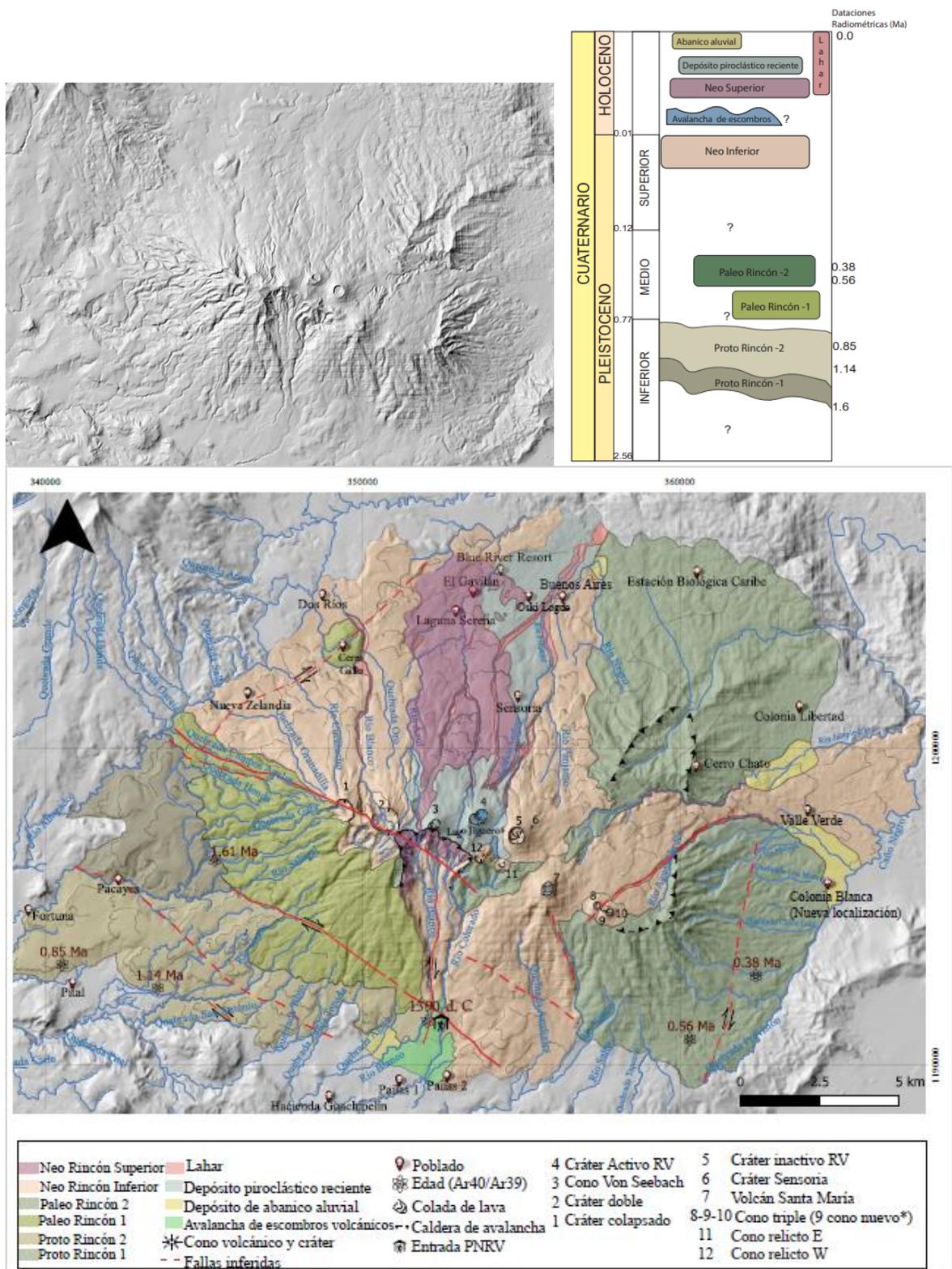


Fig. 3.22: Relieve del volcán Rincón de la Vieja y mapa geomorfológico, donde se visualizan diferentes patrones de drenaje, grados de erosión y geomorfias.



Fig. 3.23: Perfil del macizo del volcán Rincón de la Vieja. Arriba visto desde el flanco SW. Se perfila que no posee la forma típica cónica y que sus pendientes superiores son de tan solo unos 20° en general y las inferiores de 10° - 12° o menos, emulando un escudo andesítico. Abajo, su flanco occidental con sectores muy derruidos por la erosión (cárcavas, gargantas) y deslizamientos.

A continuación, se desglosan y describen aspectos geomorfológicos, base para el estudio de amenaza volcánica.

3.2.1 Geoformas volcánicas primarias

Corresponde con aquellas geoformas constructivas producto de la actividad volcánica, ya sea efusiva o explosiva (Fig. 3.22).

3.2.1.1 Campos de coladas de lava

Unidad campo de coladas de lava Cuesta Diablo

Corresponde con un campo de coladas de lava superpuestas del proto-Rincón de la Vieja que afloran en los sitios Pacayales, Mata de Caña (Loma Sabana Verde), Coyol, Lagunilla y Guanacastillo, en el flanco SW del volcán, entre los poblados de las Lilas y Pital. Conforman coladas extensas y espesas (entre 100 m y más de 290 m de espesor total y varios kilómetros de extensión), que aún guardan la morfología de lenguas de lava con frentes morfológicos bien definidos (pendientes entre 7° y 22°), y pendientes generales de la lengua de lava entre 3° y 7°, incluso bifurcándose estas al chocar con el domo cerro Fortuna (Fig. 3.22 y 3.24). Geoquímicamente corresponden con andesitas ricas en magnesio y con megacrístales de olivino (SiO₂ 57.62-58.54 %, MgO 4.46- 5.05 %; Tournon, 1984; Funaioli y Marinelli, 1991; Kempter, 1997; Barahona et al., 2001). Poseen un desarrollo de suelos rojizos de 2-4 m de grosor, así como meteorización esferoidal. Este campo de lavas quizás está asociado con un escudo o plataforma de lava andesítica, morfocronológicamente con edades ⁴⁰Ar/³⁹Ar entre 1.6 ± 0.2 y 1.1 ± 0.03 Ma para las partes basales, mientras que 0.85 ± 0.05 Ma para las más recientes (Alvarado y Gans, 2012).

Unidad campo de coladas de lava Meseta Aguacatales

Corresponde con un campo de coladas de lava procedentes de los conos gemelos ubicados al oriente del Rincón de la Vieja. De ambos conos se vertieron coladas de lava que originaron una topografía suavizada (plano-ondulada), comparada con los relieves más disectados circundantes. Está limitada por los ríos Jalapiedras y Aguas Verdes, donde las coladas de lava orientadas al NE, al chocar con el cerro Chato, se desviaron al oriente (Fig. 3.22).

Unidad campo de coladas de lava Gavilán

Desde el cono Von Seebach y también cráter Activo (se escribe con mayúscula por el principal) se derramaron coladas de lava que originaron una topografía suavizada (plano-ondulada), donde sobresalen del relieve topográfico la morfología en lenguas y los frentes de coladas de lava superpuestos. Las coladas procedentes del cono Von Seebach se denominaron Neo-Rincón Superior W, mientras que las del cono Activo, se llamaron Neo-Rincón E, al parecer algo más recientes. Las pendientes regionales de este campo de lavas son de 7°-8°. Estas coladas de lava llegaron incluso hasta el sector entre Gavilán y Buenos Aires como una serie de lenguas que sobresalen de la topografía por la gran cantidad de bloques métricos

angulares que le confieren a la topografía un relieve irregular (malpaís) con poco desarrollo de suelo. Su espesor en la parte distal es de a lo sumo unos 4-10 m de grosor y poseen una meteorización incipiente (Fig. 3.22 y 3.25).

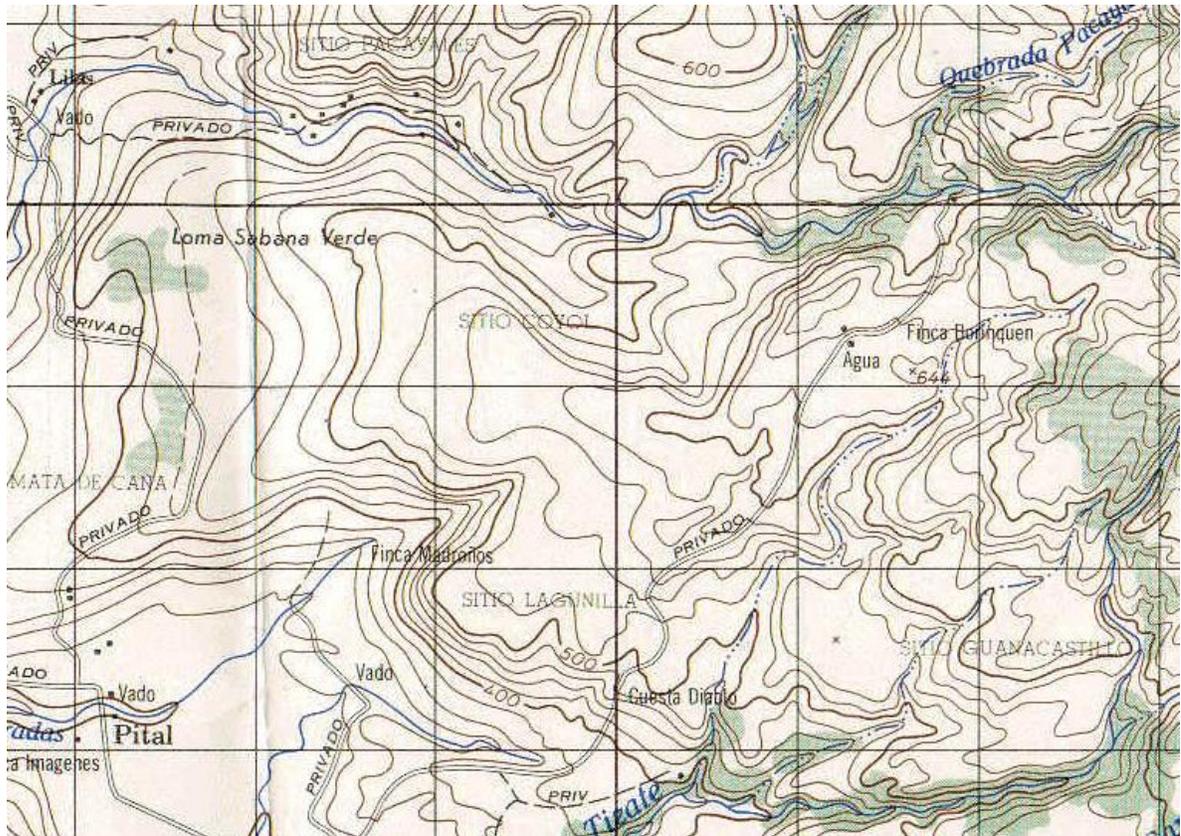


Fig. 3.24: Topografía y afloramientos de las coladas de lava del campo Cuesta Diablo con profunda meteorización esferoidal y cubiertas de un suelo rojizo y tapizadas por las capas de piroclastos de los últimos 6000 años.



Fig. 3.25: Morfología de las coladas de lava en bloques del campo Gavilán (Neo-Rincón Superior) con muy poca meteorización y localmente cubiertas por un delgado suelo húmico.

Conos y cráteres volcánicos

Se tiene que tener en cuenta, que Seebach (1864) es el primero en reportar un ascenso al volcán Rincón de la Vieja y describe con detalle uno de sus conos con su cráter, que posteriormente llevaría el nombre de Seebach-Braun; debido a muy malas condiciones atmosféricas (lluvia, viento y temperaturas bajas), no logró observar ni ubicar el cráter Activo.

Posteriores ascensos realizados por naturalistas y curiosos desde los inicios del siglo XX lograron llegar al cráter Activo e incluso fotografiarlo, así como hacer observaciones sobre la presencia y aparente ausencia del lago cratérico, así como su grado de actividad (Baltodano, 1920; Trejos, 1959; Tristán, 1921a, b; Salguero, 1976).

Mooser et al. (1958) describe que la cumbre del Rincón de la Vieja posee varios centros eruptivos (no especifica cuantos, pese a que ya se contaba con mapas topográficos 1:50 000), donde al menos tres de ellos tenían cráteres de subsidencia. Presenta quizás el primer esquema de los tres cráteres principales y realiza otro de ellos vistos desde el N (Fig. 3.26).

Posteriormente, Healy (1969) constituye en el primero en describir la geomorfología cuspidal de los 9 focos eruptivos con buen detalle, pero desgraciadamente tan solo los ubica en un mapa muy reducido sin el detalle de su fotointerpretación.

Bergoeing (1978) presenta por primera vez un esquema geomorfológico de 5 focos eruptivos, aunque se equivoca al decir que la vertiente Caribe es la que se encuentra recubierta de cenizas.

No sería hasta Alvarado (1989) en que se presenta la ubicación más precisa y un esquema geomorfológico de los 9 focos eruptivos descritos por Healy (1969), incluyendo los dos posibles focos con signo de interrogación, ubicados al SW y ESE del lago Jilguero, ya mencionado por Healy. Healy (1969), sin embargo, no incluye el cráter satelital del cono Rincón Viejo (reconocido por Bergoeing, 1978) y el cono doble o triple lo incluye en un solo cono (numerado por él como cono N.º 9).

Un nuevo análisis de la morfología cuspidal fue realizado, donde aparte de los 9 conos reconocidos en la literatura, se agregan otros tres posibles focos eruptivos (Fig. 3.27; Cuadro 3.4).

Contrariamente a los otros macizos volcánicos de Costa Rica, los focos cratéricos cuspidales del Rincón de la Vieja, se alinean casi paralelos al eje de la cordillera volcánica y se ubican ligeramente en su flanco caribeño en la provincia de Alajuela. En general, los conos no son simétricos, dado que se edificaron sobre el macizo montañoso del Paleo-Rincón; poseen pendientes entre 20° y 30° con diferentes elevaciones y cráteres con diferente grado de conservación, así como una evolución morfológica variada (desde simples hasta complejos y anidados) con diámetros igualmente variados (Fig. 3.27).

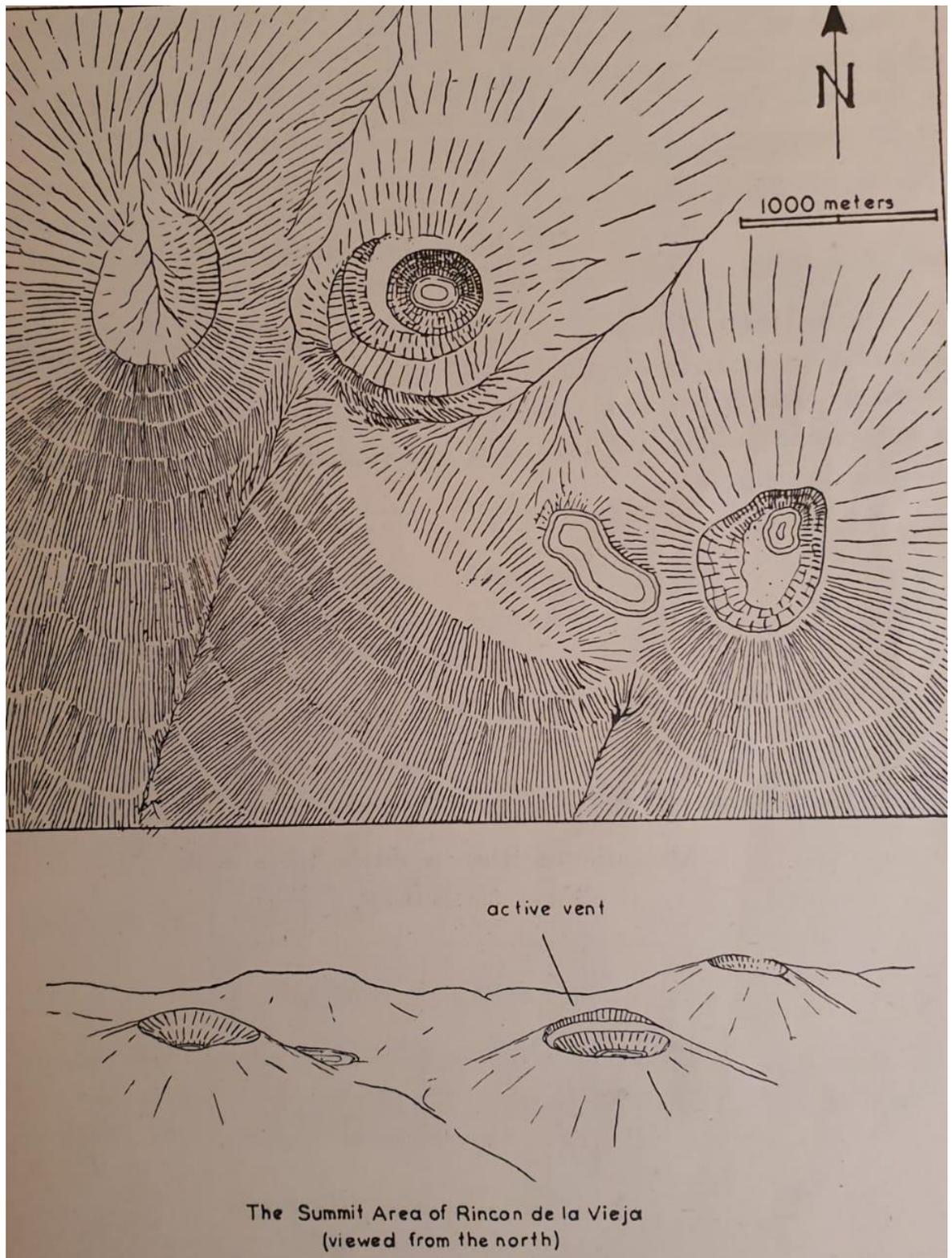


Fig. 3.26: Esquema geomorfológico histórico de los focos principales del Rincón de la Vieja (Mooser et al., 1958).

Cuadro 3.4: Aspectos morfométricos de los 12 conos y cráteres propuestos en la literatura del Rincón de la Vieja.

Número	Nombre	Altitud (m s. n. m.)	Altura (m)	Pendiente cono	Dimensión del cráter (m)	Aspectos particulares
1	1	1600	~40?	10°	325 de largo	Muy erosionado y poco conservado.
2	2	1810	60	20°	750 x 900	
3	Von Seebach-Braun	1895	285	20°-33° (>40° en escarpes)	275 x 400	Cono bien desarrollado con cráter elongado poco profundo por relleno
4	Cráter Activo	1745	260	20°-30°	400 x 600 con cráter interno de 335 x 412	Cráter complejo con lago cratérico hiperácido y caliente (275 x 300 m)
5	Rincón Viejo	1806	>250	20°-30°	500 x 575	Cráter complejo con un lago frío (90 x 110 m) y un posible domo pequeño intracratérico
6	Sensoria	1560	~10	~10°	80	Cráter parásito con un lago frío (30 x 40 m)
7	Santa María	1916	>400	20-33°	330 x 390	Lago cratérico frío (240 x 250 m)
8	Cono Triple 1	~1645	120	20°	210	Cono bien conservado
9	Cono Triple 2	~1615		20°	170	Cono con cráter abierto
10	Cono Triple 3	1672	160	25°	175	Cono con cráter
11	Cono relicto E	~1780	230	20°-30°	250	Posible cono con cráter abierto al NNE
12	Cono relicto W	1778	230	20°-30°	300	Posible cono con cráter abierto al NE

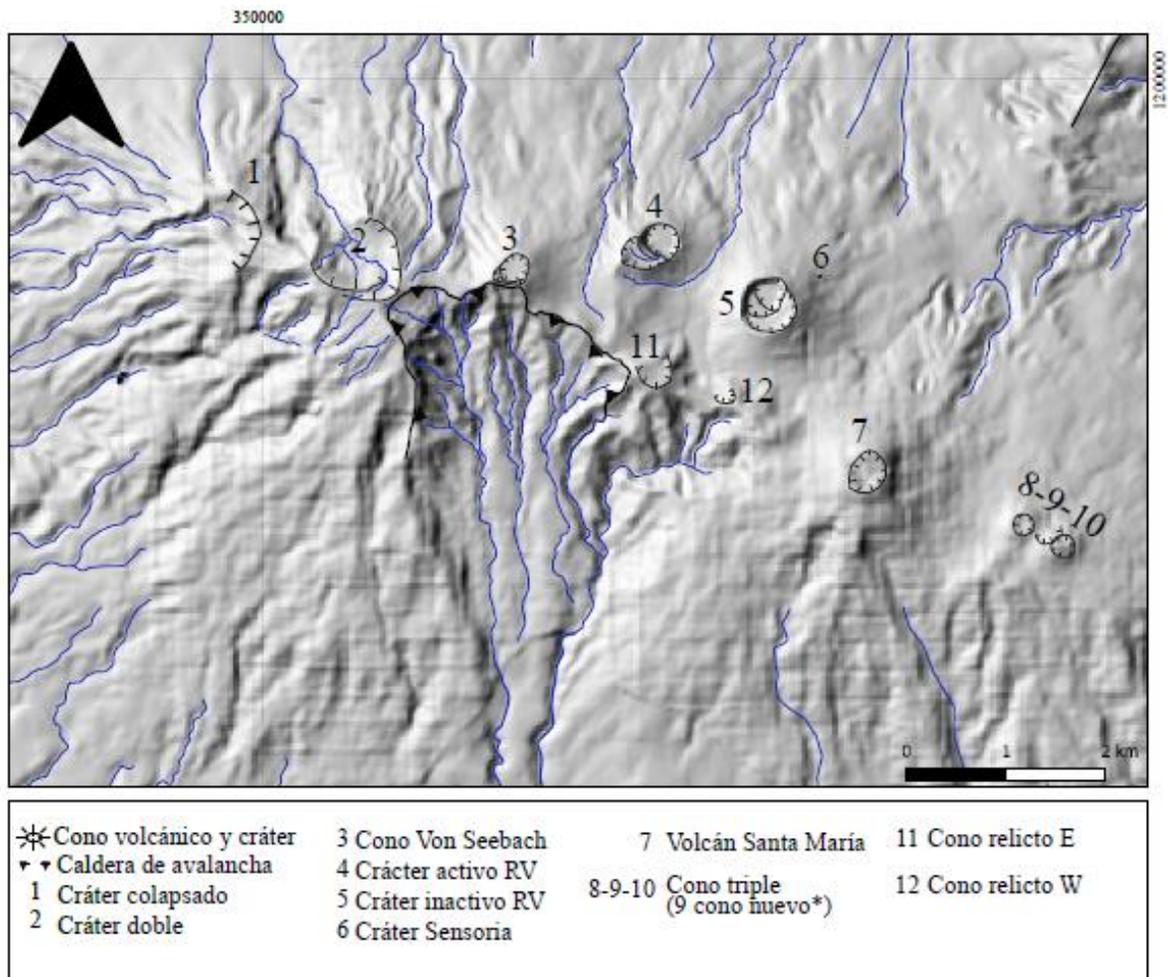


Fig. 3.27: Distribución y orientación de los alineamientos eruptivos del Rincón de la Vieja.

La primera estructura volcánica cuspidal y más occidental del volcán Rincón de la Vieja es un cono volcánico bajo con su cráter (N.º 1), ambos muy destruidos por los agentes erosivos y desportillado al occidente. No resulta sencillo su reconocimiento (Fig. 3.27).

El segundo foco (N.º 2) es un cono de poca elevación con un cráter doble muy erosionado, cuyo eje mayor es de casi 1 km e igualmente está desportillado al occidente. El río Blanco nace allí (Fig. 3.27).

El tercero (N.º 3) es el llamado Von Seebach (1895 m s. n. m.) que posee un hito llamado Braun (1861 m s. n. m.), ambos en conjunto definen un cono con un cráter asimétrico, abierto hacia el NW y con un fondo plano, posiblemente producto de la paulatina colmatación de las tefras del Rincón de la Vieja en los últimos miles de años (Fig. 3.27, 3.28 y 3.29). El río Azul y sus afluentes innominados nacen en dicho cono; una pequeña quebrada ha incisionado una pequeña brecha en el borde del cráter y drena las aguas que se acumulan allí a través de un barranco.



Fig. 3.28: Perfil irregular del volcán a la distancia visto desde su flanco norte o caribeño (Fotografía superior de Jean-Paul Dinarte e inferior de Henriette Bakkar).

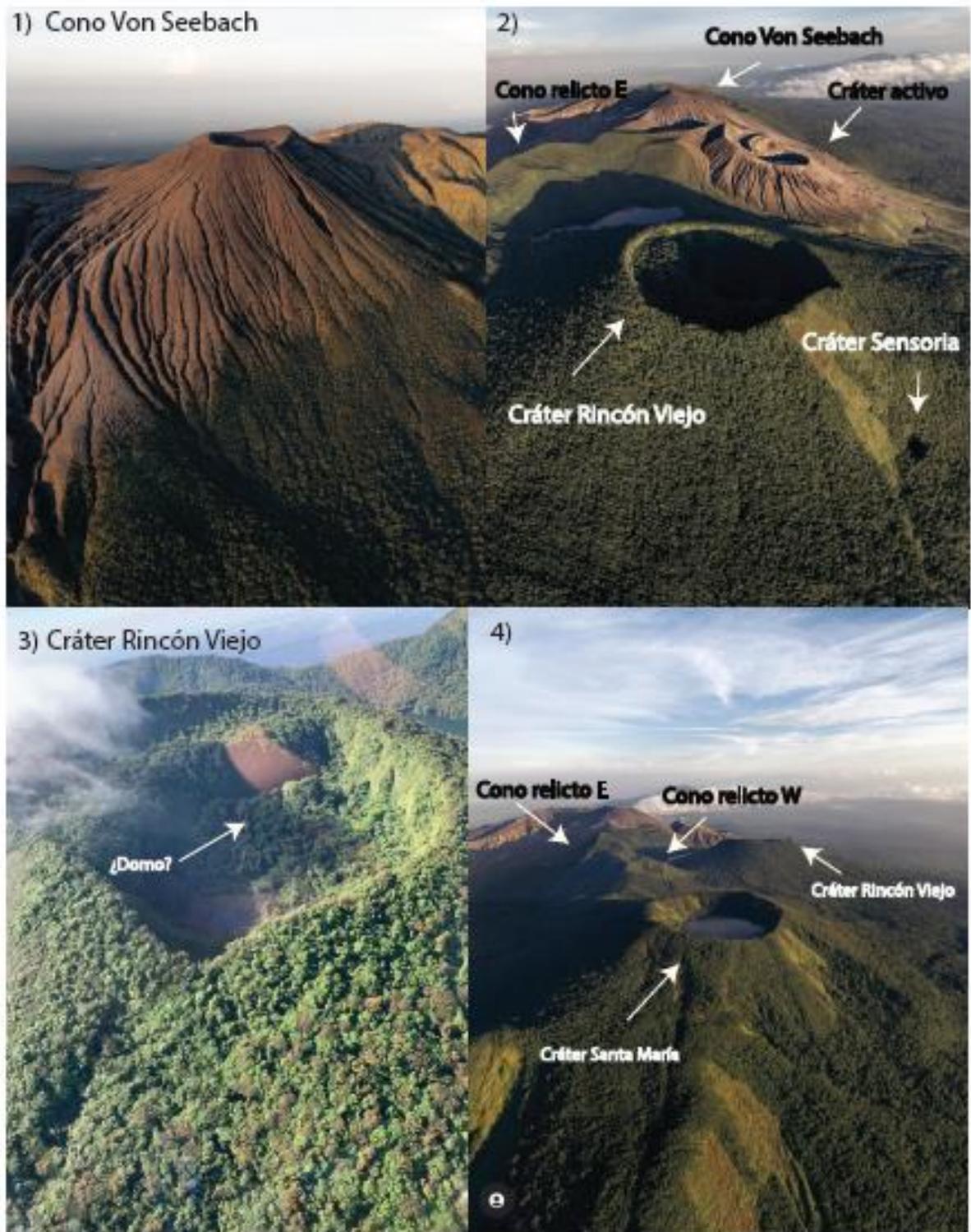


Fig. 3.29: Fotografías de bajo ángulo de algunos de los focos eruptivos del Rincón de la Vieja (fotografías anónimas).

El cuarto (N.º 4) es un cono (*ca.* 1745 m s. n. m.) con un cráter irregular, el cual presenta en su interior SW una terraza volcánica muy erosionada y en el fondo del cráter, al NE, un lago caliente que ocupa el lugar del cráter Activo del volcán Rincón de la Vieja. Este lago cratérico ha sido el foco de las erupciones históricas y posiblemente de los últimos milenios. El cráter parece ser de subsidencia, lo que posibilitó el descenso, a través de fallas, de bloques anulares que se deslizaron hacia el interior, formando terrazas (Soto et al., 2003a).

En su fondo aloja un lago termomineral (unos 300 m de diámetro) con colores, volumen y temperatura variables, pero de marcada acidez y actividad fumarólica. Posee temperaturas entre 28.5 °C y 60.0 °C y pH entre 0.1 y 1.16, según determinaciones de los vulcanólogos (Tassi et al., 2005, 2009; Aiuppa et al., 2014). El lago hiperácido del volcán Rincón de la Vieja es uno de los 3 únicos lagos volcánicos de su clase con composición química y acidez extremas (pH <1.2) existentes en América Central (los otros dos lagos crátericos similares están en los volcanes Poás, Costa Rica y Santa Ana, El Salvador). En general, en 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 muestra coloración gris lechoso o turquesa lechoso, así como temperaturas más altas (Fig. 3.30).

El cono quinto (N.º 5), denominado informalmente como Rincón Viejo, tiene una altitud de 1806 m y está morfológicamente bien construido y, a diferencia de los anteriores, se encuentra totalmente cubierto de vegetación. Su cráter posee unos 500 m de diámetro y presenta en su interior una terraza volcánica hacia el S, mientras que, al N, la parte más reciente y profunda, está ocupada parcialmente por un lago pequeño (Fig. 3.26, 3.27 y 3.28). En su interior presenta una pequeña estructura en forma de cúpula que podría corresponder con un domo. La quebrada Azufrosa nace entre el cráter Activo y el cono Rincón Viejo; se le une posteriormente al río Pénjamo.

El cono Rincón Viejo muestra en su falda NE un pequeño cráter parásito (N.º 6), denominado Sensoria, de unos 80 m de diámetro y una profundidad de unos 25 m, con un lago estacional pequeño de unos 35 m de diámetro y poco profundo (Fig. 3.27 y 3.29). El río Pénjamo nace en la parte baja de su flanco caribeño del cono Rincón Viejo.

Al SE del Rincón de la Vieja, dentro de este sistema volcánico, se encuentra el cono, de mayor altitud (N.º 7), denominado volcán Santa María (1916 m s. n. m.). Posee un cráter de unos 350 m de diámetro con varios deslizamientos regolíticos en sus paredes crátericas que llegan al lago circular en su interior (unos 245 m de diámetro). De este cono nace el río Jalapiedras (Fig. 3.27, 3.28 y 3.29).

Al oriente de este cono se ubica un cono triple con cráteres cada uno (N.º 8, 9 y 10): uno pequeño, bien desarrollado y con un cráter y un posible lago intermitente (la mayor parte del tiempo seco) de unos 30 m de diámetro, mientras que el otro cono se presenta algo erosionado, con restos de un cráter; y finalmente, el más oriental con un cráter y con bien desarrollados. Estos últimos conos están alineados en dirección NW-SE y entre ellos nace el río Aguas Verdes (Fig. 3.27).



Fig. 3.30: El lago cratérico hiperácido del Rincón de la Vieja con sus cambios de color. A la izquierda el 3 de noviembre del 2013 y a la derecha el 1 de noviembre del 2014 (fotografías anónimas, archivos ICE).

Al S del quinto cono, se localizan dos cerros, redondeados en su lado N y agudamente truncados en el SW, restos antiguos de un edificio volcánico precedente, hoy muy destruidos por la erosión (Healy, 1969), que presentan posibles restos de cráteres, representando los relictos eruptivos N.º 11 y 12 (Alvarado, 1989; Abarca et al., 2021). Justo al pie de ellos, en la cima del macizo volcánico, se encuentra el lago Jilgueros (1560 m s.n.m.), de represamiento, que se formó al crear presa las aguas meteóricas como consecuencia de la formación de los edificios volcánicos localizados al NW y NE del lago (conos cuarto y quinto), así como del relieve preexistente, representado por los dos relictos volcánicos mencionados previamente (Fig. 3.27 y 3.31).

En general, todos estos focos eruptivos principales del Rincón de la Vieja son conos compuestos, bajos, con casuales coladas de lava, edificados sobre un macizo eruptivo de mayor dimensión y edad (Chiesa et al., 1994; Martens, 2004). Los conos suelen tener un patrón radial, pero a nivel de detalle, las quebradas intermitentes que los drenan poseen un patrón dendrítico cuando hay una cobertura espesa de piroclastos. Además de los cráteres que se desarrollaron en la arista cuspidal y no se conocen conos parásitos en los flancos.

Siempre ha intrigado a los investigadores la orientación casi paralela de los focos eruptivos a la zona de subducción o a la cordillera de Guanacaste, contraria al resto de los volcanes costarricenses. Al observar con detenimiento el grado de disectación (erosión) y preservación de los 12 focos eruptivos, se pueden concluir algunos aspectos previamente no descritos en la literatura:

a) Los cráteres más antiguos ubicados al occidente se orientan junto con el cráter activo en sentido E-W a lo largo de una línea de 7 km, disminuyendo su edad relativa (basada en el grado de conservación) hacia el oriente.

b) Los focos eruptivos antiguos al S del lago Jilgueros junto con los conos gemelos se alinean en sentido N24°W disminuyendo también su edad relativa hacia el oriente.

c) Los dos alineamientos eruptivos convergen en el cerro Seebach.

d) El cono Rincón Viejo y el cráter Sensoria se salen de dicho patrón, estando ubicado en el medio. Llama la atención la orientación casi N-S del lago Jilguero.

Entonces se podría pensar en dos fisuras asociadas con fallas de rumbo dextrales (patrón predominante con esos rumbos), donde la cizalla entre ellas favoreció la formación de fracturas extensionales N-S, responsables de la orientación del lago Jilguero (que no solo sería un lago de represamiento volcánico, sino que tendría también un control estructural) y la formación del cono Rincón Viejo junto con el cráter Sensoria.



Fig. 3.31: Lago Jilgueros (1560 m s. n. m.), cerca de la cima del Rincón de la Vieja, un lago de represamiento de las aguas meteóricas como consecuencia de la formación de los edificios volcánicos circundantes (fotografías cortesía H. Bakkar).

3.2.2 Geformas denudacionales

Unidad de laderas volcánicas escarpadas

Se caracteriza por laderas de fuerte pendiente, superiores de los 30°, hasta alcanzar en varios sectores acantilados volcánicos verticales, principalmente en el extremo occidental del volcán, en sus partes cuspidales. Las divisorias suelen ser angostas, a veces a forma de lomos de burro (Fig. 3.32). Los patrones de drenaje son predominantemente del tipo radial poco desarrollado a paralelo, localmente subparalelo, con valles en su mayor parte consecuentes a la pendiente del macizo. En la mayoría de estos ríos y quebradas hay cascadas. Su presencia suele obedecer a contactos litológicos, unas pocas a fallas. Las rocas son principalmente volcánicas (coladas de lava, rocas piroclásticas).



Fig. 3.32: Flanco occidental del Rincón de la Vieja que muestra profundos barrancos.

Unidad de relieve suave (campos de cenizas recientes)

La morfogénesis de esta unidad se debe a la acumulación de capas de cenizas a lo largo de varios miles de años y su transformación en suelos, donde el sistema de erosión de las aguas superficiales ha labrado parte de su forma con patrones de drenajes radiales a dendríticos con divisorias planas a plano-onduladas y cárcavas en donde la erosión ha incisionado y la vegetación suele estar más protegida. Se presenta principalmente en el flanco SW del volcán a favor de los vientos predominantes (con sentido hacia el SW y el WSW). La acidez de los suelos debido a corresponder con cenizas recientes y por la lluvia ácida, desfavorecen el crecimiento de la vegetación, además de la formación de una coraza de pavimento volcánico. En los sectores menos afectados por la actividad volcánica, la vegetación presenta un mayor desarrollo (Fig. 3.33).



Fig. 3.33: Campo de cenizas desprovistos de vegetación arbustiva debido a la acidez del suelo producto de las cenizas y lluvia ácida con una erosión dendrítica y la formación de una coraza endurecida en las cenizas (pavimento volcánico). En la fotografía de la derecha se observa en el primer plano y al fondo, las coladas de lava blanqueadas por los efectos de la acidez del medio.

3.2.3 Geoformas volcano-sedimentarias

Anfiteatros por colapso y abanicos de avalanchas asociados

En el presente trabajo se va a denominar caldera de avalancha (Leyrit, 2000), también llamada depresión de avalancha (Szakács y Seghedi, 2000), al anfiteatro de un colapso sectorial en un volcán con bordes escarpados y limitado por fallas de deslizamiento laterales, que originó un depósito de avalancha de escombros volcánica. El término avalancha de escombros volcánica o simplemente avalancha volcánica, como una traducción del término en inglés, *volcanic debris avalanche*, es de amplio uso y aceptación dentro de la comunidad científica vulcanológica hispanoparlante (García-Cacho, 2010; Murcia et al., 2013).

En la ladera austral del Rincón de la Vieja, en el sector comprendido entre el flanco austral del cerro Braun y el Rincón de la Vieja antiguo, se observa un sector de desgarre (ca. 1700 m s. n. m.), al parecer la fuente de origen de una avalancha volcánica de escombros (Fig. 3.34). Posee forma de herradura con unos 3.5 km de diámetro (Healy, 1969; Paniagua et al., 1996; Alvarado y Denyer, 2019). Los depósitos de avalancha de escombros volcánicos (*volcanic debris avalanche*) cubren una extensión aproximada de 18 km² (Fig. 3.33). Una de las más notables evidencias de esta avalancha es la topografía de lomitas (*hummocky*) que, aunque pobremente desarrollada, está representada por relieves positivos de hasta 20 m de altura vistos cerca del cañón del río Colorado y en los límites del parque, en el sitio Azufrales (Barahona et al., 2001).

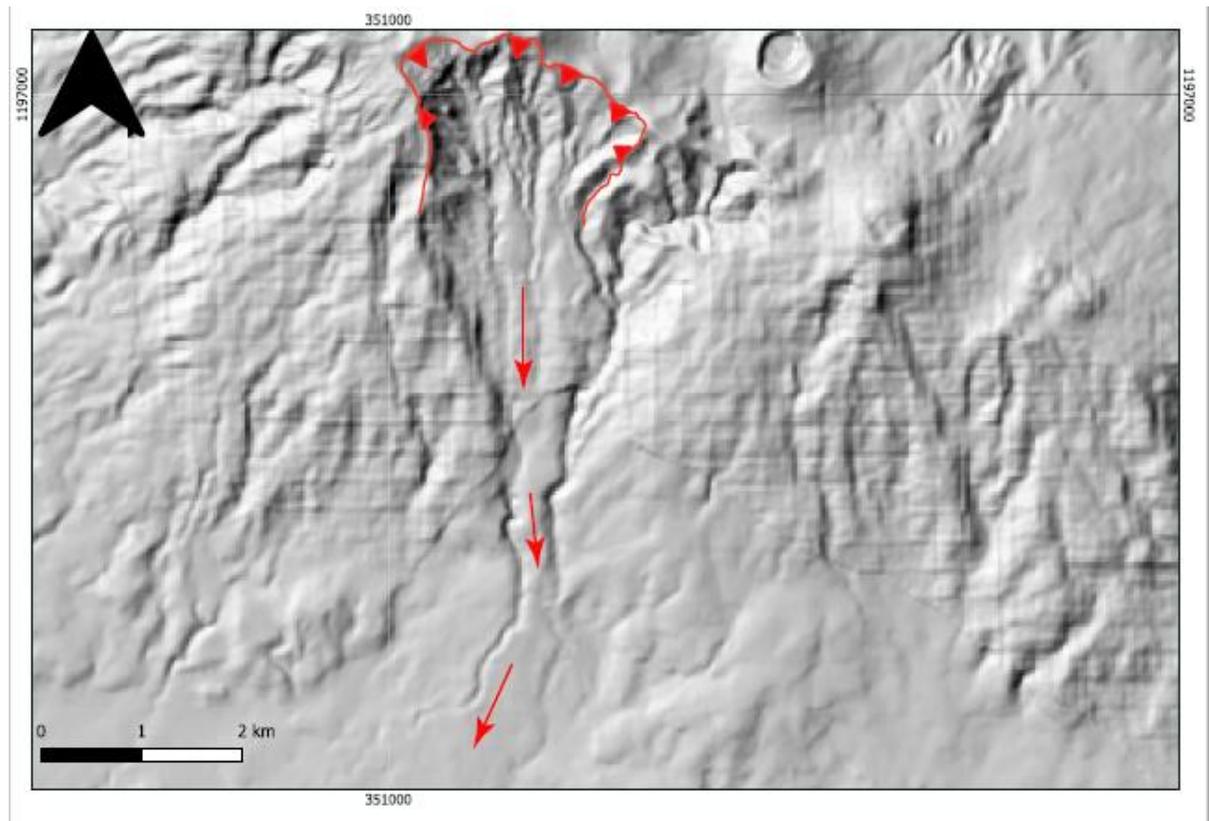


Fig. 3.34: Cicatriz de la avalancha de escombros volcánicos y su depósito con forma de abanico.

Abanicos volcano-sedimentarios

En el piedemonte caribeño se logran reconocer varios abanicos complejos compuestos de sedimentos volcánicos (depósitos de lahares y sedimentos aluviales), así como por depósitos de flujos piroclásticos y avalanchas de escombros volcánicos, tanto antiguos como recientes. Desarrollan una superficie planar, ligeramente ondulada, con algunos bloques de lava aislados.

Unos de ellos bien desarrollados se ubican a 1.5 km y 2.1 km al S del borde del cráter Activo, donde se presentan como un sector con un patrón de drenaje trenzado (entrelazado o anastomosado), que se extiende por 0.4 km y 1 km en las quebradas Azufrada (nombre local, no aparece en el mapa del IGN) y Azufroza (quebrada que sí posee nombre en el mapa), respectivamente. Este patrón está formado por varios canales que se entrelazan, a veces sin poderse distinguir cual es el cauce principal. Su origen se explica debido a que son quebradas que transportan mucha carga de sedimentos gruesos en determinado momento con un caudal importante (durante las erupciones) en sectores de pendiente elevada. Los sedimentos son aportados por las corrientes de densidad piroclástica (flujos y oleadas piroclásticas).

Después de este patrón entrelazado, las quebradas mantienen un patrón de río tortuoso. A través de ambas quebradas es por donde bajan la mayor cantidad de lahares, los cuales se unen al Pénjamo a unos 4 km aguas abajo en el caso de la Azufrosa y 6.5 km en el caso de la Azufrada, ambas medidas en línea recta. La Zanjonuda (nombre local) se une al Pénjamo a 4.9 km desde el cráter (Fig. 3.35).

Otros abanicos menos evidentes en el campo se presentan en los alrededores de Gavilán, por los ríos Azul, Zanjonuda y Pénjamo. Tan solo mediante el mapeo y trabajo de campo en el flanco Caribe, se logra reconocer cuáles de estos sectores llanos corresponden con lahares y cuales con los depósitos piroclásticos asociados a la erupción del 460 A. D.

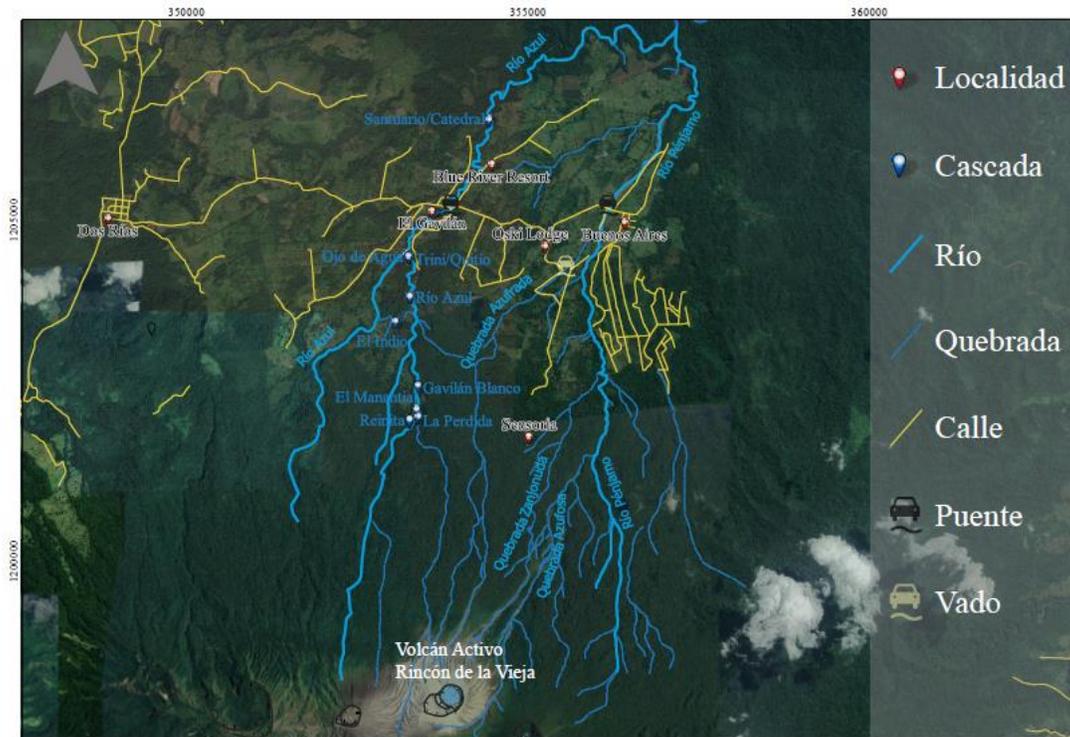


Fig. 3.35: Ríos y quebradas que descienden del volcán en su sector Caribe. Poseen en ciertos sectores un patrón de drenaje entrelazado, indicador del transporte de muchos sedimentos gruesos. El río Pénjamo nace en la parte inactiva del volcán, pero se le une la quebrada Azufrosa, Zanjonuda y Azufrada, que aportan los lahares que descienden del volcán.

3.2.2 Geformas neotectónicas

Múltiples alineamientos estructurales han sido propuestos por diversos autores, algunos coincidentes entre ellos, otros totalmente no coincidentes, por lo general con control de campo limitado, dado los escasos afloramientos y su continuidad, u utilizando criterios variados, desde geofísicos (incluyendo sismológicos), morfoneotectónicos y evidencias de geología estructural en el campo. A continuación, solo se mencionarán aquellos alineamientos relevantes que muestran un fuerte control morfotectónico, por lo que muy probablemente en correspondencia con fallas importantes. Para un recuento morfotectónico de los principales trabajos se puede consultar la tesis de Bakkar (2017), los mapas de Alvarado et al. (2019a, b) y la síntesis en el capítulo que sigue de Tectónica.

De las múltiples fallas propuestas por un sinnúmero de trabajos, hay cinco que sobresalen por su tamaño y expresión geomorfológica (Fig. 3.36 y 3.37).

Una de ellas se ubica entre el sitio Hornillas y el sitio Coyol Huape (falla Pailas), justo donde hay gran cantidad de manifestaciones geotermales de elevada temperatura (fumarolas, hornillas, fuentes y pozas termales, volcanes de barro) en correspondencia con una falla dextral justo en el piedemonte pacífico del Rincón de la Vieja. Esta falla ha sido propuesta por muchos autores y posee un rumbo WNW-ESE. Los ríos poseen un fuerte control estructural (Alvarado et al., 2019b). Otra falla se ubica cerca de la cima del volcán, pero siempre en su sector pacífico, igualmente con rumbo WNW-ESE, llamada falla Copelades (Alvarado et al., 2019b). En el flanco oriental del volcán se ha propuesto una extensión de la falla Bagaces Este, con rumbo NNE y desplazamiento dextral, pero en dicho sector solo ha sido visualizada por el estudio neotectónico realizado por W. Montero e incluido en el mapa 1:50 000 (Alvarado et al., 2019b).

Otra falla muy notoria atraviesa el cerro Gallo con rumbo NE-SW y un desplazamiento sinistral (Alvarado et al., 2019a). De modo conjugado se presenta una falla NW-SE en el flanco caribeño-occidental de tipo dextral, donde las quebradas Honda y Azules poseen un control estructural a modo de valles de falla (Alvarado et al., 2019a). Otras fallas menores se presentan en diversos sectores (Fig. 3.38).

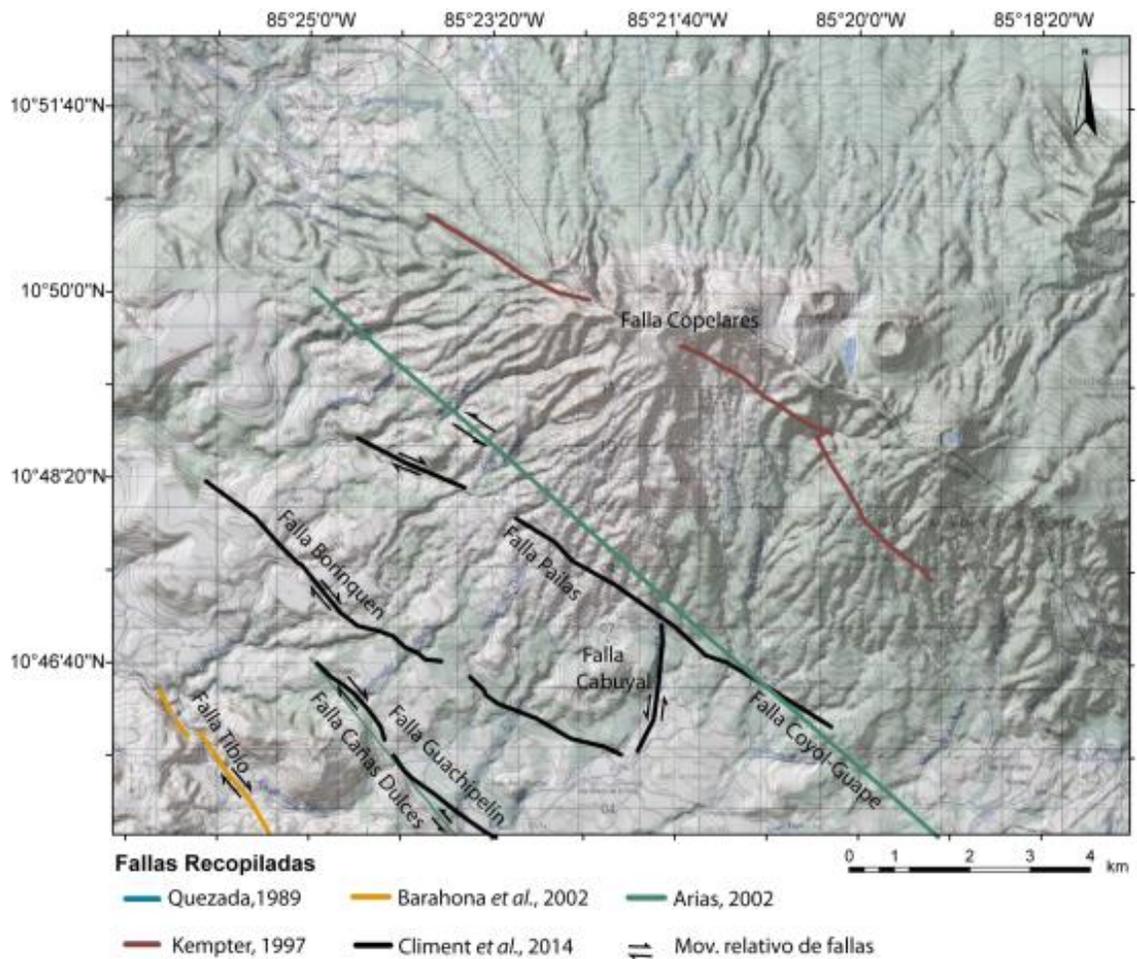


Fig. 3.36: Recopilación de la literatura de las fallas principales reconocidas hasta el 2017 en el volcán Rincón de la Vieja. Base cartográfica del IGN 1: 50 000 de las hojas Cacao y Curubandé (Bakkar, 2017).

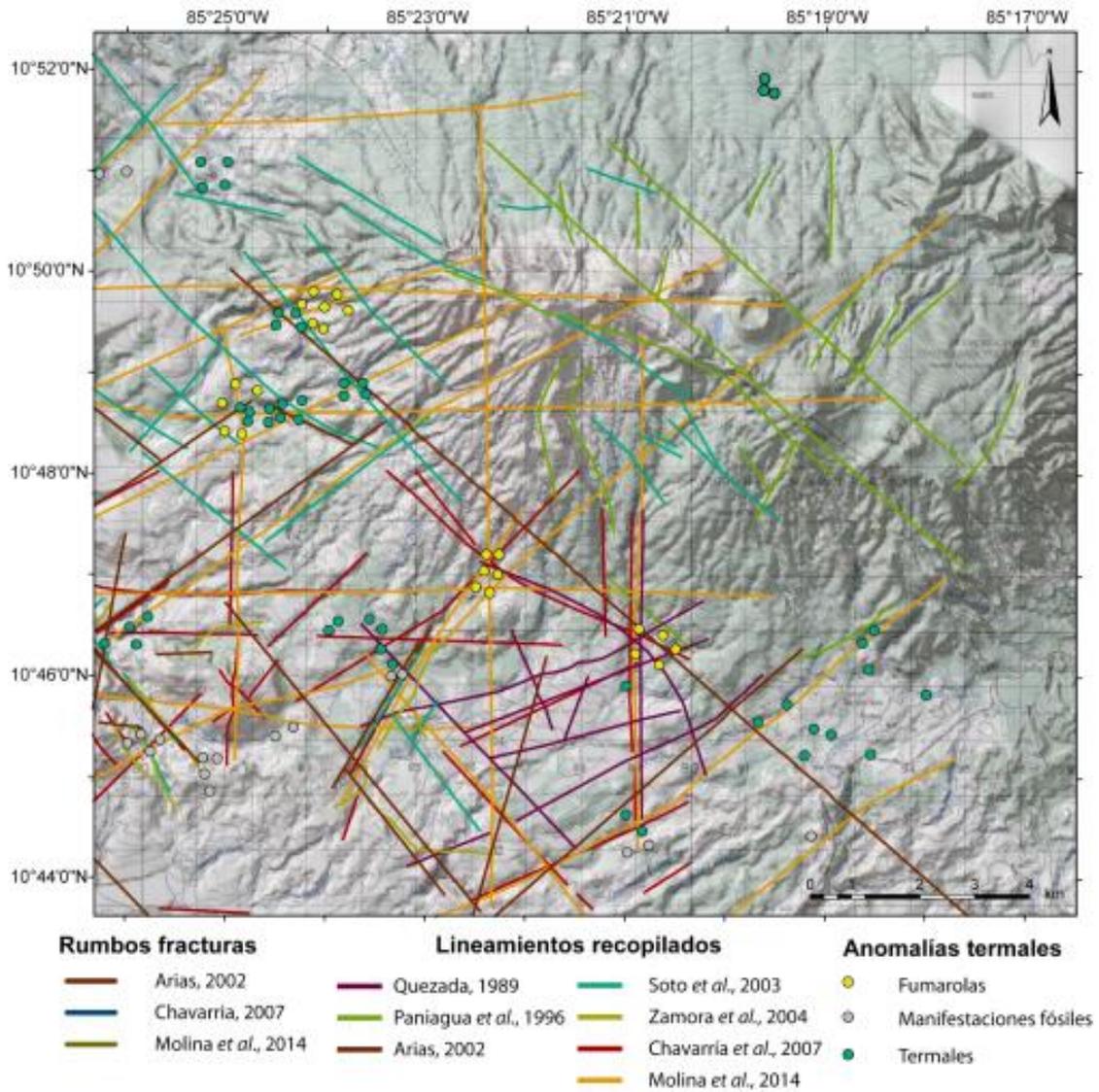


Fig. 3.37: Recopilación de lineamientos, anomalías termales y rumbo de fracturas medidas en el macizo Rincón de la Vieja. Base cartográfica del IGN 1: 50 000 de las hojas Cacao y Curubandé (Bakkar, 2017).

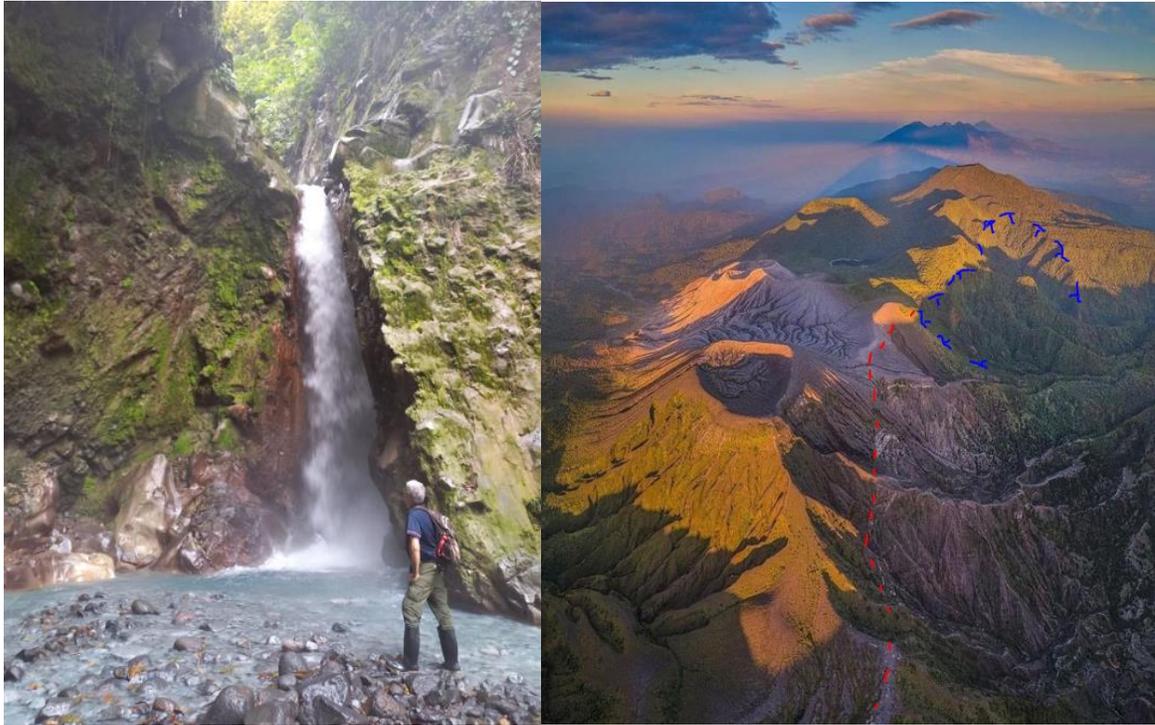


Fig. 3.38: Ejemplos de fallas en el volcán Rincón de la Vieja con expresión morfológica. A la izquierda, en la cascada Buenos Aires (10.863317, -85.317595), salto de agua posiblemente controlado por una falla muy cerca de la confluencia de la quebrada Azufrosa (que nace en el cráter Activo) con el río Pénjamo (que nace en el Rincón de la Vieja Viejo). A la derecha (fotografía anónima), la falla Copelares, en el flanco Pacífico del volcán, muy cerca de la cima. Dicha falla ha sido reconocida por varios investigadores y en la imagen se observa muy bien el contraste litológico y geomorfológico a ambos lados. Obsérvese como la falla pasa muy cerca de las cicatrices del megadeslizamiento que produjo la avalancha de escombros volcánico.

3.3 TECTÓNICA

Como es bien conocido, los volcanes de Costa Rica son el producto de la subducción de la placa del Coco bajo la placa del Caribe (Fig. 3.39). De forma muy breve, desde el punto de vista geotectónico, la profundidad de la placa del Coco subducida bajo la Caribe, a la altura del Rincón de la Vieja, parece estar a unos 130 km bajo el volcán (Lücke y Arroyo, 2015). El Moho (límite del manto superior con la corteza inferior) se ha delimitado sísmicamente unos 40 (Sallarès et al., 2001) o 42 km en la región bajo la cordillera de Guanacaste (Linkimer et al., 2010), mientras que con gravimetría se ubica a unos 38 km (Lücke, 2012).

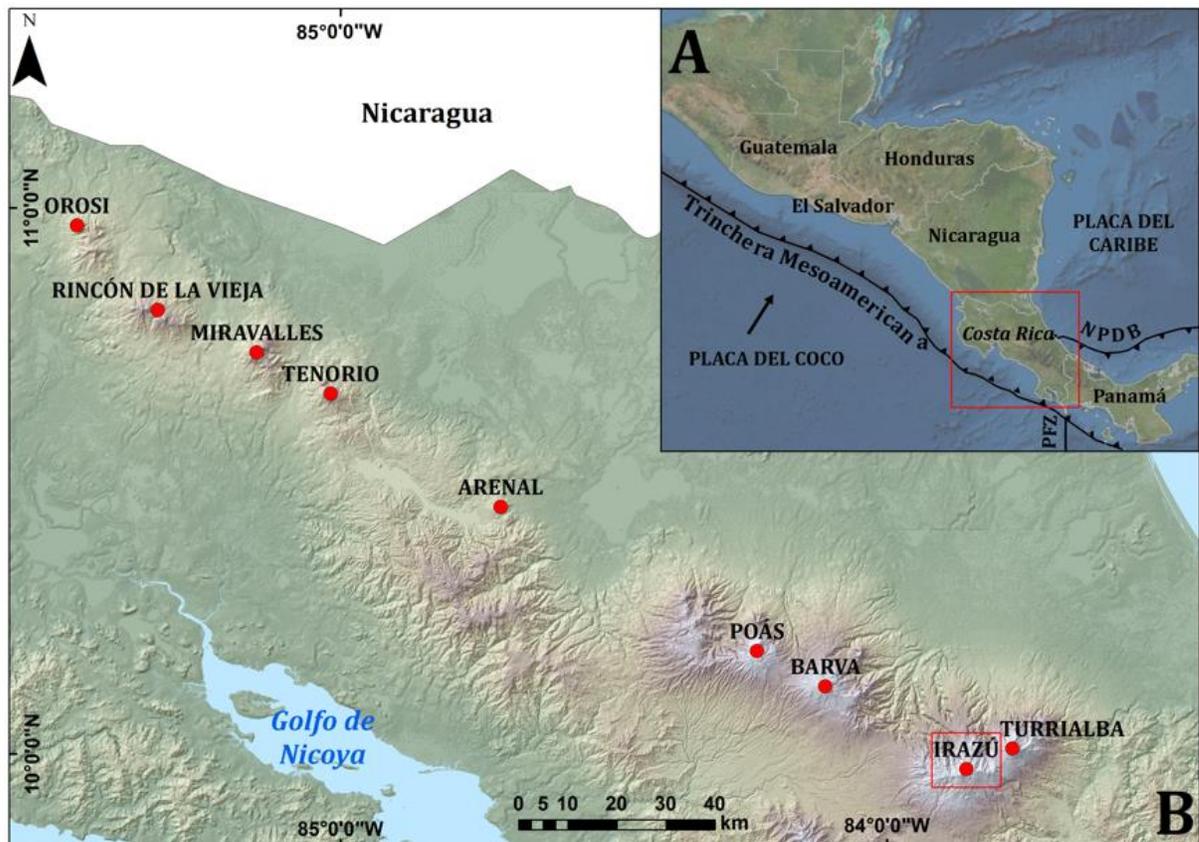


Fig. 3.39: Marco geotectónico del área de estudio.

Un aspecto muy interesante es que se logró la identificación del isótopo ^{129}I en el lago cratérico del Rincón de la Vieja, que indica la presencia de sedimentos marinos que fueron subducidos desde la placa del Coco en el Pacífico y fueron reciclados al ser detectada su firma isotópica en el foco cratérico (Fehn et al., 2002).

Desde el punto de vista tectónico a nivel más regional está establecido que el eje compresivo máximo de esfuerzos horizontales posee un rumbo general ENE-WSW hasta NE-SW (Montero, 1994; López, 1999). Sin embargo, también resulta conocido que el patrón

de esfuerzo cambia en un volcán y su campo geotérmico, dado que ello altera las condiciones reológicas del medio (resistencia, ductibilidad, presencia de agua y vapores). Así, Solís (2016) sugiere que la dirección N22°W puede corresponder con el tensor máximo de esfuerzo horizontal para el área.

Denyer et al. (2019) comentan que la cobertura volcánica del Cuaternario el fallamiento N-S suele ser dextral mientras que el ENE-WSW de tipo sinistral y el WNW-ESE de carácter dextral. Bakkar (2017) realizó un estudio detallado de los procesos sísmicos y volcánicos en el Rincón de la Vieja, a través del análisis simotectónico de la actividad ocurrida entre 2011 y mayo de 2016. Esta autora propuso un total de 11 fallas corticales en el flanco meridional del macizo y una clasificación de las señales sismo-volcánicas asociadas con la actividad de este.

Las fallas anteriormente reconocidas como Pailas, Borinquen y Tibio mencionadas por autores como Quesada (1989), Arias (2002) y Climent et al. (2014), efectivamente fueron confirmadas en este trabajo por medio de evidencias geoquímicas (anomalías termales), por criterios morfotectónicos, por sismicidad asociada y por la comprobación en el campo de planos de falla. Se está de acuerdo con que son fallas con un movimiento dextral asignado, referido por los autores Quesada (1989) y Climent et al. (2014), y en desacuerdo con Arias (2002), quien le asigna un movimiento sinistral, mediante la comprobación a partir de planos de falla medidos en la quebrada Tibio, un mecanismo focal de tipo dextral asociado a la falla Pailas y por desplazamientos aparentemente dextral determinados por geomorfología a las estructuras tectónicas N45°W.

Se verificó el trazado de la falla Cabuyal que indicaron los autores Climent et al. (2014), sin embargo, Bakkar (2017) propone que la estructura se extiende hacia el norte por las evidencias de los planos de falla encontrados en la quebrada Agria. Esta falla es propuesta por los autores como sinistral, pero a partir de un mecanismo focal determinado en el 2013, aunado a las indicaciones cinemáticas de un plano de falla asociado a esta, indican que es de movimiento dextral. Con respecto a la falla Copelares reconocida por Kempter (1997), se extiende la longitud del trazado usando como base los indicadores morfotectónicos.

Existe un conjunto de alineamientos sugeridos como fallas por distintas evidencias, pero a falta de una comprobación del plano de falla, no se clasifica como tal. Algunos alineamientos sugeridos como fallas con rumbo N45°W presentaron enjambres sísmicos en los años 2008 y 2009, cuya orientación concuerda con la traza de la estructura, como por ejemplo la 28 y 38 (Fig. 3.40). Por la morfología y por la presencia de distintas familias tectónicas en el flanco meridional del volcán Rincón de la Vieja, se reconocen dos bloques estructurales principales afectados por el clima (erosión más intensa en el bloque A), la edad y los distintos procesos volcánicos a lo largo de la historia. El límite al sur del cráter activo está definido por fallas de rumbo N-S y de movimiento dextral. Se propone este límite como la continuación del borde de la caldera de Cañas Dulces, la cual a su vez separa los dos bloques definidos (Bakkar, 2017).

Bakkar (2017) propone además once nuevas fallas, para lo cual se usó la mención de alineamiento que hacen distintos autores, por evidencias geoquímicas, por rasgos geomorfológicos, por enjambres sísmicos asociados, pero principalmente por la corroboración en el campo de planos de falla. Cinco de ellas se asocian a los sistemas N-S y NNE con movimiento dextral (confirmado por indicadores cinemáticos y mecanismos focales; ID: 4, 8, 12, 17 y 36 de la Fig. 3.40 y 3.41). Algunas de estas estructuras tienen evidencia de ser fallas activas, como, por ejemplo, la falla de Río Blanco y la falla Cabuyal. El sistema de fallas N45°E, con rumbo sinistral, son las estructuras más antiguas con respecto a los otros sistemas de fallas. Se proponen cuatro estructuras (ID: 16, 18, 30 y 32 de la Fig. 3.40 y 3.41), que usando el análisis morfotectónico, sugiere un desplazamiento aparente de estas en la intersección con otras fallas. Para un estudio de amenaza volcánica, las unidades y estructuras más relevantes son aquellas del Holoceno (últimos 11 700 años) o a lo sumo del Pleistoceno Superior Tardío, es decir, aquellas que representan un mayor potencial de peligrosidad por su probabilidad de repetirse, por ello, en el presente estudio se les da particular énfasis a dichas unidades estratigráficas y tectónicas.

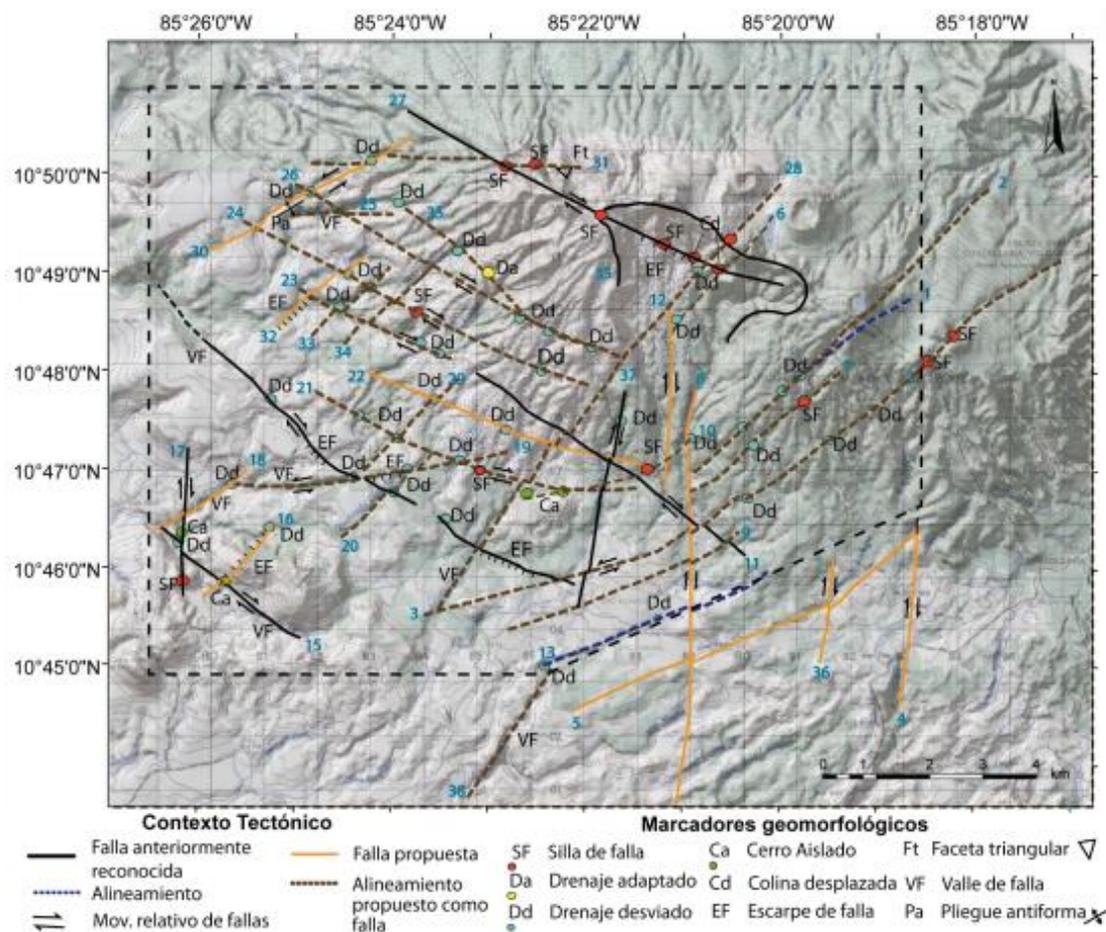
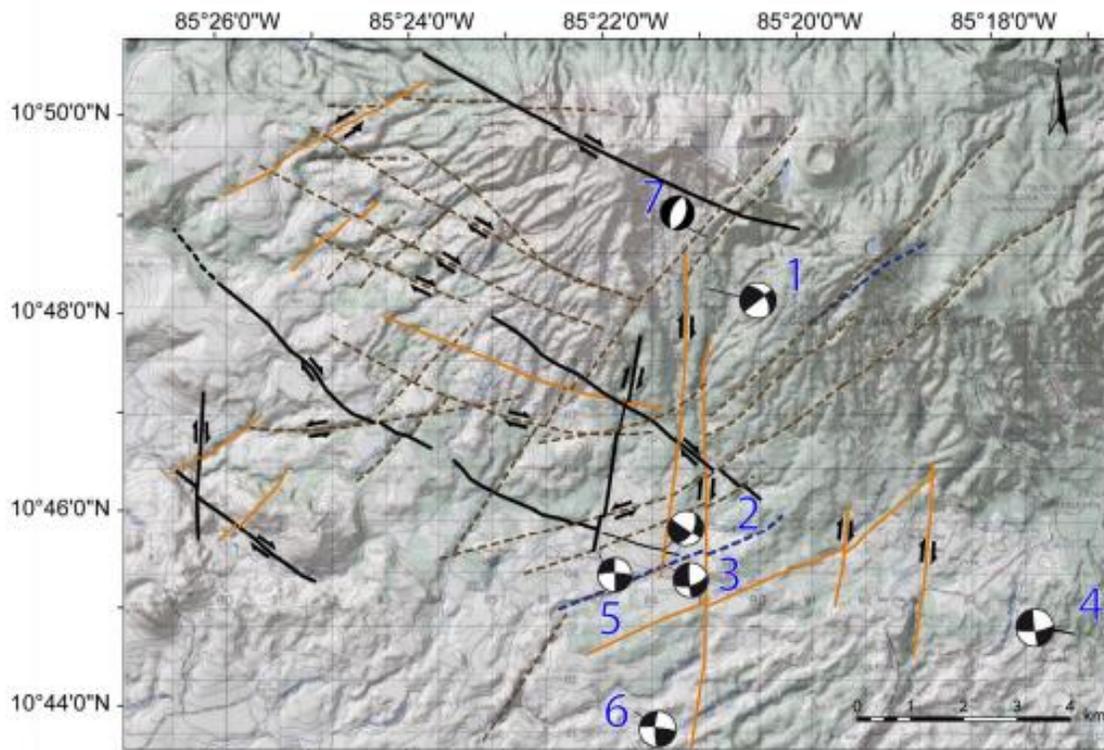


Fig. 3.40: Marcadores geomorfológicos reconocidos. Base cartográfica del IGN 1: 50 000 de las hojas Cacao y Curubandé (Bakkar, 2017).



Contexto Tectónico

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Falla anteriormente reconocida | Falla propuesta |
| Alineamiento | Alineamiento propuesto como falla |
| Mov. relativo de fallas | Mecanismo focal |

Familia 1 (E-O)

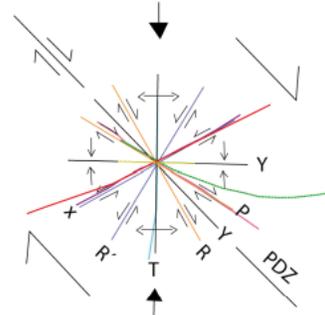
Eje de compresión
No sismicidad confirmada
No anomalías térmicas
Alineación de cráteres más antiguos
Sin definir el movimiento

Familia 2 (N45°E)

Cizalla antitética (X)
Presenta sismicidad
Anomalia térmica
Sinestrales

Familia 3 (N45-70°O)

Cizalle sintética (P)
Presenta sismicidad
Anomalia térmica
Dextrales



Familia 4 (N45-70°E)

Cizalla sintética (P)
Presenta sismicidad
Anomalia térmica
Dextrales

Familia 5 (N75°E)

Cizalle sintética (X)
Presenta sismicidad
Anomalia térmica
Sinestrales

Familia 6 (N-N10°E)

Estructuras de tensión (T) entre las fallas dextrales.
Presenta sismicidad
Dextrales
Anomalia térmica
Posibles fracturas peri e intracalderales de la caldera de Cañas Dulces.

Fig. 3.41: Mecanismos focales en el área de estudio con el marco tectónico y diagrama de las familias de los sistemas de falla en la región de estudio propuesto por Bakkar (2017).

3.3.1 Estructuras volcanotectónicas

Una gran depresión volcánica, con un diámetro superior a 1.5 km, se le suele denominar caldera. En el Rincón de la Vieja, se han reconocido varias de ellas, aunque sus límites han variado de autor en autor. Desde 1969, distintos trabajos se han enfocado en el reconocimiento de estructuras tectónicas y volcánicas en el volcán Rincón de la Vieja. En el área de estudio se han reconocido varias estructuras caldéricas que representan las fuentes de las principales unidades volcánicas y deposicionales a gran escala como lo son los voluminosos depósitos de flujos piroclásticos (corrientes de densidad piroclástica concentrada o CDPc), que se dieron allí entre 1.4 y 2 Ma (millones de años) atrás. Como dato histórico, Karl von Seebach, sin saber su origen, dibujó con gran precisión para la época (Seebach, 1865), los rasgos topográficos que definen a lo que hoy día conocemos como las calderas Alcántaro y Guayabo.

Kempter (1997) y Zamora et al. (2004) proponen dos estructuras caldéricas, las cuales se llaman Cañas Dulces y Guachipelín. Sin embargo, Carr et al. (1985), Molina (2000) y Molina et al. (2014) difieren de lo anterior y reconocen las calderas de Cañas Dulces y San Vicente. Barahona et al. (2001) y Zamora et al. (2004) llaman a ambas, tanto el borde de la caldera Cañas Dulces (*sensu* Kempter) como el de la caldera Guachipelín, como caldera Alcántaro (en alusión al antiguo volcán Alcántaro) y adicionalmente reconocen otros posibles bordes de calderas internos menores, innominados por ellos, a pesar de que al menos uno de ellos corresponde, *grosso modo*, con la caldera San Vicente (*sensu* Molina, 2000 y Molina et al., 2014). En definitiva, los bordes de las calderas han variado de autor en autor.

Alvarado y Gans (2012) hablan en términos generales y salomónicos de un borde de caldérico multicolapso, con un contorno festoneado, llamado caldera Alcántaro-Guachipelín-Cañas Dulces, que, en buena parte, dio origen a las tobas o los depósitos de CDP de Río Liberia, Salitral y Buena Vista (*sensu* Vogel et al., 2004; Deering et al., 2007), así como la posterior formación de los domos intra y pericaldéricos, los llamados domos de Cañas Dulces.

Dado que la reconocida caldera Guayabo adquiere su nombre del antiguo volcán Guayabo (por el cerro homónimo), al seguir la misma lógica, se prefiere nombrar Alcántaro a la caldera más grande y debidamente comprobada, en alusión al antiguo volcán Alcántaro. Molina et al. (2014) reafirman, con criterios de perforaciones profundas, que en efecto la llamada caldera Cañas Dulces, también conocida como Alcántaro, fue la fuente de la Toba Río Liberia, pero no de la Toba Río Colorado. La existencia de la caldera San Vicente (5 km de diámetro), parece estar soportada por evidencias geomorfológicas y perforaciones profundas (Fig. 3.42).

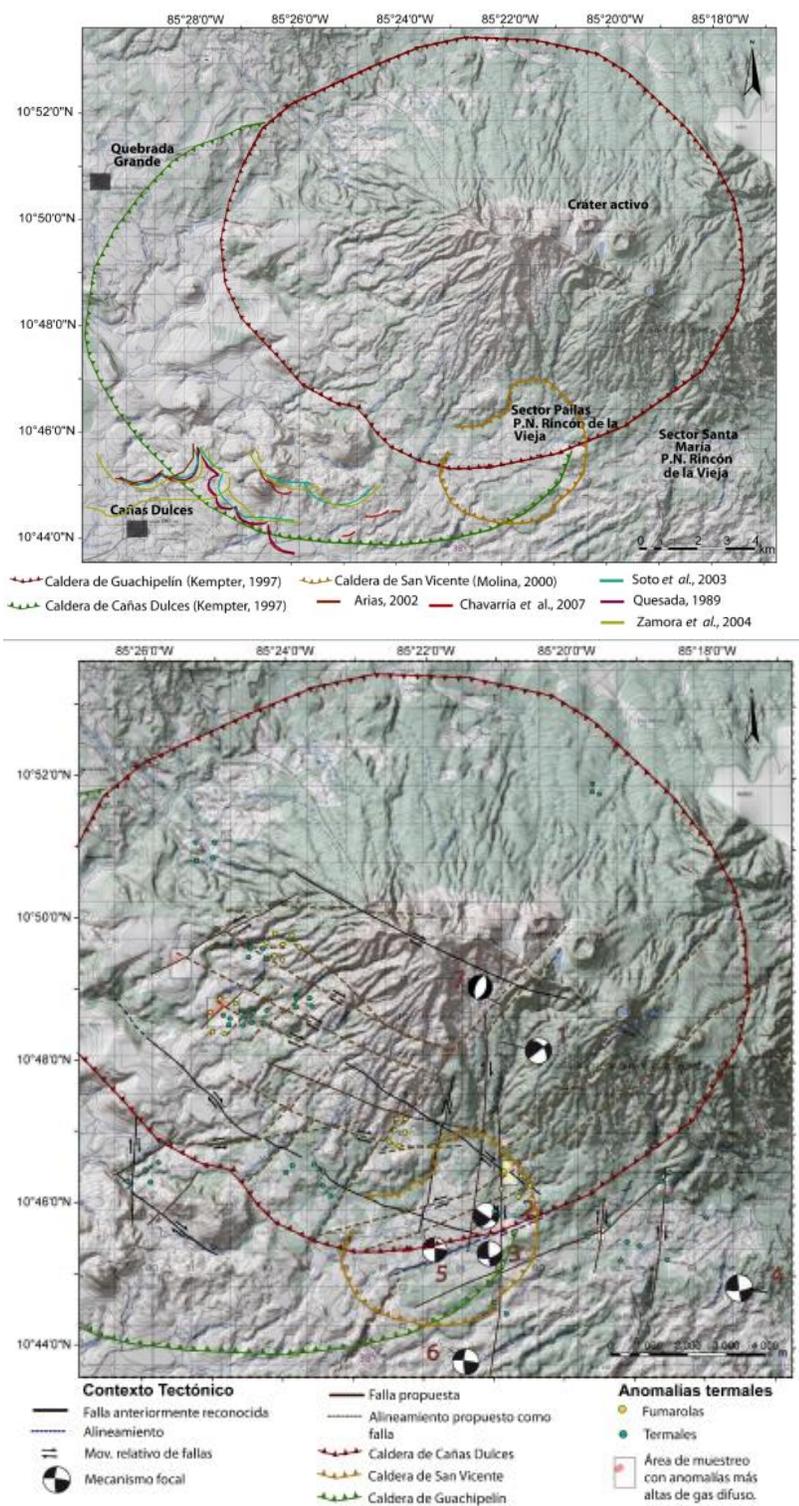


Fig. 3.42: Arriba, recopilación de estructuras caldéricas reconocidas en el volcán Rincón de la Vieja, mientras que abajo, mapa integrado de la tectónica del flanco meridional, las anomalías termales y de gas difuso en las áreas de interés (Bakkar, 2017).

4. ACTIVIDAD ERUPTIVA HISTÓRICA

La actividad volcánica histórica del Rincón de la Vieja se va a dividir cronológicamente en varias fases, que se sintetizan a continuación, con base en los documentos históricos y en las observaciones de campo. Tal y se ha planteado en diversos trabajos, previo al siglo XVIII no existe ninguna referencia escrita de una erupción volcánica ni ascenso ni descripción geográfica; tan solo existen menciones breves sobre los volcanes (ubicación general y nombre), quizás alguna leyenda de dudosa veracidad o de fecha indefinida. Las causas se desconocen, pero podría pensarse en que (Morales, 1986; Peraldo y Montero, 1994; Alvarado, 2021):

- a) no se registró ninguna erupción volcánica (muy poco probable) o fueron muy pequeñas y sin mayores consecuencias, o quedaron enmascaradas por el mal tiempo (muy probable),
- b) muchos de los españoles eran analfabetos y los muy pocos letrados estaban preocupados por registrar otros eventos sociopolíticos o de desastres (muy probable), y
- c) quizás, parte de los documentos que registraron erupciones se perdieron a través del tiempo o se quemaron en algunas iglesias (probable pero muy extraño que no sobreviviera ninguno y si lo hicieran otros documentos).

En tal caso, por eso nuestra historia (escrita) volcánica eruptiva empieza a partir de inicios del siglo XVIII, de modo que la primera erupción debidamente registrada en forma escrita fue la del Irazú en 1721.

4.1 LOS PRIMEROS REPORTES POCO DOCUMENTADOS

En 1765 se da una breve y dudosa referencia sobre una erupción, la primera histórica, presente en los Archivos del Museo Naval de España (Boudon et al., 1996). Años después, los lugareños les comentaron a los naturalistas Moritz Wagner, Carl Scherzer y Alexander von Frantzius, que el volcán Rincón de la Vieja tuvo varias fases con lances de cenizas y vapores previo a sus visitas, es decir hacia finales de la segunda mitad del siglo XIX, quizá una o varias veces en algún momento entre 1840 y 1860. En forma comprobada, se tiene que en agosto de 1863 se registró una erupción corta (unos tres días) de vapor y ceniza (Frantzius, 1861a; Seebach, 1865a; Sapper, 1917, 1925; Trejos, 1959).

Entre 1863 y 1912, se tiene un silencio total en lo que respecta a la actividad eruptiva del Rincón de la Vieja o a los escritos. Se desconoce si dicha brecha en la información es real debido a la ausencia de actividad explosiva del volcán o, más probable, a que sus explosiones fueron pequeñas y pasaron desapercibidas. Únicamente se tiene la noticia del periódico *El Heraldo* (8 de setiembre) y *La Prensa Libre* (13 de setiembre), los cuales comentan la caída de ceniza a comienzos de setiembre de 1899 en las haciendas Los Potrerillos y El Pelón, ambas en la provincia de Guanacaste (*La Prensa Libre*, 13-IX-1899, p. 2). Las haciendas Potrerillos y El Pelón de la Altura se ubican a unos 22 y 24 km al occidente del Rincón de la Vieja, justo en la dirección predominante de los vientos y, por consiguiente, de la caída de cenizas. Por ello, resulta bastante probable asociar dicha actividad con el volcán. Pero para que cayera ceniza hasta dichos lugares, la erupción tuvo que haber sido grande, quizás de

unos 5-7 km de altura sobre el nivel del cráter (Fig. 4.1).



Fig. 4.1: Imagen del recorte del periódico de 1899 donde se comenta de una posible erupción del Rincón de la Vieja a inicios del mes de setiembre.

4.2 LOS REPORTES DE LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX

De manera comprobada, el reactivar del Rincón de la Vieja se verifica el 14 de junio de 1912, cuando ocurrieron erupciones observadas a modo de una nube espesa y negra que se levantó sobre el volcán y que cubrió con abundante ceniza la periferia; además, durante varios días los ríos se tornaron de una coloración blanca lechosa (Tristán, 1921). Otra posible actividad del Rincón de la Vieja se puede asociar con la caída de ceniza en Quebrada Grande de Liberia, al final de enero y principios de febrero de 1915, según un telegrama dirigido a José Fidel Tristán, así como en julio de 1918.

La primera descripción del cráter Activo del Rincón de la Vieja y su lago cratérico fue realizada el 4 de abril de 1920, según el propio relato de Edgar Baltodano firmado el 12 de octubre de ese año (Baltodano, 1920; Trejos, 1959): En los apuntes inéditos de don José Fidel Tristán (salvaguardados en el Archivo Nacional) se desprende que el volcán vuelve a estar activo del 20 al 31 de octubre, así como en diciembre de 1921 (particularmente el día 11) y en junio de 1922, cuando ocurrieron fuertes emisiones de vapor y columnas de cenizas. La condición del cráter observada a principios de abril de 1920, al parecer cambió para el 10-

11 de abril de 1922, durante la expedición formada por José Fidel Tristán y los hermanos Ricardo y Álvaro Fernández Peralta (Fig. 4.2):

El que está en actividad es de forma circular, un poco elíptico, con un diámetro de 500 metros y una profundidad de 100. Las paredes son cortadas verticalmente. En el fondo tiene una perforación en forma de embudo, de donde sale el humo con una violencia tremenda. Este embudo tiene a su borde superior unos 20 metros de diámetro y en el fondo unos 8. Las cantidades de humo que arroja el volcán por ese hueco son enormes, con una temperatura no menor de 250 grados, llevando una fuerza tal que se puede elevar a 300 metros.

Resulta muy interesante esta descripción dado que no se menciona el lago cratérico hiperácido y en cambio sí una boca menor intracrática. Al parecer el lago había desaparecido producto de las erupciones de ese año.

Entre 1923 y 1955 fueron descritas emisiones de vapor y una fuerte actividad fumarólica, en particular en 1940 (Mooser et al., 1958; Boudon et al., 1996).



Fig. 4.2: Erupciones del Rincón de la Vieja. Arriba del 4 de junio de 1922 (Tomada por José F. Tristán, en Trejos, 1959).

4.3 LAS ERUPCIONES DE LA DÉCADA DE 1960-1970

Luego, el 29 de junio de 1963, se reportó una emisión constante de nubes de vapor desde el cráter Activo, con anhídrido sulfuroso que producía molestias en la garganta y los ojos de las personas.

En setiembre de 1966 se inició un período de actividad del Rincón de la Vieja. Las erupciones de ceniza continuaron en octubre y el 6 de noviembre la población de Liberia observó nubes más densas de ceniza en la cumbre. Los habitantes de la planicie liberiana informaron que “hacia unos días el volcán había hecho una erupción de grandes proporciones. Hubo una erupción de gases y piroclastos de grandes proporciones” (*La Nación*, 8 de noviembre de 1966). Durante noviembre y diciembre las erupciones continuaron y la descarga de gases se incrementó notoriamente, esto afectó los tejados, las cercas de púas, pastos, sembradíos, la salud de animales y humanos, contaminando, además, las aguas de los ríos Colorado y Blanco. A finales de noviembre se reportaron al menos dos erupciones diarias, pero desde principios de diciembre las erupciones fueron intermitentes, separadas por pocos minutos una de otra. Las columnas de cenizas y de vapores se alzaban varias centenas de metros sobre el cráter. Las áreas al SSW del volcán hasta unos 10-12 km de distancia del cráter (la hoy llamada “Zona de la Muerte”). Desde el 19 de diciembre se reportaron retumbos fuertes –incluso escuchados en Liberia– con columnas negras y densas de unos 5 km de altura, por lo que empezaron a aparecer muertos gran cantidad de peces en los ríos Colorado y Blanco, y se extendió la mortandad a toda la cuenca oriental del Tempisque (reportes periodísticos de noviembre y diciembre en *La Nación*, principalmente). A raíz de una inspección del área afectada cerca de la cima, realizada el 28 de diciembre, se informa que las cenizas erupcionadas eran principalmente cienos del lago (Krushensky y Spencer, 1967).

Durante las primeras dos semanas de enero de 1967, el volcán estuvo relativamente quieto, con solo erupciones pequeñas y aisladas. Por esto, el 17 de enero de 1967 se organizó una excursión de periodistas y diputados, la cual se vio interrumpida por la mayor explosión vista hasta ese momento (Soto et al., 2003b). La columna de cenizas alcanzó unos 7 km de altura sobre el cráter, emplazando corrientes concentradas y diluidas de densidad piroclástica, que rellenaron algunas depresiones en la periferia del cráter Activo (Hantke, 1971; Boudon et al., 1997a, 1997b). Varias columnas sucesivas de explosiones freatomagmáticas, con alturas de centenas de metros, fueron observadas ese día, con formas “de hongo atómico” (*La Nación*, 19 de enero de 1967). Pocos días después, cerca del cráter se encontró una capa de ceniza con aproximadamente un metro de espesor, la cual se había dispersado a una distancia de 20 km, donde el espesor fue de 0.5 cm de cenizas finas. Alrededor del cráter había bombas y bloques eyectados. Los pobladores de Dos Ríos de Upala y Mayorga fueron evacuados. Esta actividad eruptiva continuó durante el resto de enero y febrero. El 15 de febrero se informó que las erupciones ocurrieron cada 30-45 minutos y una grande con una pluma de cenizas de 2 km de altura sobre el cráter a las 2 p. m. (*La República*, 16 de febrero de 1967). Varios eventos sísmicos leves se registraron a mediados de febrero y ya para el 23 de febrero se informó de la ocurrencia de 28 erupciones en un lapso de 30 minutos, por lo

que se evacuó a unas 100 personas más de la falda SW del volcán (*La República*, 23 y 24 de febrero de 1967). Una actividad similar, pero en decrecimiento continuó hasta mediados de 1967 (Boza y Mendoza, 1982; Soto et al., 2003b). Asociado con estas erupciones se presentaron lahares que cobraron la vida de algunos animales vacunos, equinos y cerdos (M. Martínez, com. escrita, 2022).

La actividad se reanudó en 1969, específicamente entre los meses de marzo y abril, así como entre setiembre y octubre, cuando se originaron erupciones de lodo con gases y piroclastos, cuyas nubes negras de cenizas fueron dispersadas hacia el N. Para julio y agosto de 1970, se informó de nuevas erupciones de ceniza que debieron de cesar en algún momento en un lapso comprendido entre 1970 y abril de 1975 (Mooser et al., 1958; Salguero, 1976b; Boza, 1978). La distribución de las cenizas muestra que los productos del ciclo eruptivo 1966-1970 alcanzaron hasta el golfo de Papagayo y cubrieron un área con forma elíptica con el eje en dirección WSW. La mayor parte de las cenizas fueron erosionadas, aunque inmediatamente al W del cráter Activo la secuencia posee un espesor de 7.5 m (Boudon et al., 1996). Estos depósitos consisten en una alternancia bien estratificada de piroclastos de caída y de oleadas piroclásticas. En esta secuencia, sobreyaciendo a una delgada capa de caída, se encuentra el depósito más grueso e importante, que documenta un evento de corriente de densidad piroclástica concentrada, el cual se infiere que se formó durante la gran erupción del 17 de enero de 1967 (Soto et al., 2003 b).

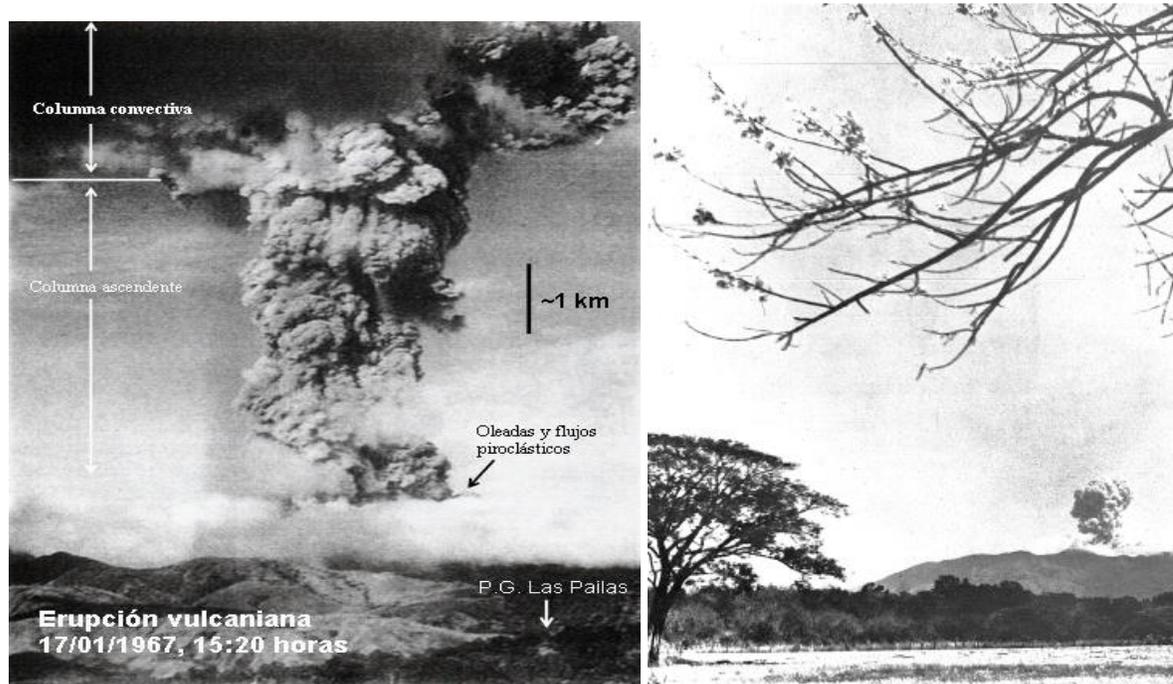


Fig. 4.3: Erupción del Rincón de la Vieja en 1967. A la izquierda, captada desde Curubandé el 17 de enero a 3:20 p. m. (cortesía de Óscar Li; Soto, 2010), mientras que imagen a la derecha (fecha desconocida) fue fotografía desde la carretera Interamericana, cerca de Liberia (Francisco Coto Fernández, en Vargas, 1967).

4.4 LAS ERUPCIONES DE LAS DÉCADAS 1980-1990

El 6 y 21 de febrero de 1983, se registraron nuevas erupciones que afectaron un área pequeña: 2 km al S y al E del cráter Activo. Se escucharon retumbos y se observaron erupciones freatomagmáticas que elevaron bloques, lapilli y cenizas hasta una altura de 1,5 km. El 7 y 8 de febrero se presentaron pequeños lahares en el río Pénjamo y la fauna acuática desapareció (Barquero y Segura, 1983; Thorpe et al., 1985). Una actividad mayor se verificó en marzo de 1984, de carácter freatomagmática. Cubrió un área de 4 km² al S y SE del cráter y se originaron lahares hasta de 15 km de largo, que bajaron por los drenajes al N del volcán (Thorpe et al., 1985). De nuevas erupciones se informó entre setiembre de 1985 y abril de 1986, que lanzaron piroclastos a 500 m del cráter Activo y cubrieron 0.25 km². En diciembre de 1986 hubo una explosión freática con la expulsión de bloques de un diámetro ≤ 50 cm hasta 500 m del cráter. El 1.º de abril de 1987 hubo otra erupción freática que fue precedida por un sismo y posteriormente por lahares, los cuales bajaron por los ríos Azufroso y Pénjamo (Boudon et al., 1996).

Fernández et al. (1991) describieron la actividad eruptiva presentada durante los días 6, 7 y 8 de mayo de 1991 y elaboraron un mapa de caída de ceniza a partir de los reportes realizados por los pobladores. Asimismo, realizaron un mapeo de algunas de las zonas afectadas por lahares y sus depósitos, indicando que los flujos fueron producidos por el desbordamiento de la laguna cratérica y que la amenaza volcánica más importante para el flanco N-NW, proviene de los lahares.

Entre mayo de 1991 y setiembre de 1992 se registraron erupciones; la primera de ellas, pequeña, fue el 2 de mayo (8:11 a. m.) de 1991, seguida por la principal el 8 de mayo (10:17 a. m.), con una columna de cenizas y vapor que alcanzó 5 km de altura. La explosión depositó cenizas y bombas alrededor del cráter Activo, la cual originó lahares hacia el N (ríos Pénjamo, Azul y Azufroso). Del 8 al 11 de ese mismo mes hubo una disminución progresiva de la frecuencia de las explosiones y se mantuvo hasta setiembre de 1992 (Boudon et al., 1996, 1997a). Los productos de la erupción de 1991-1992 cubrieron un área más pequeña y no están tan bien expuestos como los de 1966-1970, además, en el borde occidental del cráter Activo, alcanzaron un espesor de solo 40 cm (Boudon et al., 1996). Durante la erupción del 8 de mayo de 1991, las cenizas abarcaron un área de 200 km² y fueron transportadas por los vientos hacia el NW hasta una distancia de 14 km del cráter (Fernández et al., 1991). El mecanismo de la erupción del 8 de mayo de 1991 fue producto de la interacción entre un cuerpo magmático somero, el lago cratérico y el sistema hidrotermal activo (Boudon et al., 1996). Al interactuar el agua con el magma se produjo la explosión freatomagmática.

Resulta posible que la erupción de 1991 haya sido disparada por el terremoto de Limón del 22 de abril, ocurrido 15 días antes de la primera erupción del Rincón en ese período (Soto et al., 2003b). Dicha explosión generó lahares hacia la vertiente N (región de Upala). Por la fuerza de la erupción, el agua y los sedimentos acumulados en el lago cratérico, fueron expulsados y se derramaron por el flanco N. Estos productos eruptados, durante su recorrido por la ladera del volcán, arrastraron sedimentos de los ríos que aumentaron el volumen de la masa y esto generó corrientes de barro (lahares). El nivel de los lahares en el puente del río

Azul superó los 8 m de altura sobre el cauce original, con una velocidad de descenso estimada en 50 km/h. En el río Pénjamo, cerca de su puente sobre el camino que conduce hacia la región de Buenos Aires, el lahar alcanzó 15-20 m de altura y rebalsó el cauce unos 75 m a ambos lados (Fig. 4.4). Como resultado, los puentes sobre los ríos Azul y Pénjamo fueron destruidos y los lahares avanzaron unos 11 km desde su nacimiento en el volcán (Paniagua et al., 1996).



Fig. 4.4: Lahares en los ríos Azul (izquierda) y Pénjamo (derecha), con los puentes arrasados, el 8 de mayo de 1991 (Fotografías de archivos del ICE).

Después de la erupción del 8 de mayo, la actividad se restringió a temblores menores, emisión de pequeños penachos de ceniza (10 y 19 de diciembre de 1991), fuertes salidas de gases y posibles lahares el 13 de enero de 1992, puesto que se detectaron tibias y sulfurosas las aguas del río Azul (Paniagua et al., 1996). El 6 de noviembre de 1995 (3:04 y 7:44 p. m.) ocurrieron otras erupciones. Una secuencia rítmica de explosiones se dio a lo largo de los días 7 (8 erupciones) y 8 (25 erupciones, según los sismogramas del OVSICORI). Las explosiones eran de características freatomagmáticas con eyección de vapor y rocas con diferentes ángulos balísticos y oleadas piroclásticas rasantes muy similares al vulcanismo surtseyano (un tipo particular de vulcanismo freatomagmático). Las más grandes se registraron el día 7 (1:34 p. m.) con una columna de cenizas y vapor que se elevó unos 4 km encima del cráter y otra el día 8 (9:54 a. m.). Las columnas piroclásticas observadas durante un sobrevuelo del día 8 se elevaban entre unos 500 m y 1000 m sobre el cráter, mientras que el vapor de agua y gases fueron eyectados hasta unos 2 km o 3 km sobre aquel (Boudon et al., 1997b). Para el día 9 la actividad cambió a un comportamiento netamente fumarólico de alta intensidad, levantando columnas de vapor de unos 300 m antes de ser barridas por el viento. Asimismo, eventos numerosos de explosiones de vapor se suscitaron durante ese día, que levantaron la columna de vapor de ~1.5 km sobre el cráter.

En las erupciones de 1995 hubo caída de ceniza en un radio de 1 km, mientras que el bombardeo por bloques fue principalmente hacia la vertiente N. A distancias de 600 m del borde del cráter fueron observados impactos de bloques y bombas andesíticas con cráteres de impacto ≤ 2 m de diámetro por 0.5 m de profundidad (Soto et al., 2003b). En la cúspide se encontraron espesores de cenizas que variaban desde los 2 mm a 2.5 cm. En un área que se extiende al W-SW, se dio la dispersión de cenizas finas y gases barridos por los vientos

predominantes, donde las cenizas finas recorrieron distancias máximas de 70 km. El área total afectada fue de ~350 km².

El flanco N (distancia \leq 11 km) fue afectado por lahares calientes que inhabilitaron el puente sobre el río Pénjamo y socavaron profundamente el vado sobre la quebrada Azufrada. Los lahares fueron producto de la acumulación de piroclastos (cenizas, lapilli) en las vertientes altas, así como la eyección de cieno volcánico y la mezcla de ambos con las precipitaciones pluviales durante los días 7 y 8. Desde el día 9, las crecidas arrastraban sedimentos en suspensión abundante, así como rocas de menor diámetro a las de los dos días anteriores. Varios poblados al momento de las erupciones se consideraron amenazados y estuvieron parcial y temporalmente incomunicados: Agroindustrial Sur (Asentamiento del IDA), Asentamiento La Flor, Buenos Aires, Gavilán y La Vega. Los lahares del 7 de noviembre eran más ricos en agua y más fríos que los del 8 de noviembre. Si bien se considera que las erupciones de noviembre de 1995 fueron más vigorosas que las de mayo de 1991, la formación de lahares de 1991 fue mucho mayor en volumen y extensión (Fig. 4.5). Las velocidades de los lahares de noviembre de 1995 fueron calculadas en el río Pénjamo entre 23.6 km/h y 94.3 km/h. El tiempo que tomaron para viajar los 11 km, desde el momento de la erupción hasta el momento de arribo al puente, varió entre 7 y 28 minutos (Fernández et al., 1995; Paniagua et al., 1996; Soto et al., 2003b). La lluvia ácida afectó los alrededores del cráter Principal, el sector S y SW, con un alcance máximo de 8 km y un área aproximada de 25 km² (Paniagua et al., 1996).



Fig.: 4.5: Depósitos de los lahares de noviembre de 1995 en el río Pénjamo.

El 16 de febrero de 1998 ocurrió otra erupción, que generó un lahar tibio que se distribuyó por los ríos Pénjamo, Azul y Azufrosa, en el flanco N del volcán, cuyo tirante máximo observado alcanzó apenas 50 cm sobre los puentes de estos ríos. Durante el resto del día, al menos ocurrieron unas 23 erupciones de vapor con muy poca ceniza. Los penachos se elevaron unos 300 m sobre el cráter; la última erupción con ceniza ocurrió el día 17 (10:20 a. m.), con una altura estimada en 1 km. No hubo daños materiales ni personales, solo la muerte de peces. El tamaño de la erupción de 1998, de acuerdo con el producto emitido, es de al menos dos órdenes inferiores a la de 1995. Aparte de que la erupción fue pequeña, existía poca cantidad de agua y cieno volcánico en el cráter, además de ser una estación bastante seca, incidiendo para que los lahares fueran pequeños. Ambas erupciones se catalogaron en su momento como freáticas, es decir, sin aporte de magma.

4.5 EL REACTIVAR ERUPTIVO A PARTIR DEL 2011 AL PRESENTE

Después de trece años y medio sin actividad explosiva relevante, el Rincón de la Vieja entró en el 2011 en un nuevo período de actividad eruptiva freática. Para el 15 de agosto del 2011, el burbujeo intenso se manifestaba en el lago del cráter y para el 22 de ese mes se informa de una pequeña erupción. El 4 de setiembre continuaba el burbujeo en el lago cratérico. Para ese entonces, el nivel del lago había ascendido, se localizó a unos 30 m del borde norte del cráter. El 9 y el 16 de setiembre del 2011, se produjeron nuevas erupciones. La del día 16 provocó la salida de cienos (arcillas y limos) volcánicos y cenizas eyectadas hacia el sector N del volcán; los sedimentos (arcillas, limos, bloques) expulsados bajaron calientes por las quebradas Azufrada y Zanjonuda y, en menor cantidad, por el río Pénjamo, lo que provocó la muerte de peces. En la noche del 21 de setiembre y en la mañana (11:30 a. m.) del 22 de setiembre, los vecinos de Buenos Aires y El Gavilán de Upala refieren a una nueva erupción que dejó depósitos en la ladera N del volcán. Las erupciones continuaron los días 22-25 de ese mes, pero las de mayor magnitud ocurrieron el 23 entre las 12:00 m. d. y las 2:45 p. m. Los registros sísmicos evidencian que desde el 9 de setiembre hasta agosto se debieron de haber producido al menos 35 erupciones freáticas, pero el día de mayor actividad volcánica correspondió con el 28 de setiembre, el cual fue 4 veces superior a lo observado en los días anteriores. Para el 29 de setiembre la actividad volvió a los valores normales de sismicidad (Fernández et al., 2011; Taylor y Soto, 2011).

La actividad del Rincón de la Vieja del 2011 no cesó del todo, dado que, en el 2012, posiblemente los días 15 (12:16 a. m.) y 20 de febrero (12:46 a. m.), se produjeron erupciones, según se deduce de los registros sismológicos, hecho que se confirma para otra erupción el 23 de febrero (entre las 4:00 y 4:30 p. m.). En abril de ese mismo año, el lago caliente del Rincón de la Vieja mostraba indicios de incremento de actividad. Para el 11 de abril del 2012, el lago tenía una temperatura de 38 °C, color gris azulado claro y un pH de 0.5, en donde era común un intenso burbujeo y pequeños eventos freáticos de entre 5 m y 30 m de altura. Los días 20, 22-25 y 27 de abril, se registraron otras erupciones. La temperatura del lago era de 33-50 °C en diciembre del 2012 y su pH de 0.37. El campo de fumarolas, ubicado en la pared NW interna del cráter poseía temperaturas entre 120°C y 190 °C, según mediciones de los vulcanólogos del OVSICORI y la RSN.

La temperatura del lago cratérico y su grado de acidez se mantuvieron en el 2013 y 2015 dentro de los rangos previamente descritos. Únicamente una erupción se comprobó en el 2013. La erupción más importante del 2014 se registró el 17 de setiembre (8:48 p. m.) y el 24 de octubre. Durante el 2015 se registraron centenares de señales sísmicas, muchas de ellas presuntamente relacionadas con erupciones freáticas pequeñas. Sobresalen las erupciones del 18 de mayo, 16 y 18 de junio, 21 de agosto, 17-18 de octubre y 16 de noviembre del 2015. La actividad se acentuó durante febrero (p. ej., 09 de febrero), marzo (p. ej., 2, 9 y 20 de marzo) y 1.º de mayo del 2016, pero solo unas pocas tuvieron comprobación visual por los lugareños o de campo por los geólogos. Nuevos eventos eruptivos freatomagmáticos (surtseyanos) se presentaron el 23 de mayo del 2017 (10:20 a. m.) y particularmente el 11 de junio (5:42 a. m.), los cuales generaron lahares calientes que bajaron por los ríos Pénjamo, Azul y quebrada Azufrosa, sin mayores consecuencias que lamentar (Fig. 4.6). La erupción del 11 de junio fue la de mayor energía sísmica registrada desde el 2011 hasta enero del 2018, la cual, además, generó un pequeño flujo piroclástico. Muchas erupciones pequeñas se presentaron antes de la erupción principal (Bakkar, 2017; Bakkar et al., 2017). A partir del 16 de setiembre el volcán volvió a presentar pequeñas erupciones, entre estas, las del 24, 29 y 30 de setiembre del 2017, las más importantes a las 5:45 p. m., 8:56 a. m. y 12:11 p. m., respectivamente, situación que se repitió el 1.º y 2 de octubre a las 2:57 a. m. y 2:20 a. m., respectivamente. Para el día 3, el volcán estuvo particularmente activo, con erupciones a las 2:46, 2:48 a 2:49 p. m. y columnas de 1 km o más de altura. La actividad exhalativa continuó durante todo octubre con bocanadas de vapor y pequeñas erupciones, sobresaliendo la del 24 (4:01 p. m.). El 1.º de noviembre del 2017 se presentó una pequeña erupción (9:10 a. m.). Sin embargo, el 31 de diciembre del 2017 y el 1.º de enero del 2018 se registran 12 señales sísmicas asociadas a erupciones. Estas correspondieron a las segundas más energéticas, después de las del 11 de junio del 2017.

Otras erupciones menores se dieron el 9 de enero del 2018 (5:54 p. m.), quizá el 8 (2:44 y 3:46 p. m.), pero no se observó directamente (tan solo los equipos sismográficos la detectaron), el 27 de enero (5:34 p. m.), el 23 de febrero (4:44 p. m.), así como en marzo los días 3 (4:12 p. m.), 5 (10:30 y 11:59 p. m.), 13 (muy pequeñas a las 10:48 y 11:24 a. m.) y 19 (2:13 p. m.), según determinaron los vulcanólogos del OSIVAM y OVSICORI.

Claramente, no es que la actividad del Rincón de la Vieja se incrementara con respecto a décadas pasadas, sino que ahora se cuenta con una vigilancia volcánica más permanente y constante (estaciones sismológicas y cámaras en tiempo real), por lo que se pueden detectar erupciones de poca monta, situación que antes no era posible. Aunado a lo anterior, en la actualidad habitan una mayor cantidad de personas en su flanco Caribe, donde las redes sociales reportan cualquier evento en forma de fotografías y vídeos.



Fig. 4.6: Lahares calientes descendiendo desde el cráter del Rincón de la Vieja. Arriba en el río Pénjamo (23 de mayo del 2017) y abajo en el Azufrado (11 de junio del 2017) (Fotografías aportadas por H. Bakkar de autores anónimos, posiblemente de Óscar Alvarado).

La actividad volcánica también se puede observar con las estadísticas sismológicas más completas, que se llevan a cabo desde el año 2014, cuando entró en operación la estación sismológica VORI, que se encuentra instalada a 1.7 km del cráter Activo. Referente a la evolución de la cantidad de erupciones registradas en el Rincón de la Vieja en los últimos años (Fig. 4.7), se observa que el 2016 y 2017 eran los de mayor actividad eruptiva para el periodo 2014-2019, y había estado descendiendo hasta el año 2019. Sin embargo, después de la erupción del 30 de enero del 2020 aumentó, convirtiéndose en el año de mayor cantidad de erupciones para el periodo 2014-2021 (Fig. 4.7). En el 2017 se generaron las erupciones más energéticas de todo el periodo, con picos importantes en mayo, junio, diciembre. Esto se explica debido a una transición de una actividad freática (inicios del 2016) a una freatomagmática (mediados del 2016 y 2017) corroborado por la aparición de material juvenil en los sedimentos depositados de los lahares que fueron analizados por el OVSI-CORI, en donde el porcentaje del material juvenil pasó de un 12 % en febrero del 2016 a un 45 % en junio del 2017 (Bakkar y Aguilar, 2018). Durante el 2018 y el 2019, la actividad eruptiva continuó, a excepción de los meses de abril-mayo del 2018 y marzo del 2019, pero en comparación con el año 2017, la energía sísmica de las erupciones fue menor (Aguilar et al., 2020).

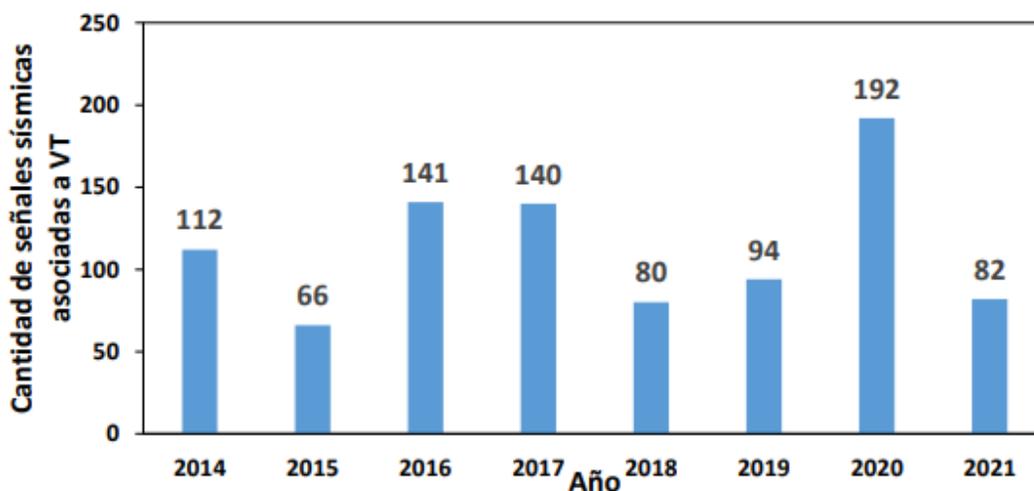


Fig. 4.7: Total anual de las erupciones sísmicamente registradas en el volcán Rincón de la Vieja para el período 2014 al 2021 (Taylor y Aguilar, 2021).

La actividad explosiva del 2020 se inició con una erupción el día 30 de enero, a las 12:18 p.m. (hora local), que fue muy energética e inclusive causó lahares. La erupción tuvo una duración de 180 segundos y una altura de 2 km de la columna eruptiva, generando la expulsión de materiales sólidos y líquidos desde el fondo de lago del cráter Activo, que fueron transportados por las corrientes de los ríos y la lluvia hacia las partes bajas del sector norte del Rincón, particularmente los ríos Pénjamo y Azul, y las quebradas Azufrada y Zanjonuda, en esta última, en el cauce de la quebrada, el flujo alcanzó los 5 m de altura, llegando a tocar el puente peatonal de Finca Sensoria (Taylor y Aguilar, 2021).

En el Rincón de la Vieja las señales sísmicas volcanotectónicas o tipo A (VT) son sismos que ocurren dentro del edificio volcánico y están relacionados con movimiento de los sistemas de fallas y la creación de fracturas asociada a movimientos de fluidos (magma, fluidos hidrotermales). Las señales de Largo Período (LP) suelen estar relacionadas con el movimiento de fluidos dentro del sistema hidrotermal, pero sin fractura la roca. Finalmente, las erupciones son las señales más vigorosas, a veces espectaculares debido a que son las que pueden ser observadas y escuchadas por las personas y, además, son las que causan daños por los flujos piroclásticos y lahares. La cantidad de registros VT, LP y erupciones registradas por la estación VORI se graficaron para diferentes meses (Fig. 4.8).

Durante el mes de enero del 2020, la señal predominante fue los LP, lo que indica un importante movimiento de fluidos en el sistema hidrotermal que culminó con la erupción del día 30 de enero que, posteriormente fueron disminuyendo en cantidad hasta el mes de julio. Durante el segundo semestre del 2020, se incrementó el número de movimiento de fluidos y las erupciones tuvieron sus máximos durante los meses de octubre y noviembre, y tuvieron una característica especial, y es que, aunque había muchas erupciones, estas eran de poca energía, al grado que no eran lo suficiente grandes para sacar el agua y los sedimentos del cráter. De tal forma que no podían causar lahares. Las señales asociadas con fracturas y movimiento de fallas, presuntamente vinculadas con fluidos en movimiento (señales tipo VT, barras amarillas de la Fig. 4.8), tuvieron su máximo pico durante los meses de junio y setiembre (Taylor y Aguilar, 2021).

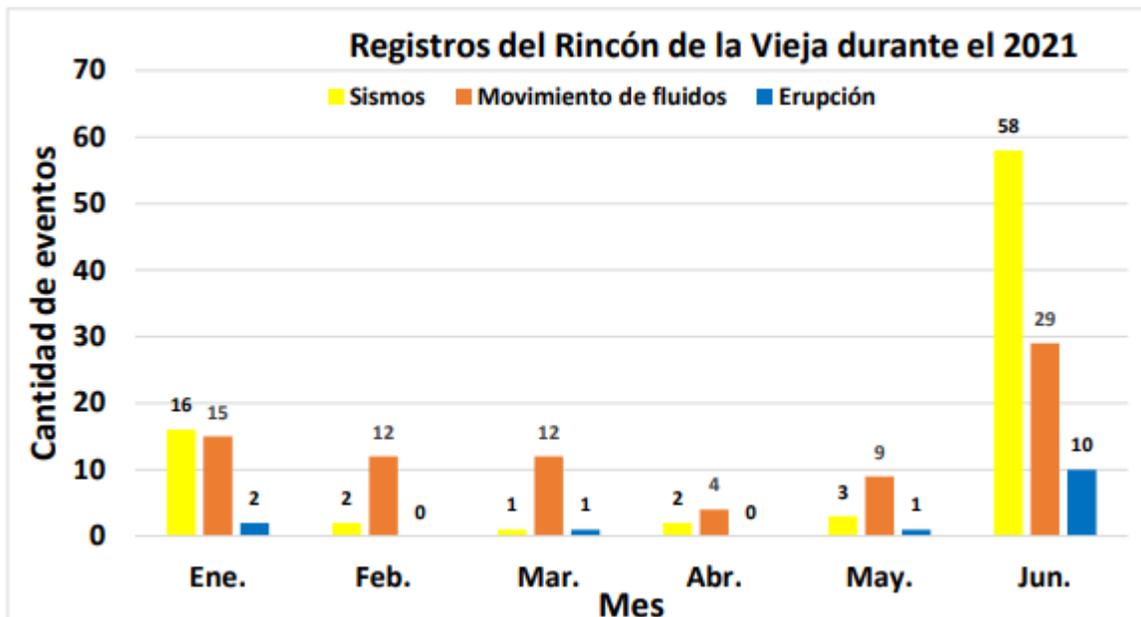
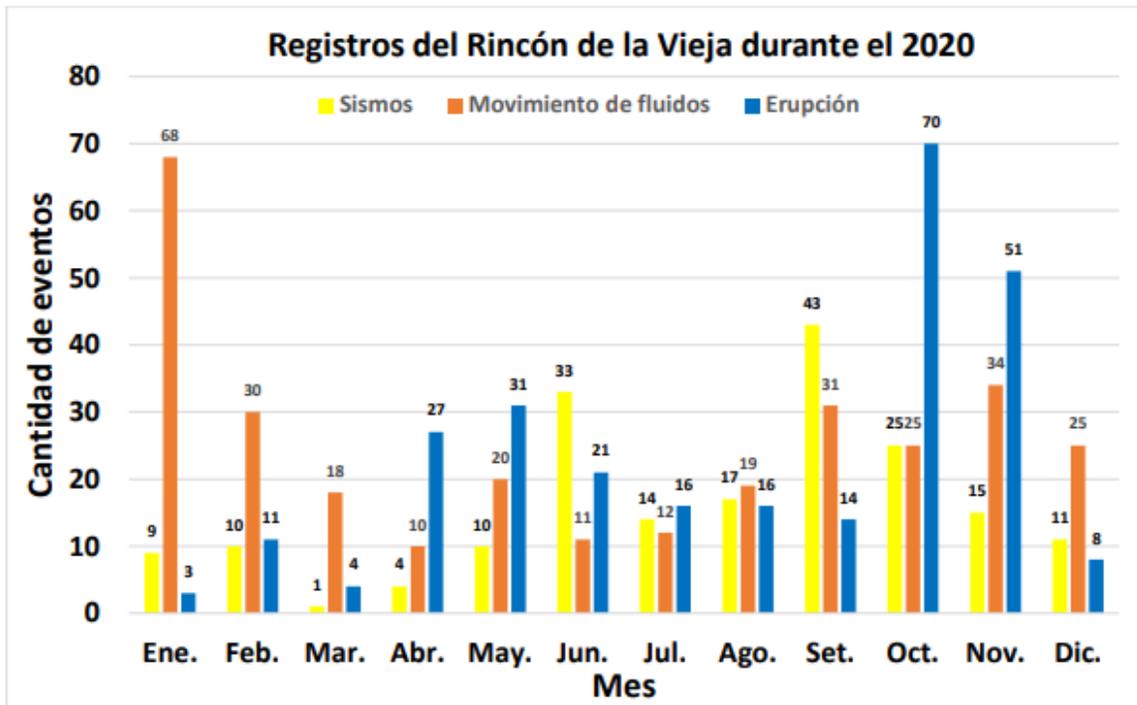


Fig. 4.8: Tipos de señales volcánicas registradas en el Rincón de la Vieja durante el 2020 y 2021 (Taylor y Aguilar, 2021): Sismos volcanotectónicos (VT), Sismos volcánicos de largo período (LP) y Sismos asociados con erupción (no necesariamente explosiva).

4.6 La erupción del 28 de junio del 2021: el evento explosivo histórico mejor estudiado y documentado del Rincón de la Vieja

Dentro del último ciclo eruptivo del volcán Rincón de la Vieja, la erupción del 28 de junio del 2021 es, sin duda, la erupción mejor documentada en lo que respecta a vigilancia volcánica moderna y observación visual en el Rincón de la Vieja, la cual fue fotografiada y filmada desde casi 270° con respecto al cráter y vista tan lejos como la cima del volcán Turrialba, correspondiendo con una de las más energéticas del ciclo.

La erupción principal ocurrió a las 5:42 a. m. con una duración de 90 segundos, seguida a las 6:03 por una explosión menor. Ambos eventos generaron una pluma densa que se levantó por 2000 m antes de caer, y una pluma “termalmente boyante” que subió hasta 5000 m por encima del cráter (7000 m s. n. m.). Mediante fotografías se puede establecer la secuencia de la erupción, donde se observa la ceniza como comienza a caer hacia el sector de Gavilán de Upala (al NW del cráter activo). La ceniza cayó en Bromelias, Sensoria (muchacha), Gavilán y Santa Cecilia, debido a los vientos al SW, así como se detectó olor a azufre en el sector N y NW (Fig. 4.9, 4.10, 4.11, 4.12). Los cultivos de tomate y chayote fueron afectados (Fig. 4.13, 4.14).

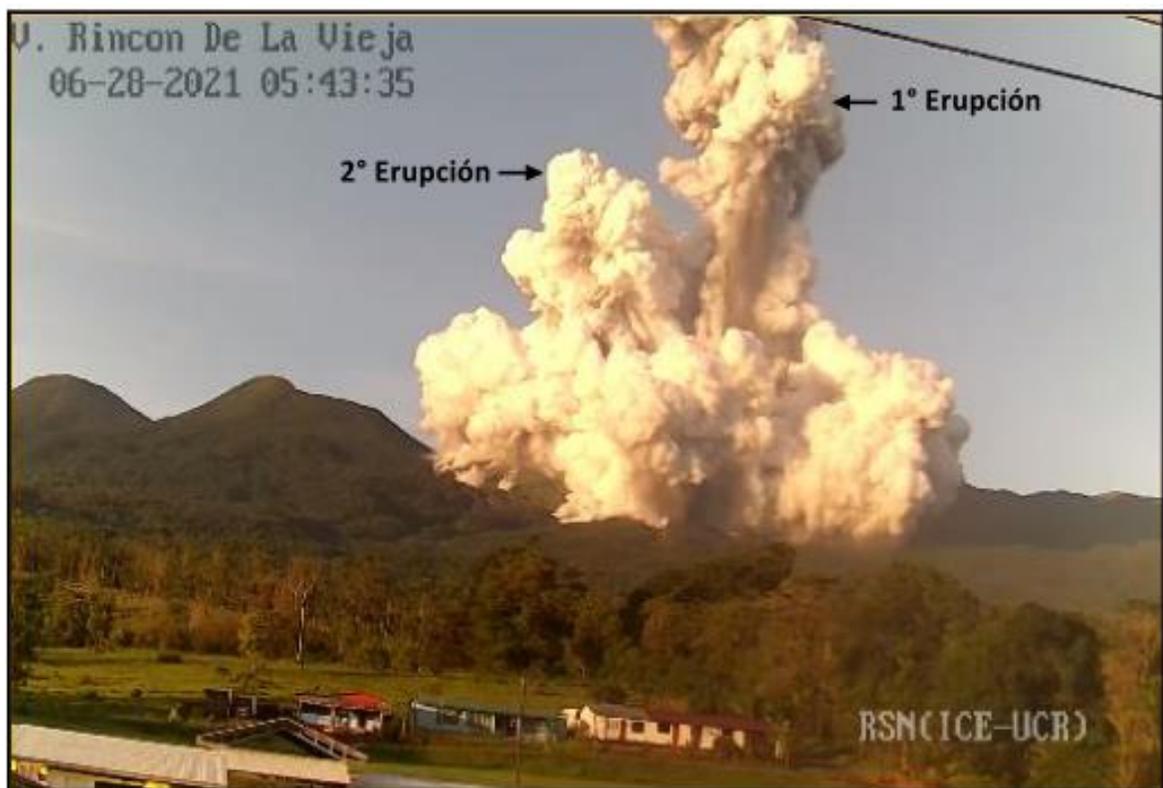


Fig. 4.9: Las dos erupciones sucesivas que ocurrieron el 28 de junio, que se muestran en el sismograma de la Fig. 4.11 (Taylor y Aguilar, 2021).

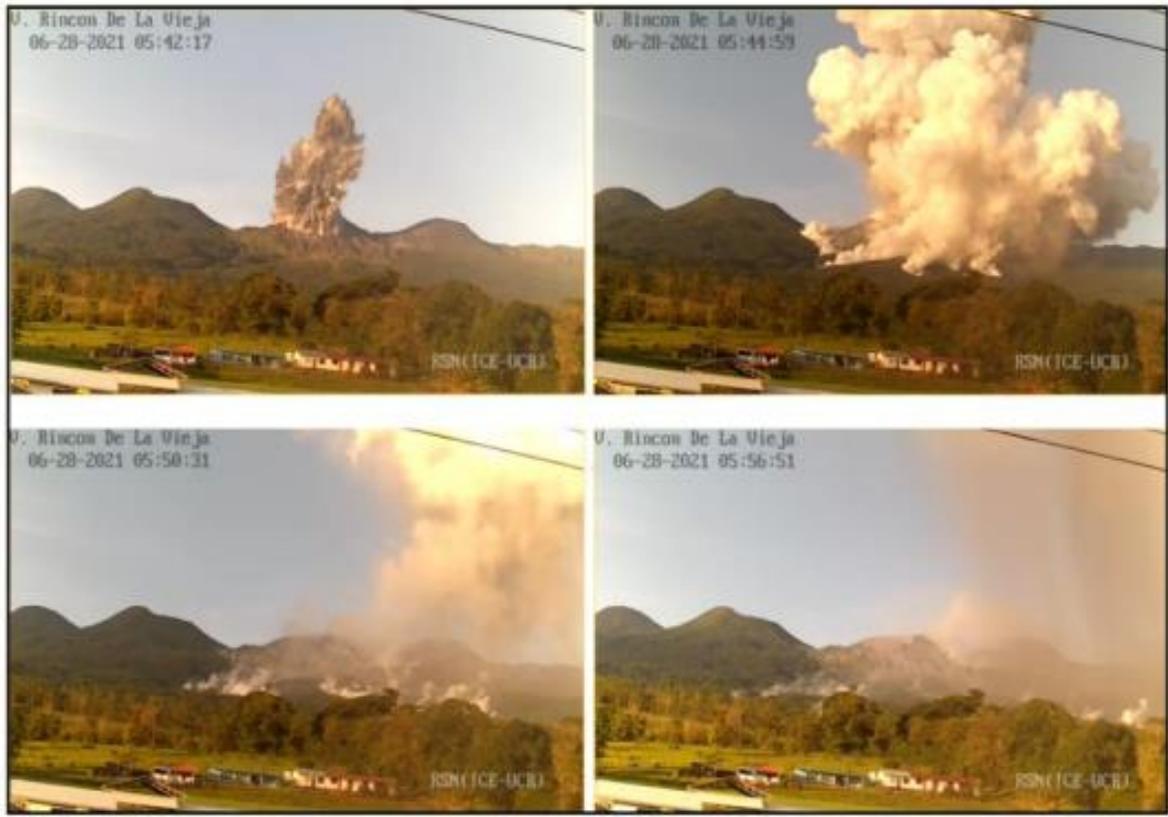


Fig. 4.10: Secuencia de la erupción del 28 de junio del 2021 con base en la cámara de la RSN (Taylor y Aguilar, 2021). Se observa que empieza como un evento surtseyano (columna con forma de ciprés o cola de gallo), seguido por la formación de corrientes de densidad piroclástica (oleadas y flujos piroclásticos en un radio entre 0.6 y 1.5 km) por el colapso de parte de la columna, que se transforman en lahares calientes que avanzan por varias quebradas innominadas, pero principalmente la Azufrosa, Azufrada y Zanjonuda, que convergen en el río Pénjamo y Azul. Una cortina de cenizas avanza hacia el N y NW.



Fig. 4.11: Diferentes tomas de la erupción del 28 de junio del 2021 donde se observa el chorro de cenizas y hongo de cenizas y vapor de agua con gases. Las corrientes de densidad piroclástica se transforman paulatinamente en lahares calientes en los cauces de lo ríos que descienden al norte.



Fig. 4.12: Diferentes tomas de la erupción del 28 de junio del 2021 a la distancia, observada incluso desde la cima del volcán Turrialba (imagen no incluida).

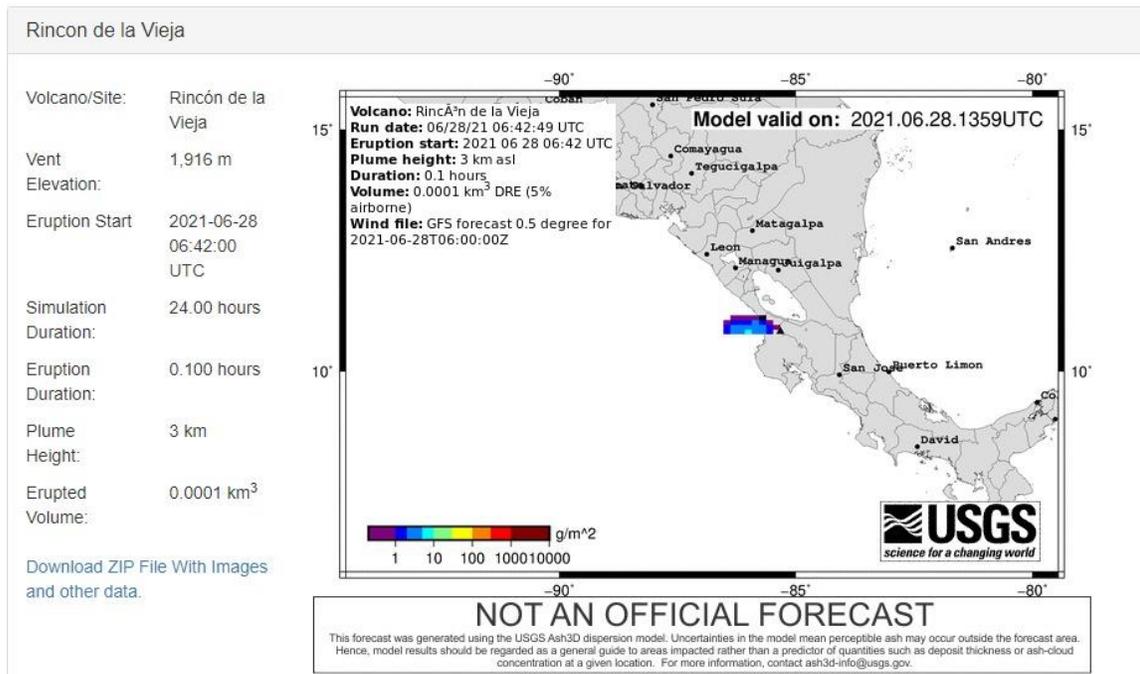


Fig. 4.13: Pronóstico de la pluma de cenizas, gases y aerosoles que dispersó inicialmente hacia el N y NW generando caída de ceniza sobre los pueblos de la zona, propiamente en las localidades de Dos Ríos y Las Bromelias (Upala) y, después, al occidente.



Fig. 4.14: Vegetación afectada por la caída de cenizas en Sensoria y otras localidades vecinas.

Si se compara el sismograma de la erupción registrada en estación sismológica VORI, con la ocurrida el 30 de enero del 2020, registrada en la misma estación, se puede observar que esta última fue 7 veces más grande (Fig. 4.15). También, se puede apreciar en el sismograma de la reciente erupción, dos picos de mayor amplitud, que se asocian con la fase fuerte de dos diferentes erupciones. La segunda erupción se inició entre los 40 y 46 segundos después del inicio de primera erupción (Fig. 4.9, 4.15). La magnitud momento (M_w) estimada para esta erupción fue similar a la que genera un sismo de M_w 4.2. De modo preliminar la fuente se ubica a 2 km de profundidad y se ubica ligeramente al NW del cráter activo, aunque esta ubicación está sujeta a cambios una vez que se cuente con todas las estaciones sismológicas.

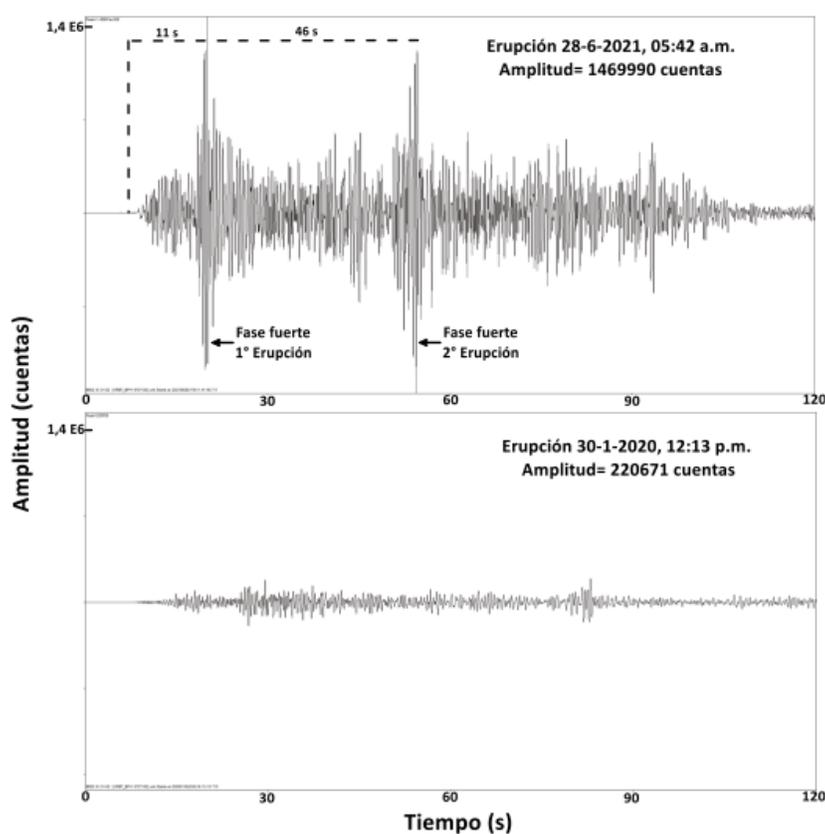


Fig. 4.15: Arriba, sismogramas de las erupciones del 30 de enero del 2020 y del 28 de junio del 2021 registradas en las estaciones VORI, donde la última erupción fue 6.7 veces más energética que la primera; abajo, las dos erupciones que ocurrieron el 28 de junio, que se muestran en el sismograma (Taylor y Aguilar, 2021).

La masa total de SO₂ emitido por la erupción fue alrededor de 1000-2000 tons (Fig.4.16; Simon Carn, com. personal, 2021). Para dicha erupción se estimó con el programa AERMOD la dispersión de SO₂ a los alrededores del volcán, con datos meteorológicos del propio día, obtenidos de los satélites, y la estimación de toneladas de SO₂ reportado por Sentinel-5P/TROPOMI. La dispersión tuvo una dirección principal hacia el N, afectando directamente la zona de El Gavilán, Sensoria y de Buenos Aires. La pluma se dispersó más allá del territorio costarricense, llegando a Nicaragua. Según el modelo y los valores alcanzados, se llegaría a una percepción de azufre baja a nivel superficial al lado norte del cráter.

El SO₂ es un gas normalmente considerado “magmático”, pero también es posible que se deriva de la removilización de azufre almacenado en el sistema hidrotermal o acumulado debajo de un sello hidrotermal. Existen tres posibilidades sobre la procedencia del dióxido de azufre y aunque no se puede distinguir entre estas posibilidades (fuente magmática directa, fuente magmática indirecta o fuente hidrotermal) basado simplemente en la masa de SO₂ emitida, las posibilidades serían las siguientes (OVSICORI-UNA, 2021):

:

a) Considerar una fuente magmática directa para el SO₂, liberado de un cuerpo magmático durante la erupción, asumiendo una concentración inicial de S en el magma de 0.2 wt % (2000 p.p.m.), entonces se estima un volumen de magma entre 83 000 m³ y 170 000 m³, los cuales son volúmenes relativamente pequeños, que se podrían asociar a una esfera de 66-84 m de diámetro.

b) Existe la posibilidad de que la cantidad de SO₂ emitido sea producto de la removilización de azufre (minerales azufrados y fluidos acuosos ricos en azufre) del sistema hidrotermal por degradación termal.

c) Otra posibilidad es que no había magma directamente involucrado en la generación de la erupción, pero que un cuerpo de magma profundo liberó gases magmáticos y calor al sistema hidrotermal, generando una erupción freática.

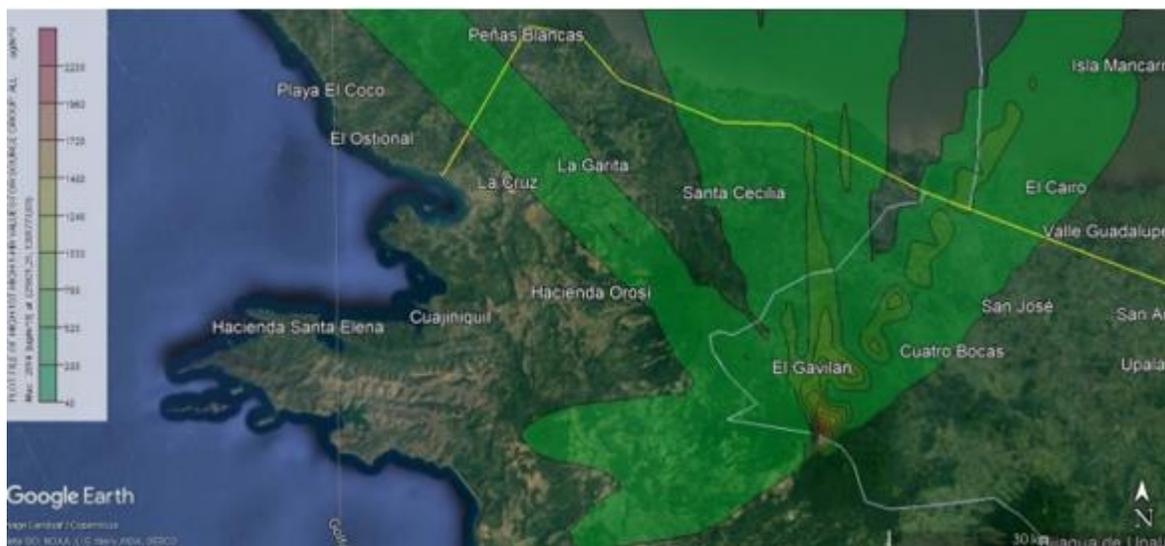
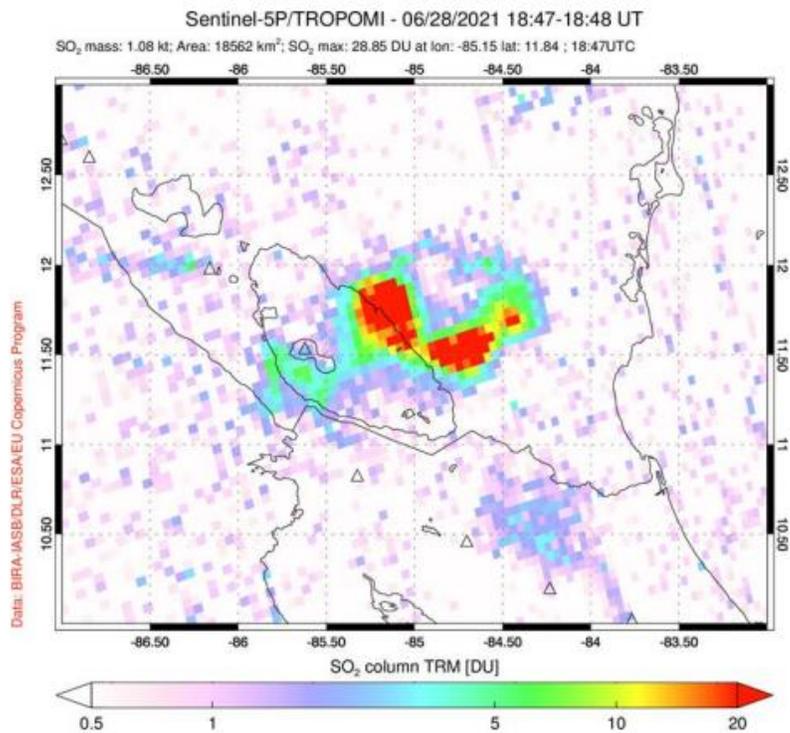


Fig. 4.16: Arriba, los primeros reportes de la imagen Sentinel-5P/TROPOMI mostrando la nube de SO₂ emitido por la erupción del 28 de junio 2021. La masa total de SO₂ emitido por la erupción es 1000-2000 toneladas (Simon Carn, comunicación personal, 2021). Abajo, el modelo de dispersión de SO₂ para la misma erupción.

El material eruptivo arrojado generó lahares que bajaron por los ríos alrededor del cráter activo (OVSICORI-UNA, 2021; presente trabajo). Con base en el registro sísmico obtenido en la estación ubicada en Buenos Aires de Upala, se estimada que los lahares calientes llegaron al puente sobre el río Pénjamo 20 minutos después de iniciar la erupción, con el pico máximo de caudal a los 38 minutos y, en general, el lahar tuvo una duración total de 50 minutos (Fig. 4.17), aproximadamente (Taylor y Aguilar, 2021).



Fig. 4.17. Flujos de lodo y rocas (lahares calientes), pasando por el puente del río Pénjamo (fotografía superior) y el vado de la quebrada Azufrada (fotografía inferior). Fuente de autores desconocidos (Taylor y Aguilar, 2021).

La ceniza y los sedimentos de los lahares fueron recolectados por las comunidades alrededor del volcán y por uno de los coautores del presente informe (GEA), antes de que las lluvias lavaran las cenizas sobre el terreno.

El análisis preliminar de la ceniza muestra que está constituida de ~75 % de material rocoso con un poco de alteración, ~15-20 % de material muy alterado, 5 % de minerales aislados. El vidrio con los minerales es considerado material probablemente juvenil. Esta distribución es diferente del material emitido el 30 de enero del 2020, el cual presentó 25 % de material juvenil. No se descarta que la diferencia importante sea parcialmente debido a un proceso diferente de transporte (en el 2020 no se pudo analizar ceniza directamente, las muestras provenientes de lahares). En el estado actual del estudio, el material magmático en la ceniza del 2021 tiene una baja concentración.

Considerando estos datos, no hay una clara evidencia que la erupción del 28 de junio del 2021 se deba a un ascenso significativo de magma fresco, la interpretación más probable es que la formación de un sello superficial en el sistema hidrotermal generó una acumulación de gases, generando presión hasta su ruptura a las 5:42 a. m. La descompresión súbita permitió la fragmentación de un poco de material magmático que fue intruyendo por varios meses a años de manera lenta (OVSICORI-UNA, 2021).

Sin embargo, hoy día está demostrado que existen erupciones freatomagmáticas donde el contenido de material juvenil es muy bajo (0.7-5 % o ligeramente superior), que incluso se han llegado a catalogar originalmente como freáticas, pero en estudios posteriores se demostró que contenían componente juvenil, como las del volcán Mt. St. Helens (EE. UU.) del 28 de marzo de 1980 (Cashman y Hoblitt, 2004), volcán Turrialba, Costa Rica, del 2010 al 2016 (Alvarado et al., 2016), volcán Mt. Ontake, que pese a que se encontró material juvenil (0.7 %), se sigue reportando como freática (Miyagi et al., 2020) y, finalmente, el volcán Cotopaxi en el 2015, Ecuador (Gaunt et al., 2016). Deben de existir muchos otros casos en la literatura todavía por reevaluarse. Entonces, no se puede excluir que existiera magma juvenil implicado en la erupción.

Después de este evento y hasta la fecha, no hay evidencia de ascenso de un volumen significativo de magma que podría sugerir un incremento de la actividad eruptiva (OVSICORI-UNA, 2021), tal y como efectivamente ha ocurrido hasta la fecha de edición del presente informe, donde las erupciones han sido muy pequeñas.

Referente a la sismicidad antes, durante y después de la erupción del 28 de junio del 2021, se puede establecer lo siguiente. Durante el 2021, la sismicidad VT en la zona central del edificio volcánico se matuvo dispersa y de baja magnitud (< 2.8), razones por las que se deduce que no ha ocurrido un proceso de intrusión importante en el sistema hidrotermal (OVISICORI-UNA, 2021).

La actividad de sísmica del volcán, registrada durante el primer semestre del 2021, se caracterizó por un aumento de los sismos durante el mes de enero, que disminuyeron durante los meses siguientes. Los movimientos de fluidos fueron pocos en comparación con el 2020 y prácticamente no había erupciones, o fueron de muy poca magnitud (Fig. 4.18). Sin embargo, el panorama cambió a partir del mes de junio, donde se observa un evidente cambio en las condiciones de actividad del volcán.

Un resumen del comportamiento de la amplitud de la señal sísmica del tremor registrado en la estación VORI para el periodo del primer semestre del 2021, donde se observa como la amplitud del tremor aumenta a mediados de junio y desciende bruscamente a partir del 24 de junio, cuatro días antes de producirse la erupción del día 28 (Fig. 4.18). A partir del momento se comenzaron a producir señales asociadas a sismos y a movimiento de fluidos, que culminó con la erupción del día 28 de junio, lo que parece sugerir que durante los días 25 al 28 se dio el ascenso de fluidos hidrotermales (Fig. 4.18). Se puede observar que hay una interrupción del tremor a partir de las 1:39 p.m. (hora local) del día 24, se vuelve a reanudar el día 26 a las 8:00 a.m. (hora local) y la erupción se produce prácticamente 48 horas después de reiniciado el tremor (Fig. 4.19; Taylor y Aguilar, 2021).

Resulta importante mencionar que, además, una vez que se dio el cambio en la señal del tremor el día 24 de junio, se comenzaron a registrar una serie de señales que no se habían registrado anteriormente. Se incrementaron rápidamente la cantidad de sismos VT y los LP. En la Fig. 4.19 se puede ver el detalle de la cantidad y el tipo de señales sísmicas registradas, especialmente durante los días 25 y 26, cuando se produjo la interrupción del tremor. Esto parece indicar que, durante ese intervalo, se produjo un ascenso de fluidos hidrotermales que provocaron la erupción.

Las erupciones se empezaron a registrar desde el 28 de mayo y, a partir de esa fecha, es cuando se empiezan a registrar cambios importantes en algunos de los parámetros extraídos de las señales sísmicas, tales como un incremento en la amplitud del tremor de baja frecuencia (Fig. 4.20a y 4.20c), y un incremento en la energía sísmica liberada (Fig. 4.20d). Luego de la erupción del 28 de junio, incluso días antes de la misma, los parámetros muestran una disminución de la actividad volcánica, lo cual se puede interpretar como una liberación de la presión interna debido a una acumulación de gases tanto magmáticos como de vapor de agua del sistema hidrotermal (OVISICORI-UNA, 2021).

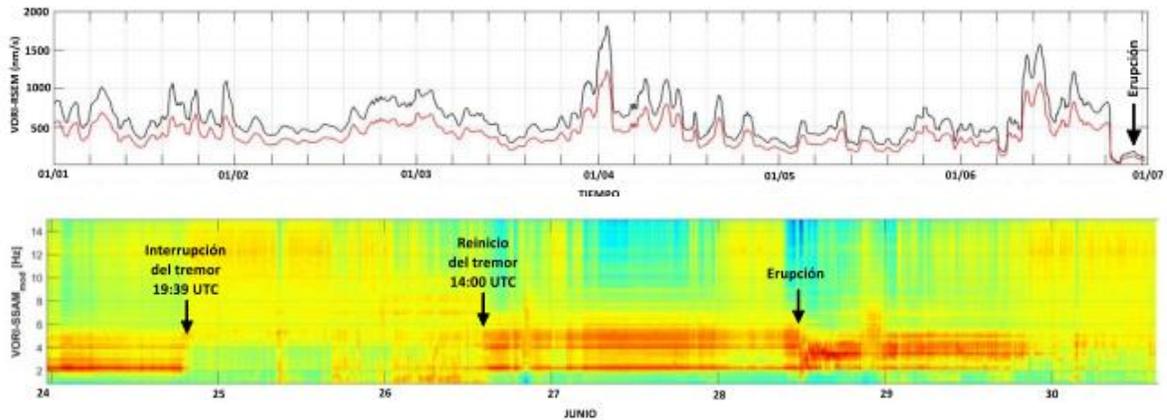


Fig. 4.18: Arriba, comportamiento de la amplitud del tremor registrado en la estación VORI para el año 2021; abajo, comportamiento de la amplitud del tremor para el periodo del 24 al 30 de junio de 2021 (M. Mora en Taylor y Aguilar, 2021).

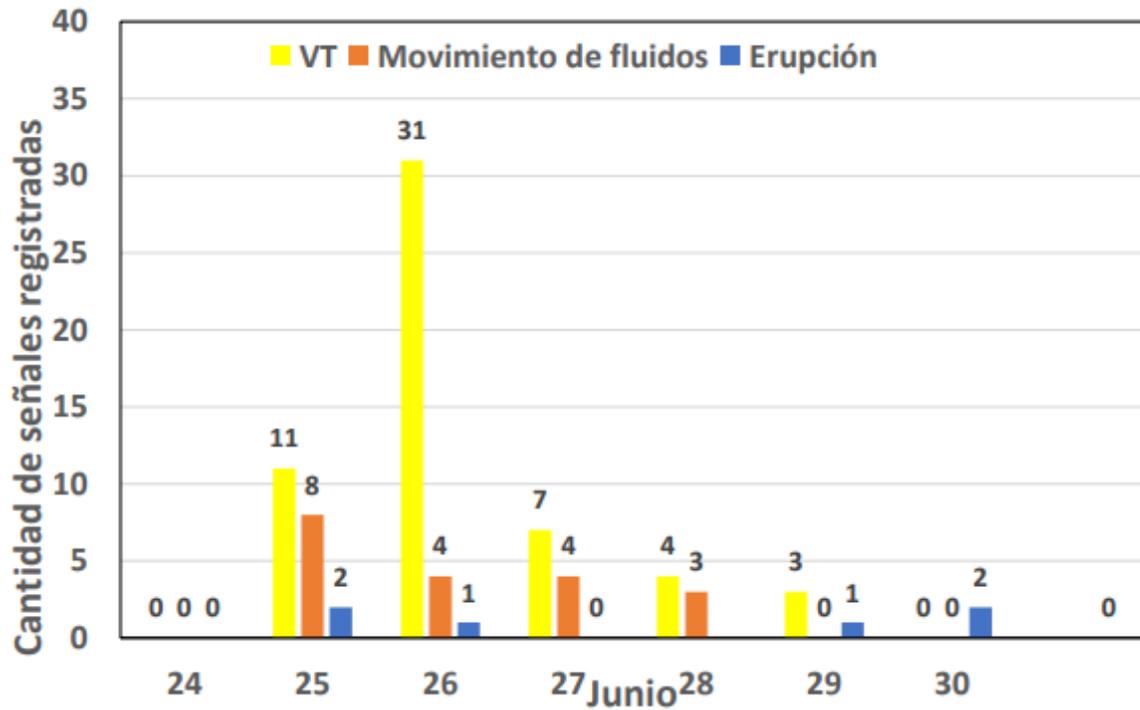


Fig. 4.19: Cantidad de señales de VT, LP y erupciones registradas durante el periodo del 24 al 30 de junio la estación VORI durante el 2021.

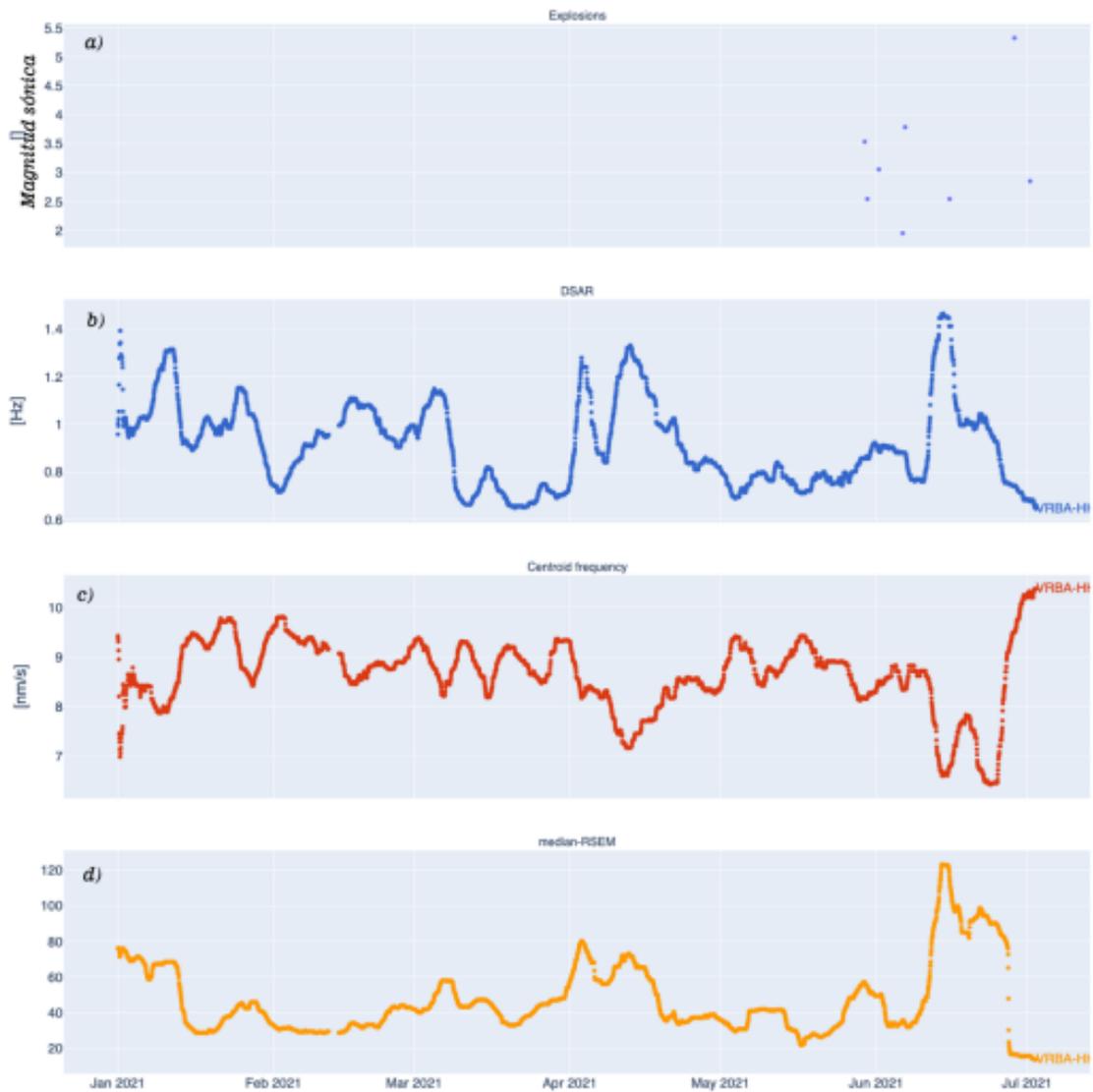


Fig. 4.20: a) Erupciones registradas, b) razón entre bajas y altas frecuencias del tremor, c) frecuencia donde se concentra la mayor energía del tremor, d) energía sísmica. Fuente: OVISICORI-UNA (2021).

Cuadro 4.1: Resumen de actividad eruptiva histórica del volcán Rincón de la Vieja.

Año	Tipo de actividad	Fuentes	
1765	Referencia breve en archivos del (dudosa)	Boudon et al. (1996)	
1844-1854	Erupciones dudosas	Squier (1858), Montessus de Ballore (1884, 1888), Sapper (1917, 1925)	
1863	Explosiones de vapor y ceniza	Frantzius (1861a), Seebach (1865a)	
Set. 1899	Erupción	Alvarado (2021)	
14/06/1912	Erupción violenta con cenizas abundantes	Baltodano (1920), Tristán (1924), Trejos (1959), Mooser et al. (1958), Hanke (1971), Salguer (1976), Boza y Mendoza (1982), Boza (1982), Barquero y Segura (1983), Thorpe et al. (1985), Boudon et al. (1966, 1997a, b) Soto et al. (2003a, b).	
2/1915			
6/1918			
10/1921	Columnas de ceniza		
4-6/ 1922	Emisiones de vapor y columnas de ceniza		
9/1966-8/1970	Explosiones moderadas entre octubre 1966 y enero 1967, violentas entre enero y abril de 1967, menores entre abril de 1967 y agosto de 1970. Afectación a las cuencas superiores de los ríos Blanco y Colorado (flanco SW).		
1971	Erupción con cenizas que produjo lahares.	Boudon et al. (1996, 1997a, b), Fernández et al. (1991)	
2/1983	Explosiones con proyección de bloques el 6 y 21. Pequeños lahares en el valle del río Pénjamo el 7 y 8.		
3/ 1984	Violentas erupciones. Hubo lahares hacia el flanco norte que alcanzaron 10 a 15 km de distancia		
9/1985 - 4/1986	Vegetación dañada por varias erupciones menores deducidas de los sismogramas. Algunos depósitos alrededor del volcán.		
31/12/1986	Explosión freática		
1/4/1987	Explosión freática y pequeños lahares en el río Pénjamo y quebrada Azufrosa		
5/1991-9/1992	Pequeña explosión el 7 de mayo (8:11 a.m.), con una columna de cenizas y vapor que alcanzó 5 km de altura y originó los lahares en el Pénjamo, Azul y Azufrosa. Del 8 al 11 de mayo decreció progresivamente en la frecuencia de las explosiones. Hasta septiembre de 1992 hubo explosiones menores intermitentes.		
11/1995	Los días 6-8 se dieron al menos 25 explosiones, la mayor el día 7 (1:34 p.m.), con una columna de 4 km por encima del cráter. Lahares en el río Pénjamo hasta la desembocadura en el río Cucaracho (9 km). Caída de ceniza hasta 30 km al W del volcán.		Fernández et al. (1995), Paniagua et al. (1996), Soto et al. (2003b)
2/1998	La mayor explosión el 16 de febrero (5:14 a.m.) con un lahar tibio por los ríos Pénjamo, Azul y Azufrada. Durante el día hubo 23 erupciones con muy poca ceniza; la última el martes 17 (10:20 a.m.). Hubo muerte de peces. Las erupciones fueron freáticas y su tamaño al menos dos órdenes inferiores a la de 1995.		Fernández et al. (2011), Taylor y Soto (2011), Paniagua et al. (1996), Bakkar (2017), Bakkar et al. (2017), Alpizar (2018), Alvarado (2021)
2011-2022	Erupciones freáticas y freatomagmáticas, por lo general pequeñas (<2 km de altura), con generación lahares pequeños y mortandad de peces. Una de las erupciones más sobresalientes de este período fue la del 28 de junio del 2021 a las 5:42 a.m.		

5. ACTIVIDAD VOLCÁNICA SECUNDARIA (FUMAROLAS Y FUENTES TERMALES)

A continuación, se presenta una síntesis de la actividad secundaria (fuentes termales, fumarolas y hornillas) del Rincón de la Vieja.

Las fuentes minerotermales en el macizo del volcán activo Rincón de la Vieja se pueden agrupar en tres áreas (Fig. 5.1): a) su lago cratérico termomineral cuspidal, b) las fuentes minerales y minerotermales localizadas tanto en su flanco Pacífico con temperaturas y pH muy variados (temperaturas entre 24 °C y 99 °C, pH entre 1.9 y 7.6) y c) las del flanco Caribe relativamente menos calientes y con acidez más restringida (temperaturas entre 26 °C y 68 °C, pH entre 3.51 y 6.6).

Las nacientes de agua fría que circulan por los ríos y la lluvia suelen tener temperaturas de entre 22.4 °C y 27.4 °C y pH entre 5.74 y 8.03 (Barahona et al., 2001; Tassi et al., 2005).

Según estimaciones de los geólogos islandeses en 1963, el reservorio geotérmico estaría entre los 150 °C y más de 200 °C (Faillace, 1973). Estudios posteriores demostraron que era mucho más caliente (205 °C a 250 °C) y se ubicaba entre 100 y 800 m b. n. m. (Chavarría et al., 2006). Según el diagrama triangular $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$, los manantiales Hacienda Mogote y finca Potrillos son aguas geotérmicas inmaduras cercanas a la fuente de calor, las hacienda Santa María y hacienda Borinquen son aguas superficiales calentadas por vapor, mientras que la naciente de río Salitral es la única agua geotérmica madura; el resto de las muestras son aguas carbonatadas relacionadas con aguas superficiales. Al utilizar el geotermómetro de Na/K (Giggenbach, 1988) la temperatura del reservorio es de 225 °C; para este análisis se utilizó únicamente las muestras del manantial río Salitral (Fig. 5.3).

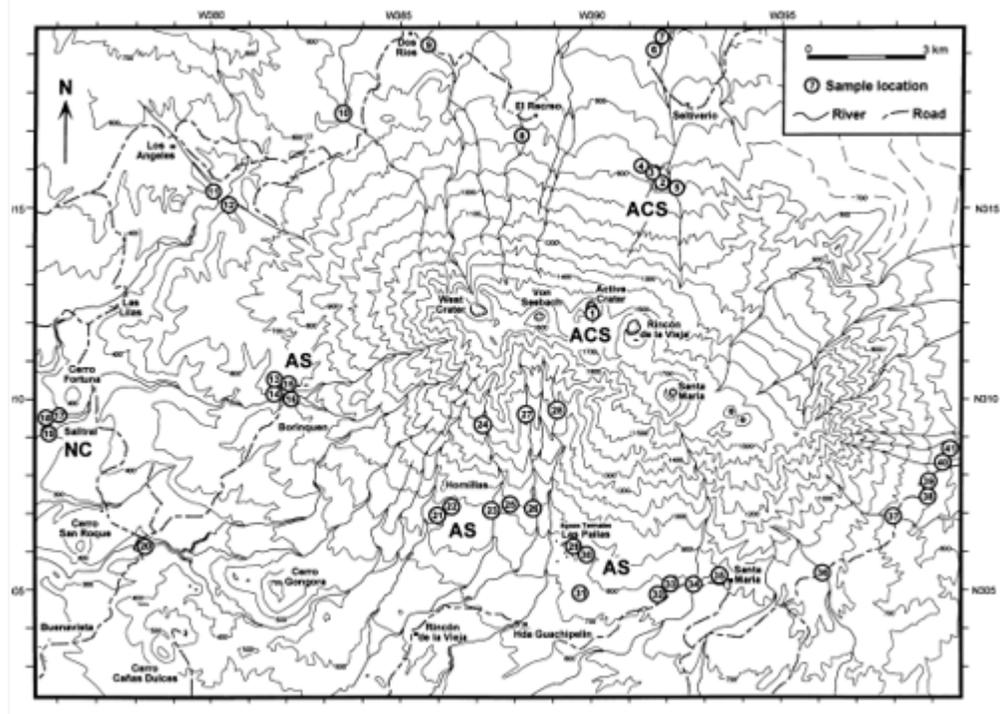


Fig. 5.1. Localización de las principales manifestaciones termales en el volcán Rincón de la Vieja (basado en Kempster y Rowe, 2000; Tassi et al., 2005).

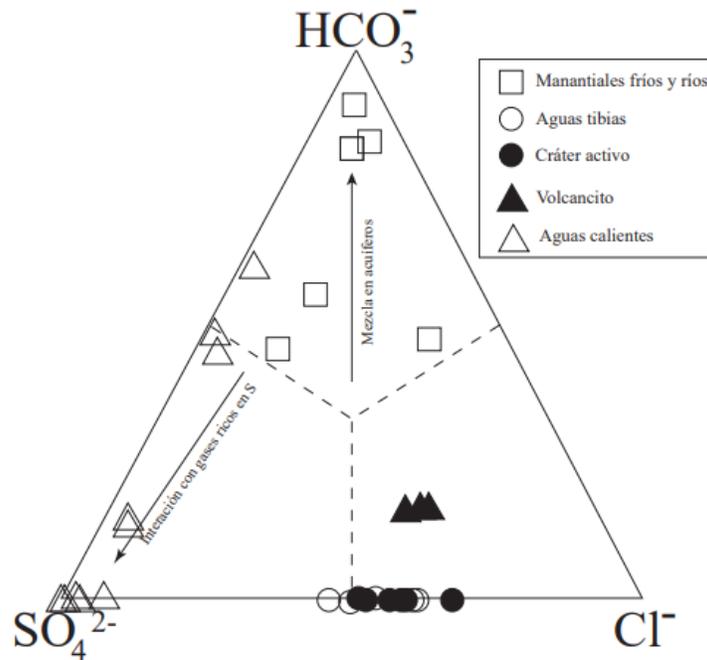


Fig. 5.2: Diagrama ternario de las aguas termales del Rincón de la Vieja (basado en Tassi et al., 2005).

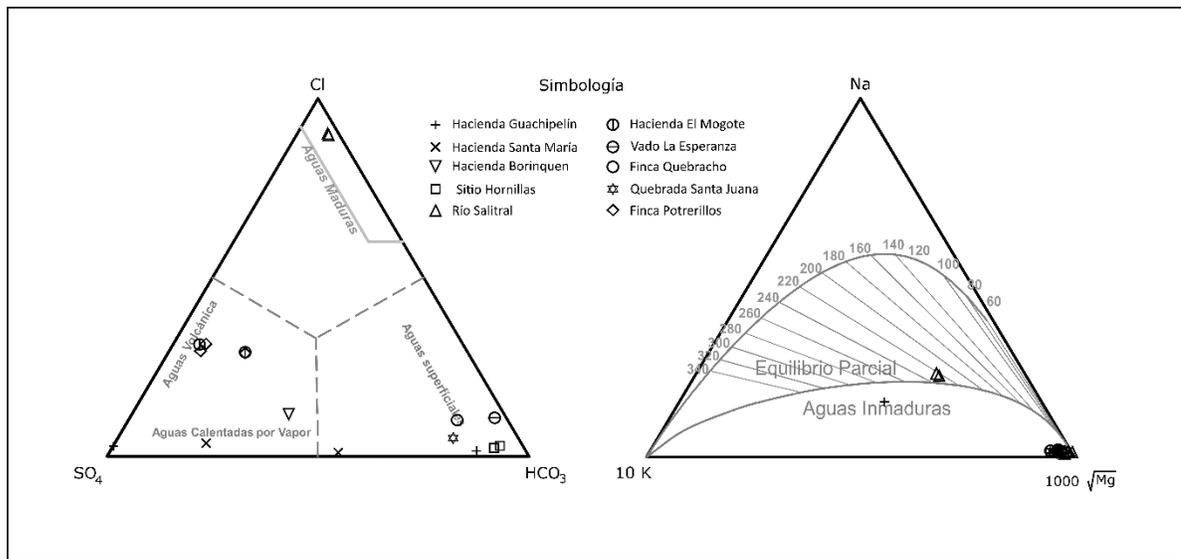


Fig. 5.3: Diagramas ternarios de clasificación de las fuentes termales en el flanco sur o Pacífico del Rincón de la Vieja.

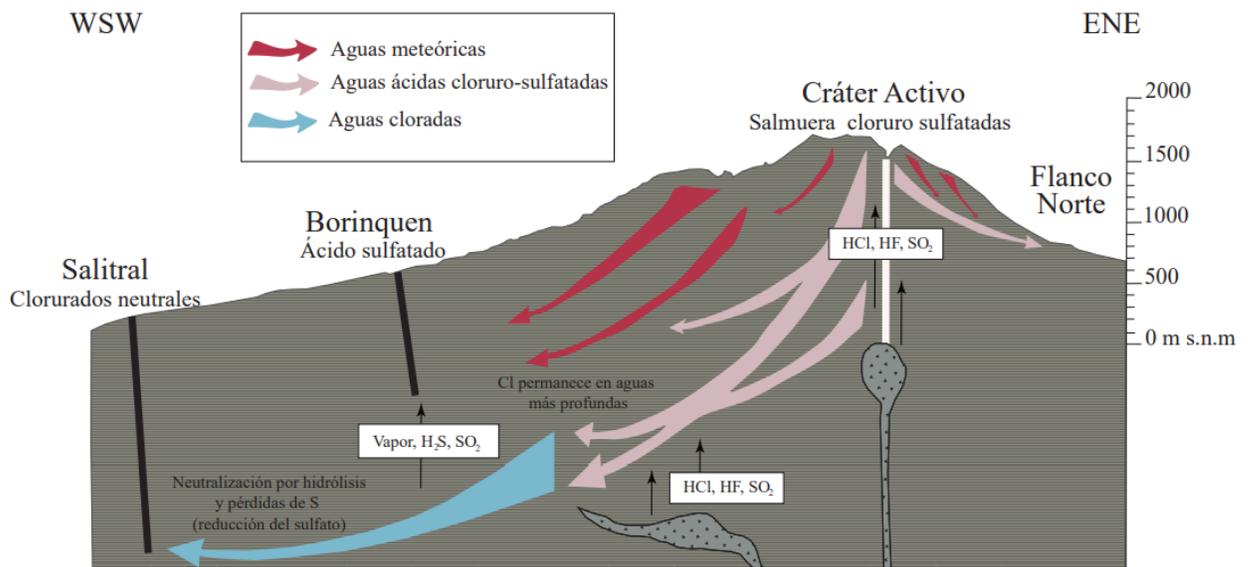


Fig. 5.4: Modelo conceptual del tránsito de los fluidos geotérmicos (Kempster y Rowe, 2000).

5.1 Rincón de la Vieja, cráter Cuspidal

Lago cratérico del Rincón de la Vieja

Las aguas lodosas del lago cratérico activo del Rincón de la Vieja (hoja Curubandé, 390.250E-312.400N) poseen temperaturas entre 28.5 °C y 58 °C (por lo general entre 30 °C y 45 °C) y son muy ácidas con pH desde -0.02 a 1.4 (Fig. 5.5), clasificándose como aguas cloruro-sulfatadas muy enriquecida en fluoruro (Kempster y Rowe, 2000; Tassi et al., 2005, 2009; Fernández et al., 2012; Avard et al., 2013).



Fig. 5.5: Lago cratérico hiperácido y caliente del Rincón de la Vieja (fotografía cortesía de Jean-Paul Dinarte).

5.2 Rincón de la Vieja, sector Pacífico

En la falda suroeste del Rincón de la Vieja se presentan cuatro zonas principales de actividad exhalativa superficial (pozas solfatáricas, fuentes termales, volcancitos y piletas de barro), representadas de NW a SE por los nombres: Borinquen, Hornillas, Las Pailas y Santa María, además de una serie de manifestaciones termales y minerales frías menores distribuidas por toda el área. Las manifestaciones termales principales fueron originalmente

mencionadas por Karl von Seebach (1865) y dibujadas y descritas por Tristán (1921), estas zonas se encuentran alineadas en dirección NW-SE, es decir, en asocio con el sistema de fallamiento regional. Por otra parte, en las propias zonas de alteración hidrotermal, se encuentran pequeñas fallas y diaclasas con diferente orientación que, posiblemente, no son estructuralmente profundas, pero tuvieron capacidad para cortar el sello que permite el almacenamiento del fluido endógeno. De esta forma, el vapor del reservorio pudo subir a la superficie, lo que originó las diversas zonas con emisión espontánea (Corrales, 1974, 1976; Raccichini, 1976; Lescinsky et al., 1987; Giggenbach y Corrales, 1992).

En general, las manifestaciones termales poseen temperaturas muy variables entre 30 y los casi 100 °C y pH igualmente variables entre 1.9 y 8.14, mientras que las minerales frías poseen temperaturas entre 10 °C y 25 °C y pH alrededor de 4.5. Normalmente, las aguas no geotermales, es decir de escorrentía superficial, poseen temperaturas ambientes entre 20 °C y 28.5 °C en la región. Según la clasificación de aniones dominantes y determinaciones térmicas, los diferentes tipos de agua se agruparon en: sulfatadas (frías y calientes), bicarbonatadas (frías y calientes), mezclas bicarbonatadas-sulfatadas y las cloruradas.

Las aguas minerotermales sulfatadas poseen pH variables desde ácidas hasta neutrales (pH entre 2.21 y 7.44) y temperaturas igualmente variables entre 42 °C y 98 °C, por lo anterior, generalmente presentan manifestaciones de fuga de vapor (fumarolas, hornillas). Las sulfatadas calientes parecen estar relacionadas con estructuras regionales y comprenden las Hornillas, las Pailas y Santa María, las cuales están alineadas NW-SE e incluyen fumarolas (temperaturas entre 88 °C y 93 °C), hornillas (temperaturas entre 92.6 y 96 °C) y aguas y laguitos termales (temperaturas entre 34 °C y 96 °C). Las aguas sulfatadas frías forman un alineamiento perpendicular (NNE-SSW) con temperaturas entre 15 °C y 25 °C y se ubican en las inmediaciones de la quebrada Agris y un punto aislado en el sector de Santa María, entre el río Negro y el arroyo Zopilote (ICE, 1991; Tassi et al., 2005; Barrantes, 2006).

Las aguas bicarbonatadas calientes (temperaturas entre 30 °C y 62 °C) están ubicadas sobre un alineamiento NE-SW en el río Negro, ligeramente ácidas hasta algo básicas, mientras que bicarbonatadas frías se distribuyen en varios lugares con temperaturas entre 16 °C y 29 °C (ICE, 1991; Barrantes, 2006). Las aguas mezclas bicarbonatas sulfadas se encuentran en el sector de Santa María con temperaturas de alrededor 37.2 °C y 40 °C (Tassi et al., 2005; Barrantes, 2006).

A nivel local, se presentan algunas fuentes cloruradas, ligeramente ácidas (pH entre 6.01 y 6.47) y así mismo calientes como la Salitral Norte (temperaturas entre 71.0 °C y 75.4 °C) ubicada al WSW del volcán (ICE, 1991; Giggenbach y Corrales, 1992), evidencia de descargas laterales del reservorio geotérmico.

De acuerdo con estudios realizados en la concentración de mercurio en el suelo, para el área del flanco SW del volcán Rincón de la Vieja se halló que se encuentra en concentraciones altas en amplias zonas de dicho flanco y que concentraciones anormales fueron identificadas en las zonas de Las Pailas, Las Hornillas y río Negro. Se pudo así interpretar que el incremento de mercurio es reforzado por la presencia de una falla con un rumbo aproximado N70°W, que cruza esta zona (Lescinsky et al., 1987). La orientación de

esta falla coincide con otros rasgos estructurales identificadas en la región, incluyendo anomalías geofísicas en el Miravalles, la distribución de fuentes termales y el alineamiento de los cráteres del volcán Rincón de la Vieja (Lescinsky et al., 1987).

Mientras que la mayoría de las fuentes termales, volcancitos de barro y fumarolas quedan dentro del área del parque nacional volcán Rincón de la Vieja, unas pocas están dentro del área recreativa y terapéutica del Spa Simbiosis del hotel Hacienda Guachipelín, que empezó a operar en 1990 o aquellas del río Negro, a partir del 2003.

Finalmente, Frantzius (1862a, b, 1873) menciona que, al occidente de Liberia, en la hacienda La Cueva, existen fuentes termales. Waring (1965) vuelve a citar dicha fuente, de ubicación poco precisa. Según cuentan los lugareños, la hacienda La Cueva originalmente se extendía desde el río Tempisque hasta las faldas del volcán Rincón de la Vieja, cerca de la actual localización de la hacienda (hoja Ahogados, 369.500E-296.600N). Por lo anterior, se piensa que la fuente mencionada en el siglo XIX puede corresponder con cualquiera de las localizadas cerca del río Tempisque (fuentes Tempisquito o Santa Juana) o alguna de las localizadas a lo largo del río Blanco, entre muchas otras posibilidades.

Middle Earth

Consiste en unas nacientes termales localizadas contiguas a la entrada que conduce a Quebrada Grande, por la carretera Interamericana. Las fuentes termales se ubican, en el flanco distal del volcán Cacao, aunque pueden ser producto del drenaje del reservorio geotérmico del Rincón de la Vieja, a través de una falla regional. Las fuentes son aprovechadas como un sitio recreacional por Middle Earth Thermal Springs (Fig. 5.6).

Quebrada Santa Juana

Fuente termal bicarbonatada localizada en la quebrada Santa Juana (hoja Ahogados, 367.084E-311.118N) que surge al tope de una ignimbrita con un burbujeo y un sabor bicarbonatado. Su temperatura es de entre 40.8 °C y 42.0 °C y el pH es entre 5.91 y 7.15; la temperatura de la quebrada es de 28.2 °C. Los parámetros de temperatura y pH son similares a los de la fuente termal río Tempisquito, que se localiza a pocos centenares de metros (ICE, 1991; presente trabajo).

Río Tempisquito

Fuente termal localizada en la margen derecha del río Tempisquito (hoja Curubandé, 366.640E-309.279N) que surge de las ignimbritas y, en ocasiones, de las arenas de su playa. Su temperatura es de 35.6 °C y el pH es de 6.82 (presente trabajo).



Fig. 5.6: Instalaciones para captar y aprovechar artesanalmente las aguas termales en Middle Earth Thermal Springs en el 2015.

Río Tizate

A lo largo del río Tizate (hoja Curubandé, 378.8E-305.9N, 379.3E-305.9N, 379.4E-305.9N, 379.6E-306.3N y 379.8E-306.5N) se presentan al menos unas cinco nacientes termales (35°C a 45 °C) ligeramente ácidas hasta neutrales (pH 6.58 a 7.10), del tipo bicarbonatadas-sulfatadas que brotan desde depósitos de flujos piroclásticos (Chavarría et al., 2007; Hammarlund y Piñones, 2009; Molina y Martí, 2016). Una de estas nacientes fue entubada para suplir las dos piscinas termales del balneario recreacional Vandara, by Sky Adventures, también llamado Vandará, Hot Springs & Adventure.

Sitio Pilón (Quebrada Tibio)

En este sector se presentan dos pequeñas fuentes minerotermales, una en la margen izquierda de la quebrada Tibio (hoja Curubandé, 384.2E-306.5N) con 35 °C (pH 5.0) y otra con temperatura entre 42 y 50 °C (pH 6.0) que brotan de una pequeña loma situada unos 500 m al SE de la quebrada San Antonio (hoja Curubandé, 383.4E-306.3N). Ambas fuentes surgen en coladas de lava andesíticas del volcán Rincón de la Vieja y, en los alrededores, se observan costras de sílice hasta de 15 cm de espesor (Chavarría et al., 2007; Molina y Martí, 2016).

Río Salitral de Cañas Dulces (Salitral de Liberia, Las Lilas)

En el camino que se dirige de la hacienda Los Ahogados a Las Lilas, en el río Salitral (principalmente en su margen derecha), se presentan varias nacientes de aguas termales y minerales con temperaturas entre 24 °C y 45 °C y pH entre 6.6 y 7, algunas mezcladas con las aguas del río, mientras que otras son más calientes con temperaturas entre 62.0 °C y 75.4 °C y pH variables; algunos muy ácidos de 2.70, mientras que otros ligeramente ácidos hasta ligeramente alcalinos de entre 6.01 y 7.50 (hoja Curubandé, Salitral 1: 375.3E-308.8N; Salitral 2: 378.780E-310.148N; Salitral 3: 375.6E-309.5; Salitral 4: 375.897E-309.116N) (Faillace, 1973; ICE, 1991; Giggenbach y Corrales, 1992; Kempter y Rowe, 2000; Hammarlund y Piñones, 2009; Molina y Martí, 2016; presente trabajo). Otra manifestación termal, se encuentra en río Salitral, en la finca del Sr. Cala, con una temperatura de 45 °C, pH 2.70; se explota artesanalmente el barro para tratamiento cutáneo (hoja Curubandé, 378.780E - 310.148N). Dichas manifestaciones se visualizan incluso a altitudes hasta de 740 m y pueden llegar cerca del punto de ebullición, incluyendo aguas ácidas sulfatadas y solfataras (Fig. 5.7).

Una de las más importantes se encuentra cerca del domo riolítico de Fortuna (hoja Curubandé, 375.7E-310.5N), sobre el río Salitral, con descarga de unos 90 L/s aguas cloruro-sódicas hasta bicarbonatadas (temperatura entre 68.3 °C y 70.0 °C pH entre 6.0 y 7.31;) y con la formación de depósitos de travertino, representativa del agua del reservorio geotermal (Kempter y Rowe, 2000; Molina, 2000; presente trabajo).

El *spa* del Buena Vista Lodge Hotel, aprovecha las aguas termales del tipo bicarbonatadas-sulfatadas, algo bóricas (concentración de 1.670 mg/L; Hammarlund y Piñones, 2009) localizadas contiguo a la confluencia del río Salitral con una quebrada intermitente sin nombre (hoja Curubandé, 382.507E-310.104N), con una temperatura entre 44.4 °C y 49.0 °C y pH casi neutral de entre 7.31 y 7.6 para la más caliente.

Borinquen

Estas se ubican en la quebrada Pacayal, contiguo a la confluencia con el río Salitral. Poseen una temperatura entre 81 °C y 99 °C y un pH entre 2.3 y 3.10, clasificándose como sulfatadas (Giggenbach y Corrales, 1992; Kempter y Rowe, 2000; Zimmer, 2002; Tassi et al., 2005; Molina y Martí, 2016). Allí, las fuentes termales poseen salida de gases del tipo CO₂, SO₂, H₂S, HCl, HF, con trazas de He, Ar, N₂ y CH₄ (Zimmer, 2002; Zimmer et al., 2004).

Desde aproximadamente 1999 funciona en el lugar el hotel Borinquen Mountain Resort y Spa (hoja Curubandé, 381.516E-310.228N) que cuenta con piscinas termales, baños de barros y sauna natural (Fig. 5.8).



Fig. 5.7: Aprovechamiento artesanal de la naciente termal de Las Lilas en el 2012.



Fig. 5.8: Hornilla muy activa en el hotel Borinquen.

Santa Clara

En la finca Santa Clara (hoja Curubandé, 373.108E-310.707N.) sobre la Quebrada Grande (26 °C), se presenta una fuente termal con salida de gases, temperatura relativamente baja (entre 30 °C y 31 °C, pH entre 6.0 y 7.07) y sin depositación de minerales (Faillace, 1973; Molina y Martí, 2016; presente trabajo).

Quebrada Gata

En las partes altas de la quebrada Gata (hoja Curubandé, 383.572E-311.996N), a unos 6.5 km al WSW del cráter activo del Rincón de la Vieja, se localizó una fuente termal muy caliente (> 45 °C), al parecer asociada con fumarolas y con depósitos amarillentos, justo sobre la quebrada Gata (J. Elizondo, com. escrita, 2020).

Las Hornillas

El sitio Las Hornillas (hoja Curubandé, 385.9E-306.7N) fue mencionado por primera vez por von Seebach (1865). Se caracteriza por fumarolas y fuentes termales (temperaturas entre 60.0 °C y 98.5 °C, pH entre 5.42 y 8.14) de aguas bicarbonatadas, algunas de ellas ácidas (pH entre 2.4 y 2.9) del tipo sulfatado, que han alterado las rocas a esmectita y caolinita (Kempster y Rowe, 2000; Molina, 2000; Molina y Martí, 2016).

Las Pailas (Hornillas)

A unos 2 km al NNE de la hacienda Guachipelín, contiguo al río Colorado, se presentan volcancitos de barro hirvientes que fueron descritos y bautizados en su momento como “Las Hornillas” o simplemente “Hornillas” por el profesor José Fidel Tristán cuando las visitó entre 1903 y 1910 (Fig. 5.9). Sin embargo, Tristán (1921) comenta que a nivel local se conocen a estas manifestaciones fumarólicas, como “las pailas” y “las hornillas”, sin aclarar su posición geográfica o si sus nombres eran intercambiables o sinónimos.

Las Pailas (hoja Curubandé (alrededor de 388.7-390.0E-389.5- 305.1N) están representadas por fumarolas, fuentes termales, volcancitos y piletas de barro (36-100 °C, usualmente entre 70 °C y 96 °C; pH variable entre 1.90 y 3.96; algunas menos ácidas hasta casi neutras con pH entre 5.4 y 7.0). Geoquímicamente, las Pailas, como hoy se le conocen, son del tipo ácidas sulfatadas (Giggenbach y Corrales, 1992; Molina, 2000; Tassi et al., 2005; Phillips-Lander et al., 2014; Molina y Martí, 2016).



Fig. 5.9: a) Batidero de lodo (hornilla), b) pozas termales.

Quebrada Agria

Se localiza en el camino a las Hornillas en un lugar conocido como Poza Verde (770 m s. n. m.), en donde se presentan pocos olores a H₂S y el agua posee una temperatura de 27 °C, mientras que las aguas de las quebradas circundantes están a unos 20 °C (Corrales, 1974).

Río Negro (Quebrada Yugo)

En la quebrada Yugo (hoja Curubandé, 389.095E-302.555N), contiguo a su confluencia con el río Negro, se localizan tres fuentes termales muy cercanas entre sí y con una geoquímica muy similar, que son conocidas como Río Negro, aunque en realidad se ubican en el afluente citado. Sus temperaturas están entre los 54.8 °C y 56.8 °C y pH es variable entre 6.17 y 7.22, aunque una de ellas es ácida (pH 3.29), correspondiendo con fuentes bicarbonatadas con cierto contenido en sulfatos. El hotel Hacienda Guachipelín lleva a los turistas desde el 2003 a unas piscinas construidas para captar las aguas termales en el sector.

En las aguas termales del río Negro (Lescinsky et al., 1987; Barahona et al., 2001), se observó un proceso de fosilización, principalmente de restos vegetales, en el lodo de color naranja intenso que se forma alrededor de las fuentes e incluso un cono de travertino de unos 3 m de altura. Estas hojas fósiles se han encontrado en zonas alteradas dentro del depósito de avalancha de escombros volcánicos (*debris avalanche*) del Rincón de la Vieja y proximidades del río Blanco. En uno de los tajos de extracción (hoja Curubandé, 386.2E-304.2N), se encontró un estrato de aproximadamente 50 cm de espesor con estas hojas, evidencia de la existencia de paleofuentes termales. Una posible interpretación que se le da a este fenómeno es la existencia de un antiguo cauce en donde afloraban las aguas termales de forma similar a lo observado en el río Negro.

Azufrales de la Hacienda Santa María

Las manifestaciones geotermales cercanas la hacienda Santa María fueron descritas desde hace más de un siglo (Dóndoli, 1951; Faillace, 1973; Corrales, 1974). Se trata de varios puntos burbujeantes con salida de gases de H₂S y CO₂, depósitos de azufre y otros minerales en las grietas (temperaturas entre 37.2 °C y 40.2 °C, pH entre 3.66 y 4.81), presentes a lo largo de dos tributarios del río Negro. También las hay de temperaturas más bajas desde ambiente o fuente mineral fría (25 °C, pH 4.5) en la fuente Zopilote (hoja Curubandé, 293.0-305.5N, 860 m s. n. m.) o tibias (temperatura entre 35 y 38 °C, pH 5.4) en la Samper (hoja Curubandé, 391.5E-304.3N, 700 m s. n. m.) o en la fuente Cara Vuelta (hoja Curubandé, 391.6E-304.1N, 720 m s. n. m.). Adicionalmente, a unos 3 km al SW de la hacienda Santa María, en la quebrada Azufrales, presentan una temperatura mayor de 45 °C (Dóndoli, 1951; Corrales, 1974). Son aguas termales del tipo ácido sulfatadas (Molina, 2000).

Fuente Para

Se localiza a 1.5 km al SW de la casa de la hacienda Guachipelín, en el cauce del río Blanco (hoja Curubandé, 386.1E-304.6N). Se presenta como lloraderos a lo largo de unos 80

m en un conglomerado muy cementado. Los brotes poseen una temperatura de 23 °C y pH de 4.5 con precipitaciones de óxidos de hierro debido a sus altos contenidos en las aguas (Faillace, 1973). En la cascada denominada Las Chorreras, las aguas del río Blanco adquieren un color celeste y se vuelven muy transparentes con las rocas teñidas de blanco.

Quebrada Gloria

Fuente termal bicarbonatada alcalinotérrica, localizada al sur del Rincón de la Vieja muy contiguo al borde de la caldera de Guayabo (hoja Curubandé, 396.2E-300.1N), con una temperatura de 30 °C y pH de 4.5 (ICE, 1991).

Quebrada Cerro Grande (Azufrales Hacienda Potrerillo)

En el cauce de la pequeña quebrada Cerro Grande (hoja Murciélagos, 369.3E-313.0N), en medio de un material detrítico meteorizado y de un conglomerado, se presenta un pequeño brote con fuerte olor a H₂S, salida de CO₂, sabor ácido (pH 5.3) y deposición de bióxido de hierro (Faillace, 1973).

Hacienda Potrerillos

Varias fuentes minerales y termales con temperaturas entre 29 °C y 37 °C y pH entre 4.75 y 5.21 se localizan en los terrenos de dicha hacienda (hoja Ahogados, 367.9E-311.15E; 368.45E-312.3N; 368.1E-312.15N); son aguas sulfatadas o ligeramente cloruro-sulfatadas, algunas muy ricas en boro (concentración de 729-741 mg/L).

Río Azufrado (Río Azufrales de la Finca Mogote)

Consisten en una serie de fuentes localizadas en una extensa área. Una de ellas está localizada a unos 2.6 km al este de la entrada de la carretera hacia Quebrada Grande, antes del puente sobre el río Tempisque (hoja Ahogados, 370.4E-312.1N y 370.428E-311.733N). Brota del río Azufrado (Potrerillos) de una lava andesítica fallada con desprendimiento de gases (H₂S, CO₂), una temperatura de 38 °C, pH entre 4.92 y 5.20 y depósitos de azufre y otros minerales blancuzcos. A inicios de los setenta del siglo pasado, estas fuentes eran visitadas por sus presuntas cualidades curativas de la piel (Faillace, 1973). Otra fuente similar (hoja Ahogados, 370.004E-309.818N) se ubica en el mismo río, brota al parecer de una brecha de falla con 39.3 °C, pH 7.14 y salida de CO₂, depósitos de hidróxidos de hierro, en lo que se conocía como finca El Quebracho. Consiste en agua bicarbonatada, algo cloruro-sulfatada (Faillace, 1973; presente trabajo). También se tiene la fuente hacienda Mogote (hoja Ahogados, 370.0E-312.0N), que son fuentes cloruro-sulfatadas bóricas (concentración de B: 5.02 mg/L a 6.37 mg/L) con una temperatura de 34.0 °C a 36.0 °C, pH 5.36 y 5.43 (ICE, 1991).

Fuente Vado la Esperanza y Sitio La Dama

Fuente localizada contiguo a la carretera que se dirige del río Tempisque al Vado la Esperanza (hoja Ahogados, 366.5E-307.8N) y Sitio La Dama (hoja Ahogados, 365.7E-

308.0N). En la Esperanza, la fuente se presenta en un playón de arenas y gravas, con afloramientos de tobas desde donde brotan los manantiales que, durante la estación lluviosa, quedan cubiertos por el río (Faillace, 1973). Su temperatura es de entre 40.5 °C y 44.0°C y el pH entre 5.88 y 5.91. Son fuentes altamente bicarbonatadas y bóricas: 667.0-888.0 y 4.56-28.30 mg/L, respectivamente (ICE, 1991). Muchas veces las fuentes no se visualizan por el cubrimiento de los sedimentos del río.

5.3 Volcán Rincón de la Vieja, sector Caribe

En el flanco caribeño del volcán Rincón de la Vieja, se presentan varias nacientes termales e incluso varios ríos que nacen en el volcán poseen aguas cristalinas teñidas de colores blancuzcos, azulados a celestes con los diferentes tipos de coloides y sedimentos que suelen transportar, entre ellos los ríos Blanco, Azul y Pénjamo (Fig. 5.10).

Las aguas minerotermales que afloran en esta vertiente poseen temperaturas entre 26 °C y 68°C y pH entre 3.23 y 7.75, aunque por lo general rondan entre 35 °C y 48 °C y pH relativamente ácidos de 4.15 y 6.21; son principalmente aguas sulfatadas a cloruro-sulfatadas, algunas ligeramente carbonatadas.

Las nacientes evaluadas son aguas geotérmicas inmaduras, pero las del manantial El Gavilán son un poco más maduras (Fig. 5.11). En el diagrama triangular Na-K-Mg, se observa que las aguas del manantial El Gavilán están relacionadas a una fuente calor de menor temperatura (210 °C), mientras que el resto las fuentes están asociadas a una fuente de calor de 290 °C, aproximadamente (Fig. 5.11).



Fig.5.10: Río Pénjamo y al fondo el volcán Rincón de la Vieja.

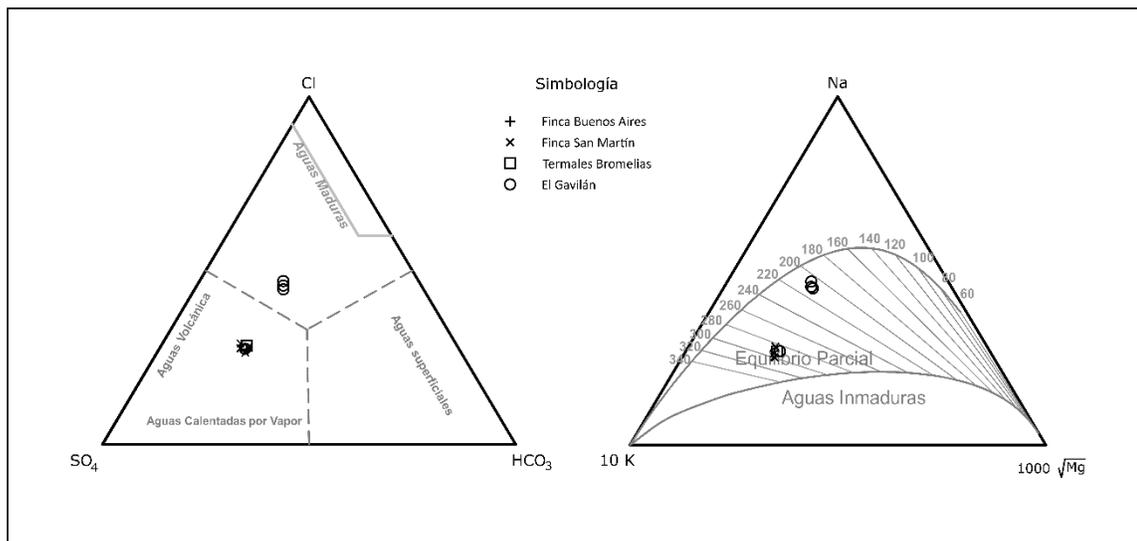


Fig. 5.11: Diagrama ternario de clasificación de las aguas termales del Rincón de la Vieja en su flanco caribeño.

Quebrada La Fé

En la Finca Santa Fé ([sic]; así aparece tildado en la hoja topográfica del Instituto Geográfico Nacional), en el flanco NW del Rincón de la Vieja, contigua a la confluencia de las quebradas La Fé y Campos Azules, se presenta una pequeña naciente termal (hoja Cacao, 381.106E-314.310N) con un pH de 6.21 y una temperatura de 45 °C (presente trabajo).

Quebrada Azufrosa (Aguas Tibias, Santuarium)

Consisten en pequeñas fuentes calientes, localizadas al norte del cráter activo del Rincón de la Vieja. Kempter y Rowe (2000) las refieren con respecto a la quebrada Azufrosa, mientras que al parecer Tassi et al. (2005) bautizan las mismas manifestaciones termales como Aguas Tibias. Su temperatura varía entre 26.0 °C y 37.7 °C para un pH de entre 3.51 y 4.15; se clasifican como aguas cloruro-sulfatadas y al parecer son el producto de la mezcla de aguas superficiales con las aguas de infiltración procedentes del lago cratérico del volcán (Kempter y Rowe, 2000; Tassi et al., 2005). Una de ellas debe de corresponder con la fuente minerotermal llamada Santuarium (hoja Cacao, 391.376E-316.126N) con una temperatura entre 30.3 °C y 32.3 °C y un pH entre 3.23 y 3.78 (Sáenz, 2020).

El Gavilán (Volcancito, Finca San Martín, Blue River)

A unos 25 km de Quebrada Grande de Liberia, atravesando la cordillera de Guanacaste, se encuentran aproximadamente 12 nacientes termales en un terreno pantanoso, de las cuales se utilizan 4 para fines turísticos en el Blue River Resort Hot Springs y Spa (Fig. 5.12). Las manifestaciones termales se ubican cerca del límite del parque nacional Rincón de la Vieja, en el Gavilán de Dos Ríos de Upala (hoja Cacao, entre 391.205E-

391.860N y 391.008E-320.038N; una de ellas se le llama Blue River: 391.019E-320.047N), a unos 7 km al norte del cráter activo del Rincón de la Vieja, justo al contacto con la llanura aluvial, en donde emergen como un conjunto de fuentes termales (temperaturas entre 48 °C y 68 °C, pH entre 5.64 y 6.60). Geoquímicamente, se clasifican como aguas mezcladas, algo cloruradas, con ciertos contenidos de bicarbonato y sulfatos enriquecidas en Na, K, Ca, Mg como cationes predominantes. Presenta depositaciones de travertinos (carbonatos, sales y sulfatos) blanquecinos hasta ocre y en menor grado sílice coloidal (ICE, 1991; Molina y Martí, 2016; presente trabajo).

Una de ellas es llamada Bromelia (hoja Cacao, 391.861E-316.680N) con una temperatura de 35.2 °C (hoja Cacao, 391.229E-316.112N), que son ácidas con depósitos de sínter silíceo, descritas por Kempter y Rowe (2000). Ya habían sido estudiadas en parte por otros autores (ICE, 1991; Tassi et al., 2005), quienes concluyen que son representativas de la evacuación del campo geotermal interno del complejo volcánico Rincón de la Vieja.

Algunas de estas aguas son represadas y aprovechadas con fines artesanales para el disfrute de las personas, como las pozas termales de Mapache (hoja Cacao, 391.421 E-316.089N).

Finca Buenos Aires

Contigua a la fuente El Gavilán (hoja Cacao, 396.3E-321.35N), se localiza otra fuente termal con temperatura y características geoquímicas muy similares a la fuente El Gavilán, aunque más alcalina: 61 °C y pH 7.75, respectivamente (ICE, 1991).



Fig. 5.12: Fuentes termales El Gavilán.

6. PELIGRO VOLCÁNICO

Las erupciones volcánicas varían ampliamente en tipo, magnitud y duración, en un mismo volcán, durante períodos breves o largos. La frecuencia de las erupciones también varía desde una actividad eruptiva periódica por decenas de años e incluso miles de años, aunque con picos en erupciones importantes (como el caso de los volcanes Poás y Rincón de la Vieja), hasta volcanes con varias décadas de dormir (caso del Irazú). Los vulcanólogos han tomado conciencia de que es prácticamente imposible disponer de un calendario con todas las erupciones de un volcán, además, esto requeriría de investigaciones onerosamente prohibitivas para la mayoría de los países. No obstante, debe al menos intentar la identificación de los períodos de actividad que pueden asociarse con ciclos evolutivos del volcán, base para elaborar mapas y modelos para la prevención y gestión del riesgo volcánico (Crandell et al., 1984; Ortiz, 1996). De hecho, cuando pueden caracterizarse estos ciclos, especialmente el último de los acaecidos, entonces se está en las mejores condiciones para elaborar modelos realmente útiles para la reducción - mitigación del riesgo asociado a eventos volcánicos. En este sentido, valiosos intentos se realizaron incluidos en los cuadros cronoestratigráficos presentes en el subcapítulo 3.1.3 y en el capítulo 4.

El carácter de la actividad volcánica determina el tipo de morfología resultante, así como el grado y el alcance del peligro asociado. Al conocer una determinada geoforma (por ejemplo, la morfología de un cono o de una colada), se puede interpretar qué tipo de actividad le dio origen, así como su grado de desarrollo espacial y temporal relativo. Por su parte, si se estudian con detalle los depósitos volcánicos, en particular los productos de explosiones, se puede conocer no solo el tipo y el carácter de la erupción, sino también su evolución y extensión, así como su volumen, energía y edad.

Un portafolio o un compendio de mapas de peligros o de amenazas volcánicas debe permitir que se identifiquen las áreas expuestas al efecto directo e indirecto de las erupciones volcánicas, donde se distinguen cada uno de los escenarios más probables de los procesos volcánicos posibles, expresados en el grado de probabilidad de ocurrencia en un lugar concreto, en un determinado intervalo de tiempo, de acuerdo con diferentes escenarios de magnitud. Mediante los estudios se debe de identificar los peligros, evaluar la percepción del fenómeno, su riesgo simplificado, valoración económica, eventual control y reducción de la vulnerabilidad. Para ello, se deben de considerar el estado del volcán, su historia geológica, período de recurrencia y los mecanismos eruptivos, así como tomar en cuenta las personas involucradas y las actividades socioeconómicas, la localización de las estructuras y sus vulnerabilidades, entre otros factores (Ortiz, 1996).

Se dice que para un volcán poligenético (como el Rincón de la Vieja), el conocimiento de la historia eruptiva, idealmente en los últimos 40 000 años, corresponde con el lapso de mayor interés para determinar las fases de los ciclos eruptivos (Araña y Ortiz, 1984), con particular énfasis en los últimos 5000 años, aunque lo ideal sería abarcar tanto tiempo y detalle como sea posible en el detalle (Crandell et al., 1984; Araña y Ortiz, 1984; Yokoyama et al., 1984).

Pese a que el concepto de volcán activo, dormido y extinto varía de región en región y de escuela científica, se ha establecido arbitrariamente y bajo cierto consenso, que se va a denominar volcán activo (dormido o vivo) aquel que ha presentado una actividad eruptiva en los últimos 10 000 años (Szakács, 1994), justo aquellos que presentan una base moderada de información cronológica de sus erupciones, basado principalmente en las dataciones de radiocarbono, arqueología e historia (Siebert et al. 2010). Por lo anterior, la mayoría de los estudios de peligro volcánico a nivel internacional y nacional, se restringen particularmente a los eventos que han ocurrido en el Holoceno (época geológica que inició hace 11 700 años), particularmente en los últimos pocos miles de años y, en el caso de disponerse, que su historial sea complementado con eventos históricos.

Así, al planear los mapas de peligrosidad volcánica debe empezarse por definir cuál es el intervalo de tiempo considerado y al ente enfocado. En el caso del Rincón de la Vieja, se va a adoptar como base para la amenaza volcánica los últimos 5 000 años, es decir haciendo énfasis en el Holoceno Medio y Superior, complementado y reforzado con los estudios desprendidos de la actividad histórica (1765 al 2022). En el caso de riesgo volcánico, no existe un criterio definido de su lapso de escogencia, adoptándose generalmente de 60 años (Araña y Ortiz, 1993), aunque ello no implica el poder pensar a largo plazo, dado que, un volcán activo o dormido, tiene el potencial de volver a activarse tarde o temprano, por lo que es mejor no fomentar el desarrollo de mucha infraestructura en un radio de al menos unos 5 km a 10 km, en particular en dirección de los vientos predominantes o en sectores cercanos a cauces o laderas inestables, o de altas pendientes, susceptibles de ser medios de transporte de lahares y flujos piroclásticos.

6.1 RECUENTO DE LOS ESTUDIOS DE PELIGRO VOLCÁNICO PREVIOS

Tal y como se dijo varias páginas atrás, los primeros estudios del Rincón de la Vieja sobre los peligros volcánicos fueron realizados Benner (1987) que, aunque poco conocido, realizó un mapeo geológico que le permitió caracterizar la historia eruptiva, categorizar la petrografía básica de las unidades que conforman el edificio volcánico y evaluar por primera vez las amenazas potenciales para futuras erupciones, considerando lahares, coladas de lava y caída de tefra. Este estudio excluyó la evaluación de amenazas a largo plazo.

Otros estudios fueron más localizados o focalizados a problemáticas específicas como aspectos de la peligrosidad de los lahares o de las tefras, que, aunque valiosos, no corresponden con verdaderos estudios de amenaza volcánica (Fernández et al., 1991; Boudon et al., 1996).

Puesto que es el único volcán con erupciones históricas de la cordillera de Guanacaste, un estudio más completo de los peligros y estimación del riesgo del Rincón de la Vieja fue realizado en 1996 por la UCR, junto con el informe explicativo (mapa escala 1: 50 000), pero desgraciadamente no fue publicado (Paniagua et al., 1996). Concluye que la zona N del volcán es la que presenta una amenaza y vulnerabilidad mayor, aunque el riesgo mayor por eventuales pérdidas económicas se presenta en el sector occidental (un estimado

en 1996 de 448.4 millones de colones). En ese momento, en la zona N estaban bajo peligro un total de 750 personas en forma directa y unas 2000 de manera indirecta. Concluyen, además, que el flanco S presenta la menor amenaza y riesgo (un estimado de 165.5 millones de colones de la época). Adicionalmente, ellos hicieron una serie de recomendaciones sobre las acciones a tomar antes y durante una erupción volcánica. Sin duda un estudio muy completo para la época.

La parte más valiosa del trabajo publicado por Paniagua y colaboradores es el texto del documento, el cual presenta una descripción y análisis de las principales amenazas asociadas al volcán, así como una evaluación, en un contexto posterior a las importantes erupciones de 1995, a raíz de las cuales se generaron lahares que destruyeron dos puentes, dejando incomunicadas a las comunidades de Buenos Aires y Gavilán de Upala (Fig. 6.1).

En ese mismo año se publicó un estudio adicional sobre el peligro volcánico, basado en una tesis de doctorado. Resalta el levantamiento del mapa de distribución de la erupción pliniana más grande y reciente del Rincón de la Vieja (mapa de espesores o isopacas) y de la peligrosidad que representan las coladas de lava, lahares, corrientes de densidad piroclástica concentrada, así como el eventual colapso parcial del edificio volcánico y del lago cratérico. Igualmente, los investigadores recalcan que el mayor peligro está en el flanco N del volcán (Kempton et al., 1996; Kempton, 1997; Kempton y Rowe, 2000). Cuando estudiaron la geología del flanco SW del macizo y determinaron, a través de estudios de tamaño de grano del depósito de tefra Río Blanco, que la erupción tuvo una columna eruptiva de al menos 16 km de altura. Además, realizaron una evaluación cualitativa de riesgos, concluyendo que las futuras erupciones de este volcán serían propensas a mantener el estilo explosivo, extendiendo la zona de mayor peligro varios kilómetros al norte del cráter activo (Fig. 6.2).

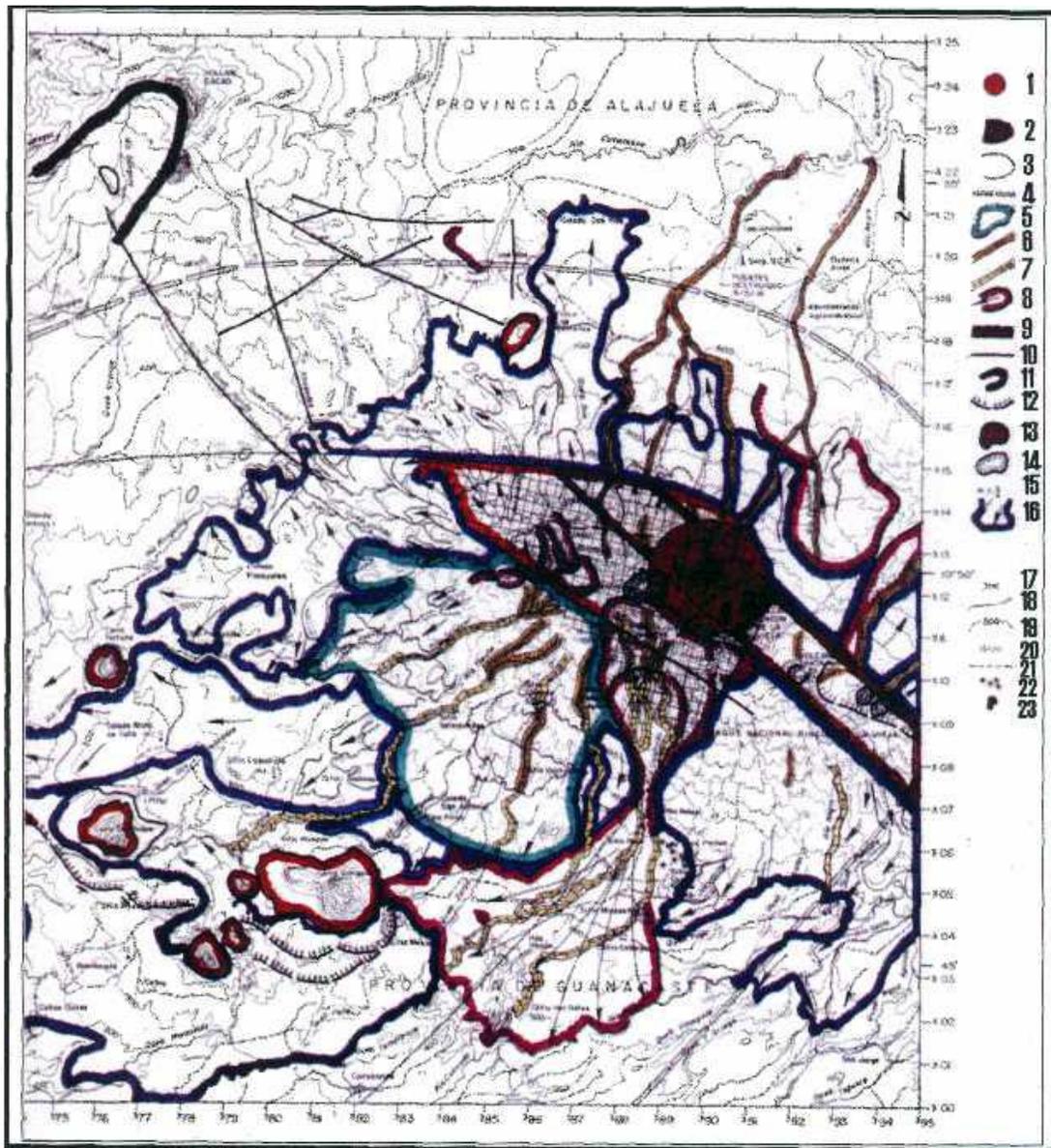


Fig. 6.1: Mapa de peligros volcánicos potenciales de Paniagua et al. (1996). Los detalles del mapa no se distinguen; tan solo se incluyó a modo ilustrativo e histórico.

Dichos trabajos constituyen un insumo importante pues reúnen detalles del registro geológico correspondiente a las erupciones más importantes del macizo. El mapa publicado en 1996, según la clasificación de Calder et al. (2015), sería basado en el registro geológico y de tipo semicualitativo, ya que contempla zonas de alta y moderada amenaza, pero lo hace únicamente para el escenario de las erupciones plinianas. Por su parte, el documento correspondiente al año 2000, corresponde con un mapa de tipo cualitativo, que presenta zonas con amenaza moderada a alta por ocurrencia de avalanchas de detritos y lahares, para el flanco norte del volcán. Los datos que sustentan el producto publicado por este autor son también basados en el registro geológico.

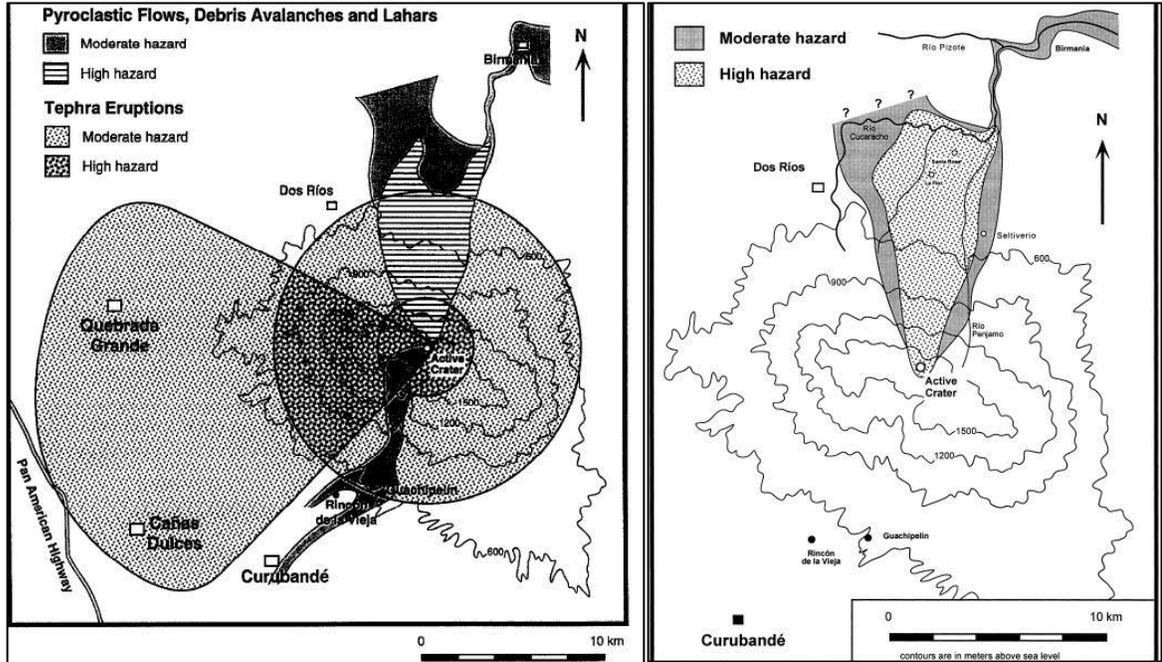


Fig. 6.2: Mapas publicados por Kempton (1996), izquierda; Kempton y Rowe (2000), derecha.

Aguilar y Alvarado (2014) y Abarca y Alvarado (2017) llevaron a cabo un estudio sobre las pérdidas económicas asociadas con erupciones volcánicas en Costa Rica entre 1953 y 2005, determinando que las erupciones presentadas por el Rincón de la Vieja, durante las décadas de los sesenta y noventa del siglo pasado, ocasionaron pérdidas al sector agrícola y ganadero, así como daños a la infraestructura vial (puentes), particularmente a raíz de la caída de ceniza, lluvia ácida y lahars.

En cuanto a los mapas publicados por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), se debe aclarar primero que estos no solo contemplan amenazas de tipo volcánico donde han tomado como insumo la información existente al momento de su elaboración, es decir, los documentos mencionados supra. Por su origen y función, estos mapas deberían, idealmente, tener un despliegue de información de tipo administrativo (ver Calder et al., 2015); sin embargo, no es el caso, tendiendo a ser más un documento basado en el registro geológico. Debido a su escala, no se agregan ilustraciones de estos mapas, pero los mismos pueden ser consultados directamente en la página web de la CNE.

El ICE, por su parte, ha realizado estudios sobre la evaluación del peligro volcánico enfocado a los proyectos geotérmico Las Pailas (Soto et al., 2003a) y Borinquen (Soto, 2013; Alvarado et al., 2018) o las líneas de transmisión eléctrica y subestaciones cercanas (Vargas y Alvarado, 2017). Incluyen mapas geológicos, estudios de tefroestratigrafía, dataciones de ^{14}C y nueva información sobre las erupciones recientes, incluyendo un detalle de los lahars asociados. Los mapas de peligro volcánico del 2003 y del 2013 están en escalas $\sim 1:120\,000$

y 1:200 000, respectivamente (Fig. 6.3). Los estudios concluyen que los proyectos y obras geotérmicos así como las líneas de transmisión energética principales se encuentran fuera del área de peligro volcánico relevante ante las amenazas más probables (Soto et al., 2003a; Soto, 2013; Alvarado et al., 2018; Vargas y Alvarado, 2017), aspecto soportado por los estudios previos de la UCR (Paniagua et al., 1996) y la Universidad Texas (Kempter et al., 1996), estos últimos realizados mucho antes de que comenzaran las investigaciones geotérmicas de detalle en el Rincón de la Vieja (Fig. 6.4)..

Como aspecto logístico importante en cuanto a la necesidad de que la información para la Gestión del Riesgo sea oportuna, se debe señalar que varios de los informes del ICE, al ser documentos internos del ICE, no se encuentran disponibles en diversas bibliotecas consultadas (Escuela Centroamericana de Geología, Biblioteca Nacional ni CNE) y, aunque puede ser accesible mediante solicitud expresa a alguno de los autores, es claro que no está disponible para la población de forma oportuna.

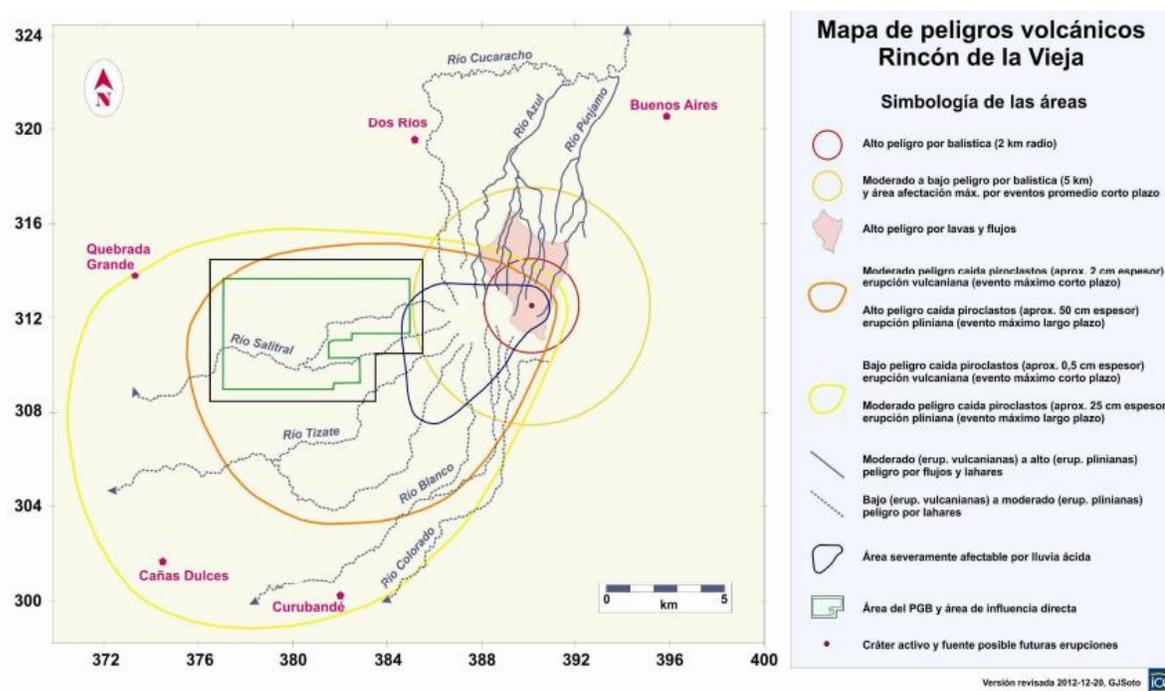


Fig. 6.3: Ejemplo del mapa de peligros volcánicos enfocado al proyecto Borinquen (Soto, 2013), el cual corresponde con una modificación del trabajo Soto et al. (2003a), posteriormente reproducido por Soto y Martínez (2016).

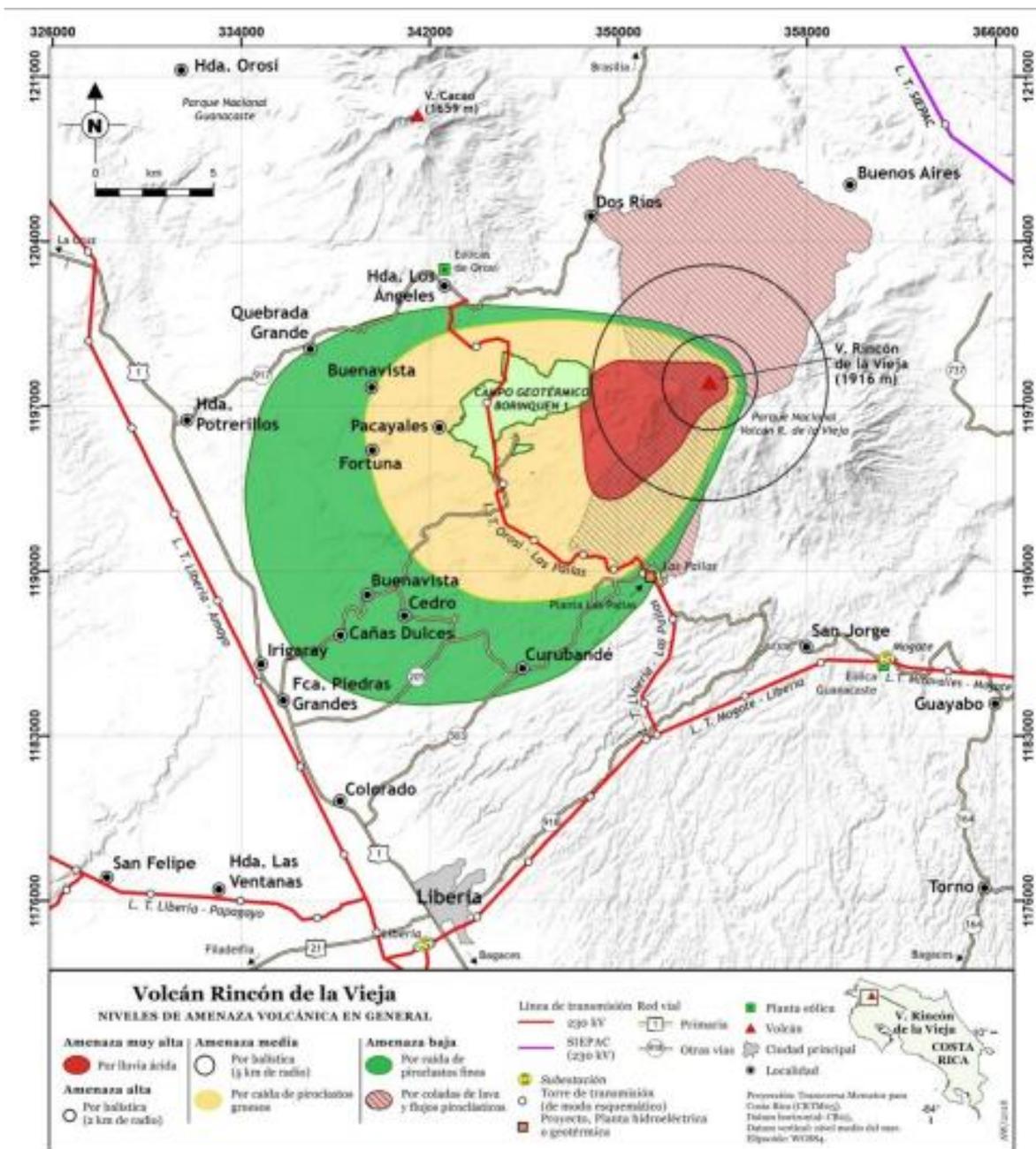


Fig. 6.4: Mapa de niveles de Amenaza Volcánica de manera General enfocado al P.G. Borinquen (Alvarado et al., 2018).

Alpízar (2018) realiza un nuevo estudio sobre la peligrosidad volcánica del Rincón de la Vieja en su tesis de maestría de la UCR, donde realiza modelados más detallados de dispersión de cenizas, flujos piroclásticos y de lahares, lo cual es una notable mejora con respecto a los trabajos anteriores, además de incluir encuestas y análisis sobre la percepción del riesgo (Fig. 6.5). Incluyó, además, modelos sobre la trayectoria y extensión de los eventuales lahares que podrían bajar por las laderas del Rincón de la Vieja, utilizando LaharZ. Parte de estos resultados se publicaron un año después (Alpízar et al., 2019).

El trabajo de Vargas y Alvarado (2017), por su parte, está direccionado más a las líneas de transmisión y subestaciones eléctricas.

En el presente trabajo se elaboraron nuevos modelos. Se presentan los primeros modelos computacionales por distribución máxima de corrientes de densidad piroclástica (Alvarado et al., 2018; Alpízar, 2018). En cuanto a estos documentos se debe destacar que aportan mapas sencillos e integrales, los cuales, según ha arrojado la investigación, son los más conocido por la población en general.

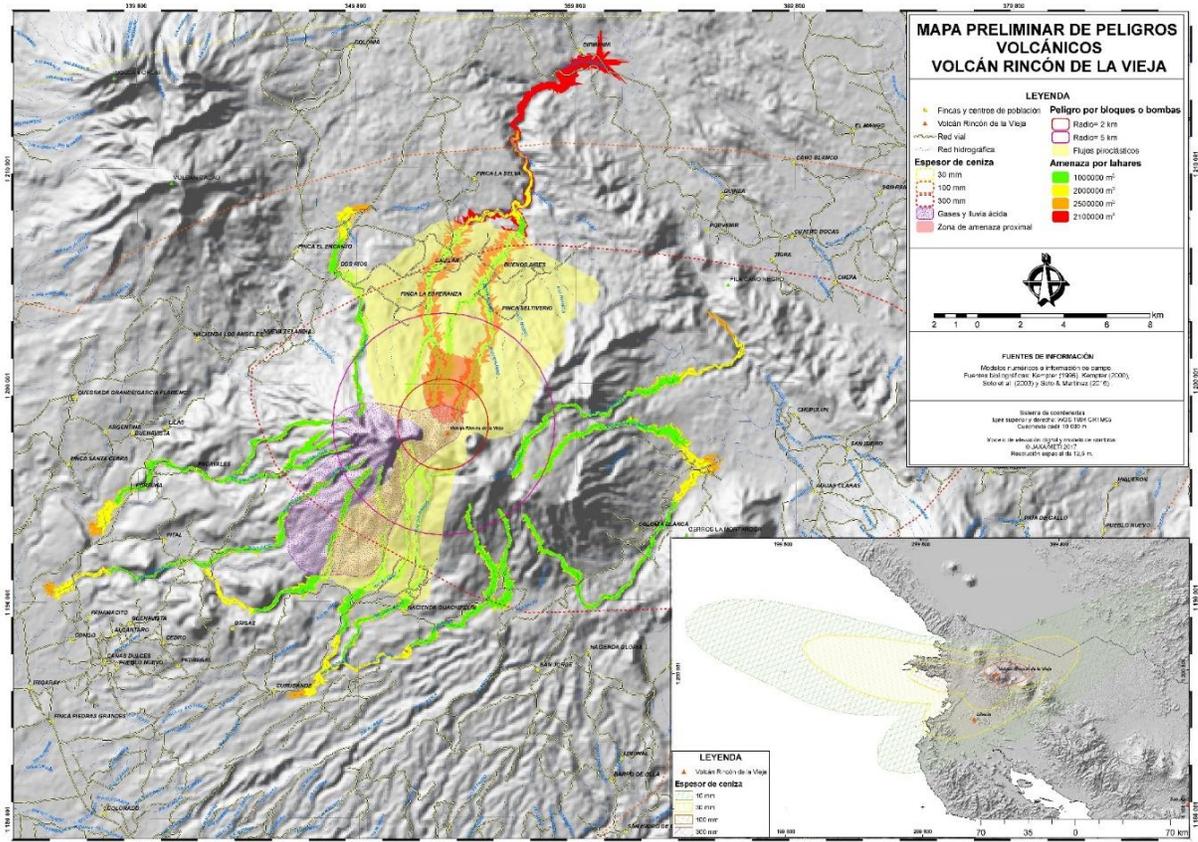


Fig. 6.5: Mapa de peligros volcánicos para el Rincón de la Vieja (Alpízar, 2018).

En total, se contabilizan 13 estudios de peligro volcánico del Rincón de la Vieja desde 1987 hasta inicios del 2020 con diferentes grados de detalle y enfoques (Cuadro 1.1, incluido al inicio). La mayoría de estos están basados principalmente en el registro geológico e histórico, pero con pocas fechas de radiocarbono. El presente trabajo complementa nuevas dataciones de radiocarbono, que se agregan a las previas (Alvarado et al., 2018; Aguilar y Alvarado, 2020).

Pero los estudios de peligro o amenaza volcánica realizados en Costa Rica previos al 2017, en su mayoría poseen un concepto “diferente” de peligrosidad al empleado al empleado acá, basado en su definición. En dichos estudios se hablaba de una peligrosidad alta o elevada, teniendo en cuenta que, si llegara a ocurrir, claramente su peligro iba a ser elevado,

medio o bajo en función de grado de actividad (tasa efusiva, volumen emitido, dirección). No obstante, muchos de estos procesos volcánicos poseen cientos o miles de años de no presentarse y, por ende, una probabilidad baja de ocurrir dado su período de recurrencia muy elevado. Por ejemplo, se potenciaban todos los cauces de los ríos con el mismo grado de peligrosidad, lo cual presentaba una zonificación en función de su volumen y alcance, pero no en su probabilidad de ocurrencia, o bien, se hablaba de un peligro elevado, medio y bajo para coladas de lava que tienen decenas de miles de años de no ocurrir en un volcán en particular. También, se incluían a conos secundarios con una peligrosidad elevada, aunque su última actividad fuese hace varias decenas de miles de años. Es decir, no se tomaba o evaluaba el registro geológico y su recurrencia, que, aunque incompleto, podía ayudar a estimar un poco mejor la peligrosidad. Lo anterior trae a la luz la definición de peligrosidad y lo que ello implica, que, aunque la mayoría la conoce, posee un elemento que no se toma adecuadamente en cuenta, el cual es justamente la posibilidad o probabilidad de ocurrencia en un plazo determinado.

Cuadro 6.1: Mapas de amenaza para el volcán Rincón de la Vieja.

TITULO	DETALLE DEL DOCUMENTO	REFERENCIA
Stratigraphy and volcanic hazard of Volcano Rincón de la Vieja, a preliminary report.	Incluye un mapeo geológico que caracterizó la historia eruptiva y evalúa por primera vez las amenazas potenciales para futuras erupciones, considerando lahares, coladas de lava y caída de tefra. Este estudio excluyó la evaluación de amenazas a largo plazo.	Benner (1987)
Mapa de reconocimiento de los peligros volcánicos potenciales del volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica.	Informe explicativo (mapa escala 1: 50 000). La calidad del mapa original es buena y es un informe detallado que cuantifica las posibles pérdidas. Concluye que la zona N del volcán es la que presenta una amenaza y vulnerabilidad mayor, aunque el peligro mayor por eventuales pérdidas económicas se presenta en el sector occidental.	Paniagua et al. (1986)
Mapa de amenaza volcánica para futuras erupciones en el volcán Rincón de la Vieja.	Incluye lahares, flujos piroclásticos, avalanchas. Alta y moderada amenaza durante erupciones plinianas, caída de piroclastos y ceniza. Sin referencia geográfica. Basado en registro geológico y semi cualitativo.	Kempter (1996)
Mapa de amenazas cualitativo mostrando zonas de moderado-alto peligro para avalanchas de escombros volcánicos y lahares originados desde el cráter activo.	Muestra amenaza moderada a alta por ocurrencia de avalanchas de detritos y lahares, enfatizando en el flanco norte. Sin referencia geográfica.	Kempter y Rowe (2000)
Mapa de amenazas naturales potenciales, Cantones Liberia y Upala	Mapas generales que contemplan la mayoría de las amenazas volcánicas para el cantón de Liberia, pero no cuenta con texto explicativo, conflicto de escalas, no contemplan escenarios.	CNE (2003a; 2003b).
Evaluación del peligro volcánico que representa el volcán Rincón de la Vieja para el Proyecto Geotérmico Las Pailas y Borinquen, en el pie pacífico del Rincón de la Vieja.	Informe interno del Instituto Costarricense de Electricidad. Incluyen nuevas edades de radiocarbono.	Soto et al. (2003a), Soto (2013); Alvarado et al. (2018)
Mapa de peligros volcánicos Rincón de la Vieja, publicado en <i>Volcano hazard zones of Rincón de la Vieja volcano</i> (Costa Rica).	Incluye proyectiles balísticos, coladas de lava, lahares, piroclastos y lluvia ácida. Versión más reciente del mapa presentada en el tercer taller internacional de Buenas Prácticas de Observatorios Volcánicos sobre evaluación de riesgos volcánicos a largo plazo (VOPB3).	Soto, y Martínez (2016)
Amenaza volcánica sobre las líneas de transmisión y subestaciones eléctricas del ICE, Costa Rica.	Informe de peligrosidad enfocado a las líneas de transmisión eléctrica y subestaciones cercanas.	Vargas y Alvarado (2017)
Mapa preliminar de peligros volcánicos para el volcán Rincón de la Vieja Costa Rica: descripción de un escenario de afectación por lahares. / Hazard map of Rincón de la Vieja Volcano, Costa Rica: qualitative integration of computer simulations and geological data.	Realiza un nuevo estudio sobre la peligrosidad volcánica del Rincón de la Vieja. Allí realiza modelados más detallados de dispersión de cenizas, flujos piroclásticos y de lahares, lo cual es una notable mejora con respecto a los trabajos anteriores, además de incluir encuestas y análisis sobre la percepción del riesgo.	Alpízar (2018) y Alpízar et al. (2019)

6.2 BASES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD

Según la Ley N.º 8488 de Costa Rica, se entiende por amenaza como “el peligro latente representado por la posible ocurrencia de un fenómeno peligroso, de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, capaz de producir efectos adversos en las personas, los bienes, los servicios públicos y el ambiente”. De manera alterna, la amenaza se puede definir como un acontecimiento, suceso o circunstancia física, proceso natural o actividad humana que, en el caso de haber alcanzado o superado una intensidad específica, puede explicar la pérdida de vida humana, heridas o daños a los bienes sociales, económicos o ambientales (Saborío et al., 2014).

Así pues, se puede definir **amenaza** o **peligro volcánico** como la probabilidad que los elementos humanos expuestos en un área determinada (infraestructura, cultivos o vidas humanas), en un intervalo dado, sean afectados por procesos o productos volcánicos, potencialmente lesivos o dañadores*, de una determinada magnitud, alcance y distribución. Dicho con otras palabras, la amenaza está definida por la intensidad **I**, muy relacionada con la magnitud (volumen, duración, alcance, velocidad, etcétera), en función directa de la probabilidad **P** de ocurrencia (probabilidad de aparición) que un determinado tipo de proceso eruptivo con un alcance y distribución determinado, en un intervalo dado y en un área determinada. Por lo anterior, se recalca, que se debe expresar como la *probabilidad de que ocurra un evento particular en un determinado período de tiempo* y, por lo tanto, debe de cuantificarse en la medida posible de modo numérico (Tilling, 1989; Ortiz, 1996; Saborío et al., 2014).

Con base en lo anterior, se propone las escalas de probabilidad de frecuencia de ocurrencia para definir los niveles de amenaza con base en el conocimiento de un reducido número de datos de erupciones históricas y prehistóricas. Basado en lo descrito anteriormente, se puede establecer una matriz de la **Probabilidad x Intensidad** versus la **Frecuencia**, donde se evalúen los rangos o niveles para los mapas de amenazas que se presentarán a continuación (Cuadros 6.1, 6.2 y 6.3). Para su elaboración se tomó como base una serie de documentos y experiencias (Tilling, 1989; Crandell et al., 1984; Ortiz, 1996; PROYECTO MET-ALARN, 2005; MIAVITA, 2012, Alvarado et al., 2014, entre muchos otros). En particular, se tomó parte de las recomendaciones del documento titulado “Las recomendaciones Técnicas para la Elaboración de Mapas de Amenaza por Erupciones Volcánicas” realizado por PROYECTO MET-ALARN (2005), elaborado en colaboración conjunta MET-ALARN-INETER-COSUDE, que se complementó ampliamente por el trabajo de MIAVITA (2012).

El presente documento se adaptó completamente al contexto de peligrosidad del vulcanismo costarricense y se enriqueció con gran cantidad de referencias y ejemplos.

*Se suele utilizar dañino en el lenguaje e incluso literatura, aunque el RAE indica que se debe de aplicar a los animales que causan daño o hacen perjuicio. Dañador es que daña.

En este trabajo se incluyen tanto algunos mapas de la literatura, valiosos por su grado de detalle, como aquellos nuevos realizados en el presente estudio, calibrados con base en información reciente y se toma en cuenta la matriz previamente mencionada. Se espera que dichos mapas sean utilizados en los procesos de planificación y gestión territorial, por lo que estos deben representar el uso que se le puede dar y los daños potenciales a que estaría expuesta una determinada zona, aspecto que se desarrollará en la discusión.

A continuación, se describirá brevemente los principales tipos de actividad volcánica, en el entendido que un volcán puede presentar distintos estilos eruptivos durante su historia, aún en un mismo período eruptivo. También se hará una síntesis de la actividad eruptiva del volcán Rincón de la Vieja.

Dado que, la mayoría de los lectores no suelen estar familiarizados con la terminología y metodología sobre estudios geovulcanológicos y de riesgo volcánico, en cada apartado se dará una serie de antecedentes y definiciones relacionadas, ejemplificadas con casos relacionados con el área de estudio, con el fin de crear una mejor comprensión del tema (Fig. 6.6).

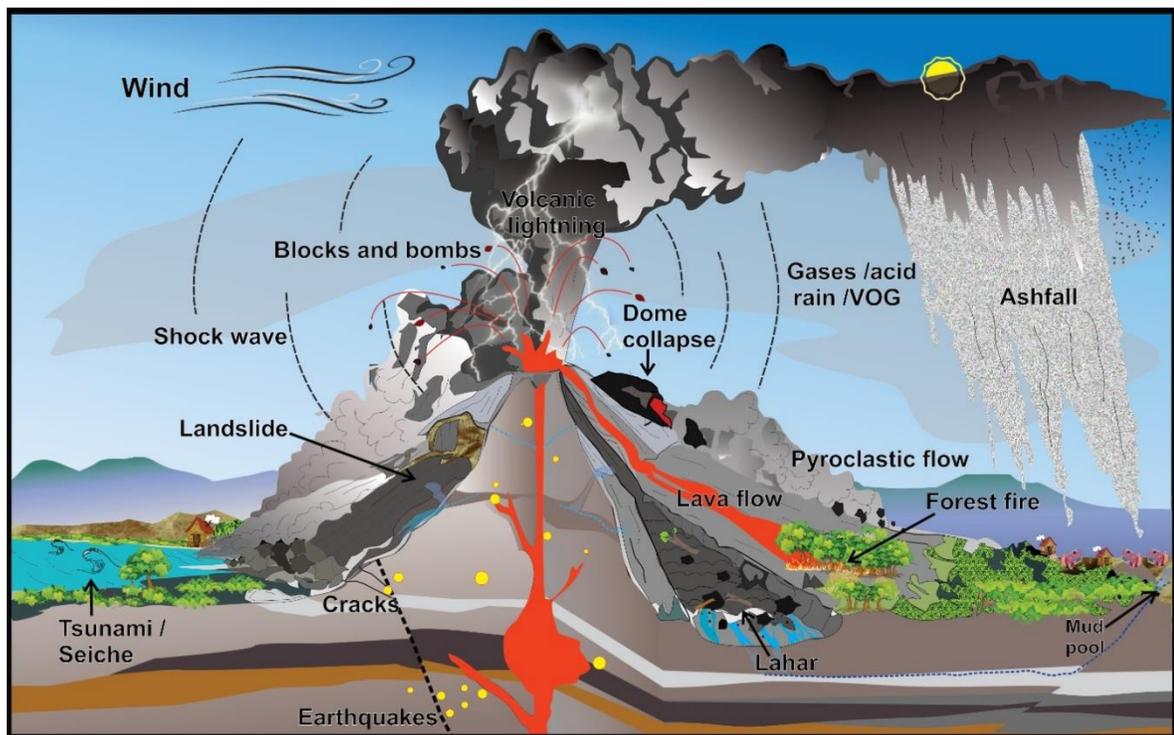


Fig. 6.6: Los principales tipos de peligros volcánicos en un volcán en general.

En las páginas siguientes se detallarán los tipos de peligros volcánicos (directos e indirectos) asociados con el Rincón de la Vieja, que de forma sinóptica se resumen en los Cuadros 6.1-6.3, matriz que ha sido utilizada para ponderar la peligrosidad.

Cuadro 6.1: Determinación de la frecuencia (F) eruptiva y su período de retorno (Pr) para definir los niveles de amenaza.

Período	Frecuencia	F	Pr	Ejemplos	VEI
Milenario	Muy baja	F ₀	5000-10 000 años	Grandes colapsos sectoriales	0
Milenario	Muy baja	F ₁	1000-5000 años	Subplinianas; ultravulcanianas violentas (Tenorio, Chato, Platanar, Poás, Hule, Barva)	4-5
Milenario	Baja	F ₂	500-1000 años	Subplinianas y formación de nuevos conos	3-4
Centenario	Moderada	F ₃	100-500	Vulcanianas y estrombolianas violentas (1723, 1962-1965)	2-3
Anual y Decadal	Muy alta	F ₄	10-50 años	Erupciones entre 1917 y 1940	0-2
Anual a Decenal	Muy alta (actividad cuasipermanente)	F ₅	1-10 años	Deslizamientos flanco N y lahares flanco S	0

Cuadro 6.2: Matriz de determinación de la peligrosidad volcánica.

Frecuencia	F0 Muy baja		AMB		AMB	AMB
	F1 Muy Baja					AB
	F2 Baja		AB		AM	
	F3 Moderada			AM		
	F4 Alta					
	F5 Muy alta				AA	AE
	I1 Muy baja	I2 Baja	I3 Moderada	I4 Alta	I5 Muy alta	
	Intensidad					

Amenaza extrema	AE
Amenaza alta	AA
Amenaza media	AM
Amenaza baja	AB
Amenaza muy baja	AMB

Cuadro 6.3: Resumen de los principales peligros volcánicos en el Rincón de la Vieja (ver texto para detalles).

Peligro	Frecuencia	Tamaño o extensión predominante	Comentarios
Gases volcánicos	Cuasi permanente pero solo en la parte cuspidal del volcán	< 6 km	Afecta principalmente en las cercanías del cráter y hacia el SW
Lluvia ácida	Recuente en la dirección de los vientos predominantes	≤ 9 km	Afecta principalmente la vegetación y, en caso de intensificación, a los cultivos e infraestructura
Esmog volcánico (Niebla ácida volcánica, <i>vog</i>)	Poco frecuente	≤ 3 km	Afecta principalmente en las cercanías del cráter y hacia el SW
Coladas de lava	Infrecuente	7.5 km	Todas prehistóricas; difícil que se produzcan de nuevo a menos que se forme un foco satelital
Corrientes de densidad piroclástica (oleadas basales)	Frecuentes fuera del área cratérica cuspidal.	< 3 km; en casos de actividad paroxísmica importante: 3-10 km	La mayoría históricas son vecinas al cráter y los tributarios en su flanco N. En caso de una erupción importante, si pueden alcanzar mayor extensión
Tefras de caída	Frecuente	2-6 km con cierta frecuencia; 40 km en casos excepcionales	Predominantemente hacia el W y SW
Proyectiles balísticos	Frecuente	Por lo general < 2 km	Peligro elevado cerca del cráter
Terremotos volcánicos	Poco frecuentes poca magnitud (Mw 2-3); infrecuentes Mw >3.0	Mw < 3-5.5	La probabilidad de daños sería baja
Deformación cortical y formación de grietas	Rara; grietas anulares en el cráter	Pequeño	Peligro restringido en el borde cratérico por colapso
Formación de nuevos cráteres y conos	Frecuente en el pasado en la cima; ningún caso conocido en los flancos	Varios tamaños, por lo general pequeños	Ningún cráter o cono satelital en tiempo histórico
Avalancha de escombros volcánica y deslizamientos	Frecuentes los deslizamientos pequeños; pocas avalanchas de escombros prehistóricas	Los deslizamientos: 0.1 km a 0.3 km; las avalanchas: <6.5 km	Deslizamientos principalmente en la cima. El mayor peligro, pero no a corto plazo, es que el lago hiperácido y las explosiones debiliten la pared norte
Lahares	Frecuentes con VEI >2 (sinvolcánicos), pos-eruptivos, temporales y cosísmicos	< 10 km	El mayor peligro está para los turistas y personas locales desprevenidas en el flanco N

6.3 AMENAZAS VOLCÁNICAS DIRECTAS

Se entiende como amenaza volcánica directa aquella incidencia potencial, relacionada directamente con la actividad volcánica.

6.3.1 Gases y aerosoles volcánicos

El magma contiene gases disueltos, los cuales escapan hacia la atmósfera durante las erupciones y mientras el magma permanece estacionado cerca de la superficie. Más del noventa por ciento de todo el gas emitido por los volcanes es vapor de agua, la mayoría de la cual es agua subterránea en ebullición. Los gases volcánicos del Rincón de la Vieja son principalmente vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), cloruro de hidrógeno (HCl), algo de fluoruro de hidrógeno (HF), dióxido de azufre (SO₂), con cantidades menores hasta trazas de helio (He), metano (CH₄) e hidrógeno (H₂), principalmente (Tassi et al., 2005; Aiuppa et al., 2014; Battaglia et al., 2019).

Muchos de estos gases, en elevadas concentraciones, representan un peligro para la salud humana y animal, que incluso pueden provocar la muerte, aunque lo normal es que causen problemas como irritación de las vías respiratorias, las mucosas, la piel y los ojos (William-Jones y Rymer, 2000, 2015). En general, la prolongada exposición a los gases volcánicos es uno de los factores que produce lo que los médicos denominan estrés oxidativo, lo cual afecta paulatinamente a los seres humanos y a los animales de diversas maneras, por lo que hay que prestar particular atención a las poblaciones bajo la permanente influencia de la polución volcánica.

Los volcanes también pueden producir un tipo de niebla ácida, tóxica contaminante o esmog volcánico, conocida como *vog* (“v” de material volcánico y “og” proviene de *fog*, que significa niebla en inglés). Muchas veces, el SO₂ junto con el vapor de agua y otros gases ácidos (particularmente el HCl y el HF), a veces acompañado de partículas de sulfato y ceniza volcánica con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm, reaccionan con el oxígeno y la humedad del medio en presencia de la luz solar, para producir *vog* mezclado con lluvia ácida, que puede cubrir los flancos de los volcanes con una niebla ácida, azul y espesa, que suele sobrepasar mucho los niveles umbrales permitidos para la calidad del aire. El *vog* puede producir como efectos agudos, a corto plazo, dolores de cabeza, náuseas, garganta irritada, tos, broncoespasmos y sibilancias, ojos llorosos y síntomas parecidos a la gripe con producción de moco. Más gravemente, puede inducir como efectos crónicos a largo plazo, enfermedades obstructivas de las vías respiratorias, particularmente en personas con reactividad previa conocida (p. ej., asma, bronquitis, bronquiectasias, enfermedad pulmonar crónica), y enfermedades cardiovasculares. Puede ser particularmente peligrosa en edades extremas (infantes lactantes y ancianos) o embarazos (ATS, 2018).

Las partículas mayores a 10 μm generalmente se filtran en la nariz (hasta en un 98 %) y en la garganta, por lo que causan problemas como irritación en las vías respiratorias superiores, pero aquellas con diámetros inferiores (≤PM₁₀ o PM₁₀) pueden penetrar al

sistema respiratorio y alojarse en la tráquea o en el interior profundo de los pulmones, lo cual agrava el riesgo de desarrollar cardiopatías y neumopatías, así como cáncer de pulmón. El tamaño del material particulado o aerosol (partículas finas líquidas y sólidas suspendidas en el aire), de diferentes diámetros aerodinámicos menores de 4 micrómetros, pero particularmente inferiores a 2.5 micras (μm , $\leq\text{PM}_{2.5}$ o $\text{PM}_{2.5}$), es uno de los principales determinantes para que estas entren hasta los alveolos pulmonares, constituyéndose en partículas respirables. Estas partículas inferiores a los 4 μm de diámetro aerodinámico pueden instalarse en los bronquios y en los pulmones y, de ahí, al torrente sanguíneo, tanto en los seres humanos como en los animales, por lo que, pueden causar problemas serios de salud. Hay que tomar en cuenta que, al entrar las partículas en el torrente sanguíneo, parte de su composición química puede solubilizarse, depositando metales en los diferentes órganos de cuerpo. Así, cuando en el ambiente aumenta la concentración de gases, cenizas y aerosoles extremadamente finos, en un tiempo prolongado de exposición, las personas pueden iniciar la inhalación y la respiración de estas sustancias permitiendo el paso directamente a las vías respiratorias superiores y luego las vías inferiores, lo que conlleva al potencial aumento de enfermedades como el asma, la bronquitis, la hipertensión arterial, los problemas cardiovasculares y el cáncer (Seinfeld y Pandis, 2006).

Por lo anterior, lo recomendable es protegerse con mascarillas faciales, preferiblemente del tipo NIOSH N95 o FFP2 NR (EN 149: 2001), o aquella que recomiende el Ministerio de Salud, las cuales estén diseñadas para filtrar las partículas finas. Las mascarillas quirúrgicas comerciales son mucho más delgadas y no cuentan con material filtrante eficiente para las partículas finas.

Para la filtración de gases se ocupan mascarillas más especializadas y costosas, donde cuentan con filtros especiales para gases ácidos azufrados que se deben cambiar cada cierto tiempo, dependiendo del nivel de uso y exposición.

Pese a ello, con o sin máscara, si se siente irritación por los gases, lo recomendable es alejarse del lugar inmediatamente. Las personas con problemas respiratorios, alergias, niños y adultos mayores o con condición física baja, no deben de exponerse a condiciones de este tipo. En general, la prolongada exposición a los gases volcánicos es uno de los factores que produce lo que los médicos denominan estrés oxidativo, lo cual afecta a los seres humanos y animales de diversas maneras, por lo que hay que prestar particular atención a las poblaciones bajo la influencia de la polución volcánica y, particularmente, los guardaparques.

El H_2S (sulfuro de hidrógeno), con su típico olor a huevos podridos u olor a “azufre”, suele ser el gas dominante de las fumarolas sobre el SO_2 debido a su reacción con agua. El H_2S en concentraciones bajas (unos 50 ppm) pueden provocar inflamación de la garganta, dolor de cabeza, fatiga, mareos, aunque si es por períodos prolongados de exposición, puede degenerar en faringitis y bronquitis. Más preocupante aún si la concentración es mayor (> 250 ppm), pueden causar edema pulmonar e incluso la muerte y a concentraciones de > 1000 ppm puede causar coma en corto tiempo. Un problema es que al ser más denso que el aire, se puede acumular en las depresiones o las cavernas (Williams-Jones y Rymer, 2000, 2015). La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA por sus siglas en inglés) ha establecido una cantidad máxima de 20 ppm para el sulfuro de hidrógeno (H_2S) en el ambiente del trabajo y un límite de 50 ppm durante un período máximo de 10 minutos si no

ocurre exposición adicional. El *National Institute for Occupational Safety* (NIOSH) recomienda, en cambio, un límite de exposición máximo de 10 ppm durante un periodo de 10 minutos. Estos límites varían en función de los países y si las personas están expuestas por jornadas de 8 horas o de 24 horas (<https://www.atsdr.cdc.gov/es/ATSDR> en español). En tal caso, si se nota mucho olor a “azufre”, se recomienda colocar paños o sábanas mojadas en las rendijas de puertas y ventanas, además de viajar con el vehículo con ventanas cerradas y el aire acondicionado bajo la forma de “recirculación”.

Con respecto al dióxido de azufre (SO₂), de un olor acre y penetrante, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) ha determinado que aumentan exponencialmente la hiperreactividad nasal, ocular y de problemas respiratorios, particularmente en personas asmáticas, lo cual puede causar conjuntivitis, rinitis y problemas pulmonares; a largo plazo puede originar enfermedades respiratorias y agravar problemas del corazón. Algunos de los efectos agudos que produce la exposición a este gas son la irritación y la constricción de las vías respiratorias, así como molestia en los ojos (Williams-Jones y Rymer, 2000; Hansell, 2004). Asimismo, el SO₂ es un importante broncoconstrictor desde los primeros minutos de exposición y sus efectos aumentan conforme hay un incremento de la actividad física (Alvarado X., 2006).

Dentro de los efectos del ácido sulfúrico (H₂SO₄) cuando se ponen en contacto con membranas húmedas, puede producir irritación de los ojos, la nariz y la garganta, quemaduras severas, destrucción rápida de los tejidos y desgaste de los dientes. En concentraciones elevadas y exposición prolongada, se convierte en irritación crónica de los ojos, la nariz y los pulmones. El ácido sulfúrico en concentraciones elevadas, no se puede detectar, dado que ocasiona la parálisis del nervio olfativo (Williams-Jones y Rymer, 2000).

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas muy abundante en las áreas volcánicamente activas y durante las erupciones. Las mofetas son salidas de gases (principalmente monóxido y dióxido de carbono) normalmente de modo difuso. El CO₂ en concentraciones bajas (~2 % o 20 000 ppm), pueden presentar molestias como irritación de los ojos, la nariz y la garganta, así como afectar la función respiratoria y provocar excitación seguida por depresión del sistema nervioso central y mayores pulsaciones del corazón. En concentraciones moderadas entre un 6 % y un 10 % provoca mareos, vómitos y visión borrosa, pero, con valores de CO₂ que superen el 10 %, pueden originar rápidamente pérdida de la conciencia en muy pocos minutos, e incluso producir convulsiones en concentraciones del 20 % o más y, en casos extremos, la muerte del individuo. Por lo anterior, en depresiones o cuevas, cuando sale en cantidades mayores de lo normal (a veces acompañado de CO, monóxido de carbono), al ser invisible y más denso que el aire, desplaza el oxígeno, por lo que se puede acumular, lo cual es mortal para los animales pequeños e incluso para las personas que acampan; el individuo muere tanto por toxicidad como por asfixia u ahogo, es decir, falta de oxígeno. Por eso se les denominan gases no irritantes, aunque asfixiantes, que suelen actuar sin provocar lesiones locales, pero originan hipoxia tisular (Williams-Jones y Rymer, 2000, 2015; Beaubien et al., 2003).

Soto et al. (2003b) y Soto y Martínez (2016) consideran la afectación por gases y lluvia ácida, delimitando sus efectos a zonas cercanas a la cima del volcán, distribuyéndose principalmente hacia el oeste-suroeste desde el cráter activo, en coincidencia con la dirección

predominante de los vientos. En el presente trabajo se realizó una modelización actualizada para las emisiones de material particulado suspendido y del SO₂, así como su deposición seca y húmeda, para finalmente realizar los mapas de peligrosidad volcánica correspondiente, incluyendo lluvia ácida.

6.3.1.1 Estimación de las emisiones del material particulado suspendido y del dióxido de azufre

Tal y como se dijo en el apartado de Metodología, se realizó una estimación de las emisiones anuales del volcán Rincón de la Vieja, con base en el modelo computacional AERMOD, donde se tomaron datos meteorológicos de 10 años de zonas alrededor del volcán, ya que no hay un registro de valores del propio lugar. Se estimó una emisión de partículas (ceniza) y de dióxido de azufre (SO₂) de 30 kg/s y de 1000 ton/día, respectivamente.

Los mapas que se generaron obedecen a dos tipos de análisis:

- 1) Material particulado y gas tipo SO₂ suspendidos en el aire, es decir, lo que las personas pueden respirar en el ambiente, y
- 2) Material particulado y gas depositado en el medio, es decir, sobre el suelo, bosque e infraestructura.

Los mapas de concentración de material particulado suspendido en el aire (PTS) y del gas SO₂ en el aire y en la lluvia, fueron realizados para varios meses y a nivel anual. El modelo tiene un alcance de 50 km a la redonda.

La concentración PTS incluye a las partículas menores a 100 μm, en donde, según la modelación realizada y el patrón de parámetros meteorológicos de los años de estudio, mostró una tendencia principal hacia el SW, el W y el NW, con una tendencia principal hacia el NW. Las concentraciones más altas son las reportadas en los alrededores de la fuente de emisión, en este caso, hacia el N y el NW del cráter Activo del volcán, donde se alcanza un promedio alrededor de los 48 μg/m³. Las estimaciones hacia el oriente y alrededores son de baja escala debido a la poca presencia de vientos que arrastren las partículas de forma constante a esas zonas. Según el modelo, las partículas suspendidas en el aire podrían llegar hasta Nicaragua y al océano Pacífico. La zona habitada con mayor impacto por la concentración de PTS en el aire sería El Gavilán, seguido por Curubandé, hacienda Orosi, entre otros. La dispersión de las PTS llegaría a más de 50 km de distancia en las direcciones predominantes del viento (Fig. 6.7).



Fig. 6.7: Concentración anual de PTS debido a las emisiones del volcán Rincón de la Vieja.

La concentración del dióxido de azufre en el aire (SO_2), por su parte, según la modelación realizada y el patrón de parámetros meteorológicos de los años de estudio, muestra una tendencia principal hacia el SW, el W y el NW, directamente hacia la zona de los volcanes Orosí y Cacao. Las concentraciones más altas son las reportadas en los alrededores de la fuente de emisión, en este caso, hacia el N del cráter Activo del volcán Rincón de la Vieja, donde se alcanza un promedio alrededor de los $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las estimaciones hacia el oriente y alrededores son de baja escala debido a la poca presencia de vientos que arrastren las masas de aire que contienen SO_2 . La zona habitada con mayor impacto por la concentración de SO_2 en el aire sería El Gavilán, seguido por Curubandé, hacienda Orosi, entre otros. La dispersión del SO_2 llegaría a más de 50 km de distancia en las direcciones predominantes del viento (Fig. 6.8).

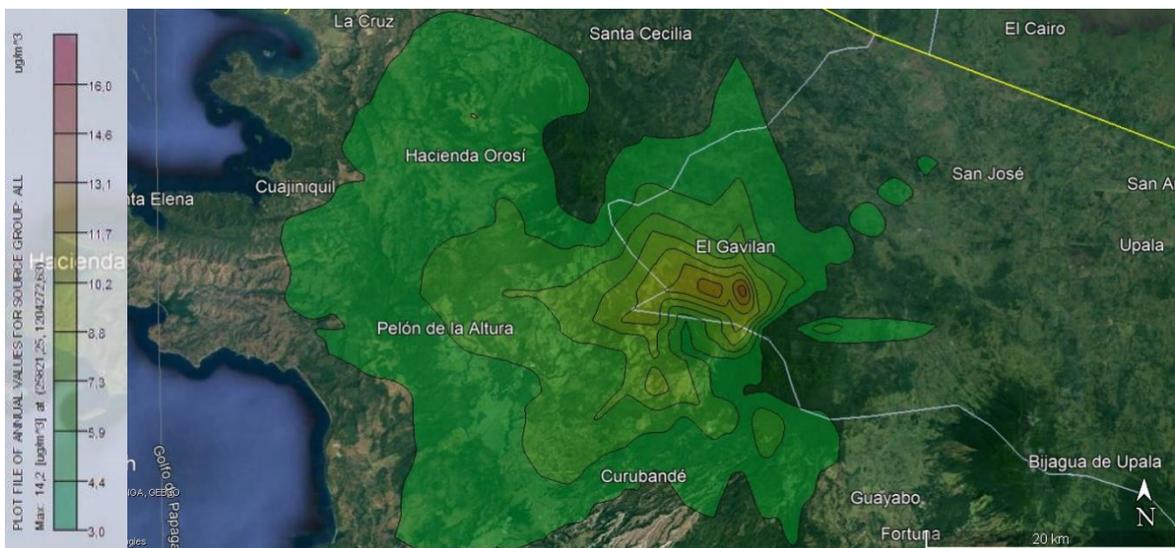


Fig. 6.8: Concentración anual de SO_2 debido a las emisiones del volcán Rincón de la Vieja.

6.3.1.2 Deposición seca y deposición húmeda de las PTS y del SO₂

La concentración estimada del material particulado durante las lluvias, según la modelación realizada y el patrón de parámetros meteorológicos de los años de estudio, mostró una tendencia principal de forma circular alrededor de la fuente de emisión, con una pequeña tendencia hacia el W y el S, directamente hacia el poblado de Curubandé. Las concentraciones más altas son las reportadas en los alrededores de la fuente de emisión, en este caso, el cráter Activo, donde se alcanza un promedio alrededor de los 816 g/m². La estimación da un radio aproximado de 10 km alrededor del cráter habría tenido una afectación por lluvia con presencia de partículas, alcanzando valores de 1 g/m² (Fig. 6.9).

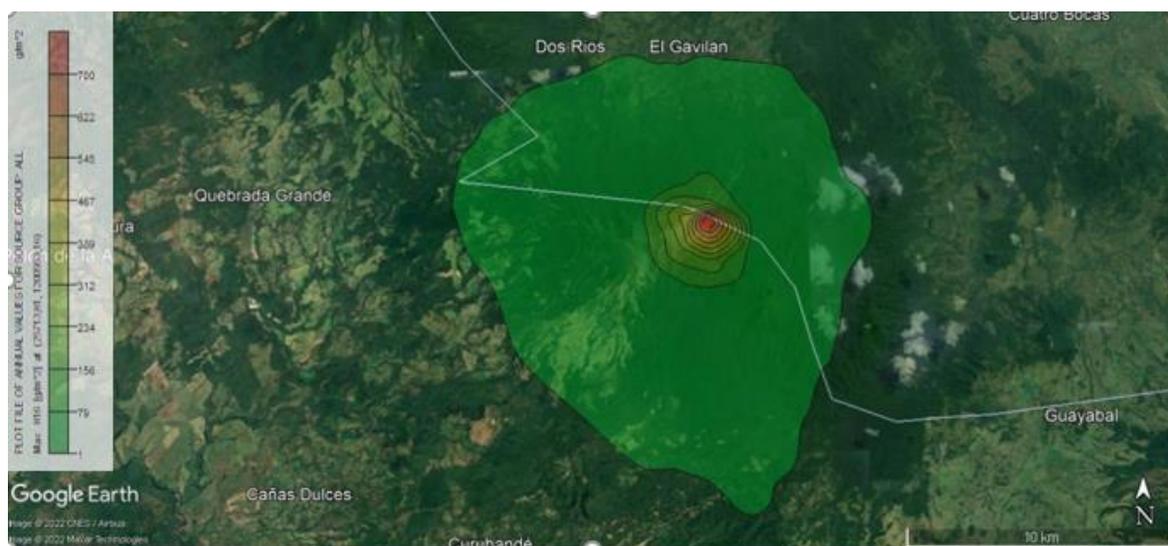


Fig. 6.9: Concentración anual de PTS por deposición húmeda debido a las emisiones del volcán Rincón de la Vieja.

La concentración estimada del material particulado en el suelo por deposición seca, según la modelación realizada y el patrón de parámetros meteorológicos de los años de estudio, mostró una tendencia principal hacia el NW y el W, directamente hacia los volcanes Orosi y Cacao. Las concentraciones más altas son las reportadas en los alrededores de la fuente de emisión, en este caso, el cráter del volcán Rincón de la Vieja, donde se alcanza un promedio alrededor de los 757 g/m². Más allá de los 49 km de distancia hacia el NW, la estimación da valores de 20 g/m² de partículas precipitadas. La zona habitada con mayor impacto por la concentración de PTS en el aire sería El Gavilán, seguido por Curubandé, hacienda Orosi, entre otros. La dispersión de las PTS llegaría a más de 50 km de distancia en las direcciones predominantes del viento (Fig. 6.10).

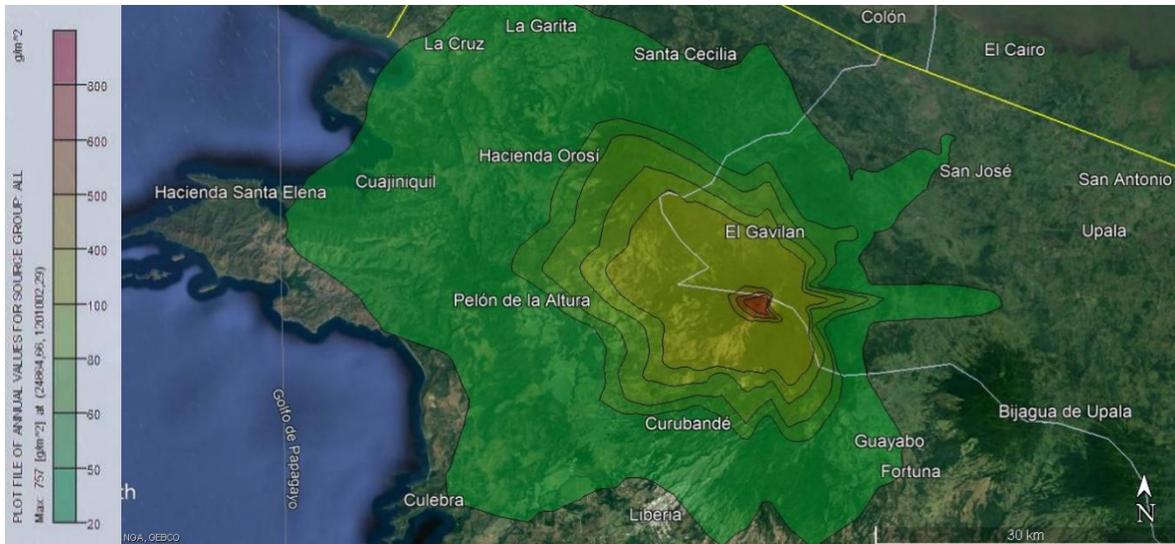


Fig. 6.10: Concentración anual de PTS por deposición seca debido a las emisiones del volcán Rincón de la Vieja.

La concentración estimada del SO_2 en la lluvia, según la modelación realizada y el patrón de parámetros meteorológicos analizado, mostró una tendencia principal de forma circular alrededor de la fuente de emisión, con una pequeña tendencia hacia el W y el S, directamente hacia el poblado de Curubandé. Las concentraciones más altas son las reportadas en los alrededores del cráter, donde se alcanza un promedio alrededor de los 315 g/m^2 . La estimación aporta un radio aproximado de 14 km a la redonda del volcán que fue la que habría tenido afectación por lluvia con presencia de SO_2 , alcanzando valores de 0.1 g/m^2 (Fig. 6.11).

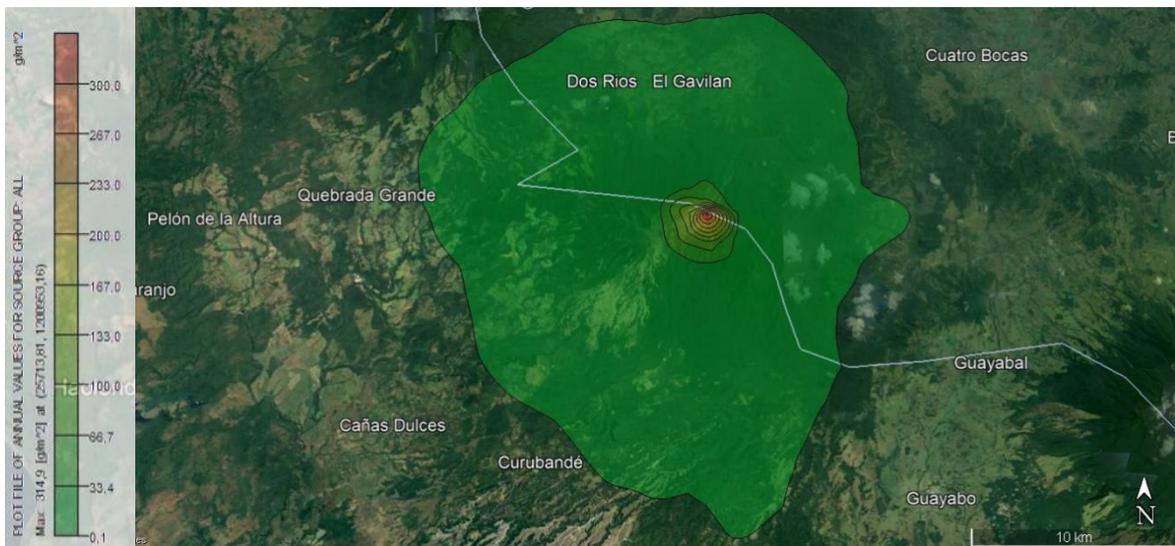


Fig. 6.11: Concentración anual de SO_2 por deposición húmeda debido a las emisiones del volcán Rincón de la Vieja.

6.3.1.3 Peligrosidad por cenizas respirable en el ambiente y SO₂ inhalable en el aire

Se modeló la peligrosidad por ceniza respirable y por inhalación de SO₂ en el aire (Fig. 6.12 y 6.13). El área verde muestra los posibles lugares con baja afectación, en donde se tendría un alcance de hasta 50 km en dirección hacia el W, el SW y el NW. La zona más afectada por la ceniza y el SO₂ sería a 18 km hacia el W, donde se incluye: Dos Ríos, hacienda Nueva Zelandia y El Gavilán. El cuadro 6.4 muestra la peligrosidad según la magnitud de la erupción, además de los posibles efectos y síntomas que podría tener la población con la respiración o exposición a las emanaciones de la fuente de emisión.

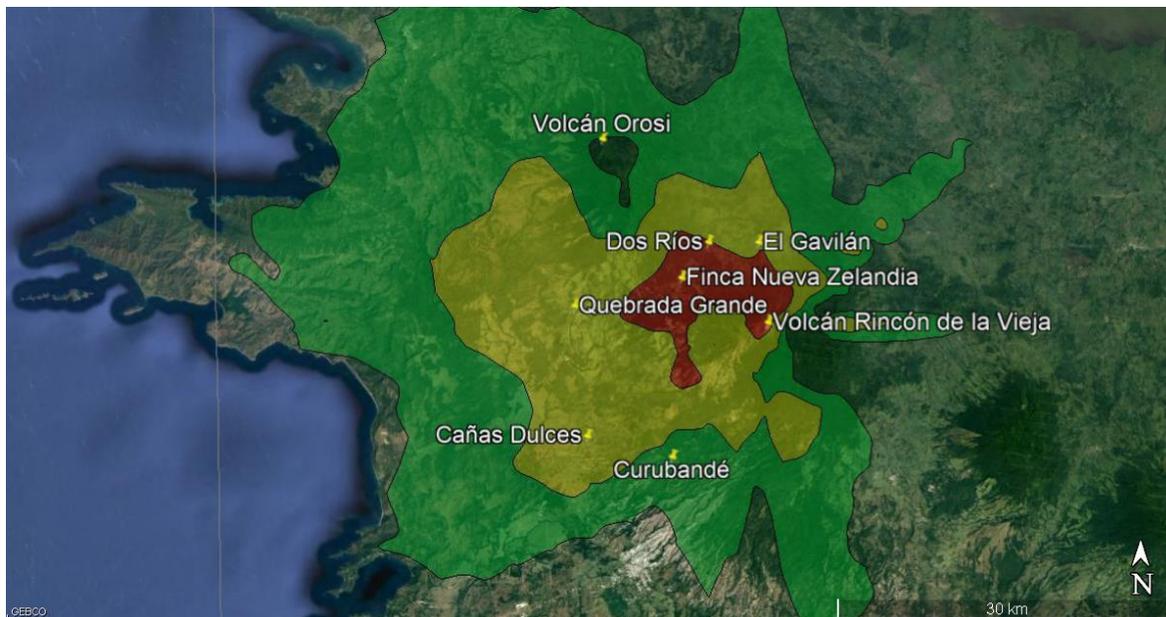


Fig. 6.12: Mapa de peligrosidad por PTS y SO₂ en el aire debido a las emisiones del volcán Rincón de la Vieja.



Fig. 6.13: Ejemplo de partículas suspendidas en el ambiente y precipitándose hacia el flanco norte a raíz de la erupción del 28-6-2021 (fotografía OVISICORI-UNA).

Cuadro 6.4: Determinación de la frecuencia (F) eruptiva y su período de retorno (Pr) para definir los niveles de amenaza.

Período	Frecuencia	F	Pr	Ejemplos
Milenario	Muy baja	F ₀	5000 años a 10 000 años	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disminución de la visibilidad 2. Problemas respiratorios en la población en general 3. Irritación en la piel, la garganta y la nariz 4. Olor a azufre 5. Cobertura de ceniza de más de 5 mm en la superficie.
Milenario	Muy baja	F ₁	1000 años a 5000 años	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disminución de la visibilidad 2. Problemas respiratorios en la población en general 3. Olor a azufre 4. Cobertura de ceniza de más de 2 mm en la superficie.
Milenario	Baja	F ₂	500 años a 1000 años	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disminución de la visibilidad 2. Problemas respiratorios en la población más vulnerable 3. Olor a azufre 4. Cobertura de ceniza de más de 1 mm en la superficie.
Centenario	Moderada	F ₃	100 años a 500 años	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disminución de la visibilidad 2. Irritación en la garganta 3. Olor a azufre
Anual y Decadal	Muy alta	F ₄	10 años a 50 años	<ol style="list-style-type: none"> 1. Olor a azufre 2. Irritación en la garganta
Anual a Decenal	Muy alta (actividad cuasipermanente)	F ₅	1 años a 10 años	<ol style="list-style-type: none"> 1. Olor a azufre

6.3.2 Coladas de lava

Son derrames de roca fundida o parcialmente solidificada (actividad efusiva) que se producen por coladas (lenguas o flujos) de lava eruptadas desde el cráter o desde las aberturas en los flancos de un volcán (fisuras o cráteres satelitales) cuando fluye hacia abajo, como un fluido relativamente viscoso, moviéndose de acuerdo con la gravedad. Los factores amenazantes de los flujos o coladas de lava, es decir su extensión, están principalmente gobernados por la viscosidad, muy relacionada con temperatura, composición química, contenido de cristales y de gases, así como la tasa de emisión de lava y topografía a lo largo del recorrido. Debido a que la viscosidad aumenta con la disminución de la temperatura, la velocidad del flujo se reduce al alejarse del foco de emisión y cuando se topa con una topografía de suave pendiente o un obstáculo importante. Donde pasa una colada de lava, la tierra agrícola, el bosque y las casas son destruidas, sepultadas y quemadas.

En el caso del Rincón de la Vieja, no se conocen coladas de lava históricas y las coladas de lava prehistóricas, particularmente las de su flanco caribeño, son morfológicamente indicadoras de no ser muy antiguas, por lo que se llegó a estimar en unos

pocos miles de años (Soto et al., 2003a). En efecto, las dataciones radiométricas realizadas para el presente estudio, previamente citadas en el apartado del Neo-Rincón Superior, nos indican que las últimas efusiones lávicas ocurrieron hace unos 5 ka (=5000 años). Al parecer estas coladas salieron del cono Von Seebach y del cráter Activo, de este último en una época en que no era tan profundo o más bien, constituía un cono más conspicuo, es decir, más elevado. La amenaza por coladas de lava fue contemplada en los trabajos de Soto et al. (2003b) y Soto y Martínez (2016). De acuerdo con Soto et al. (2003a), las coladas de lava más recientes, en apariencia tuvieron como foco de emisión al cráter Von Seebach, alcanzando entre 3 y 8.5 km de distancia. Estos autores delimitan la zona de peligro por coladas de lava, dentro de un área que abarca hasta 4 km al N y 1.6 km al S del cráter activo, debido a las barreras topográficas que impedirían un eventual avance hacia el sur de nuevas coladas de lava.

En la actualidad, si el foco de salida de nuevas coladas de lava fuese el cráter Principal, entonces tendría que rellenarse la enorme depresión cratérica con un lago de lava de al menos unos 65 m de espesor (unos 30 m de lago cratérico más unos 35-50 m de altura del borde N), situación poco probable que llegue a ocurrir y a rebasar el cráter, continuar aún y extenderse por varios kilómetros. Aun así, en el caso de hacerlo, la colada se vertería hacia el N.

Dado lo anterior y en vista a que han transcurrido varios milenios sin efusiones lávicas, esto lleva a la conclusión que su amenaza volcánica es baja a muy baja, aunque no se excluye la posibilidad de un nuevo evento eruptivo o incluso fisural, particularmente en su arista E-W. Por ello, no se invirtió tiempo en aplicar modelos computacionales sobre el emplazamiento de coladas de lava puesto que la peligrosidad (probabilidad) es baja. Además, no se dispone de un mapa topográfico de detalle. Sin embargo, se confeccionó un mapa que muestra la extensión posible de las coladas de lava desde el punto de vista esquemático, saliendo del cráter Activo (Fig. 6.14).

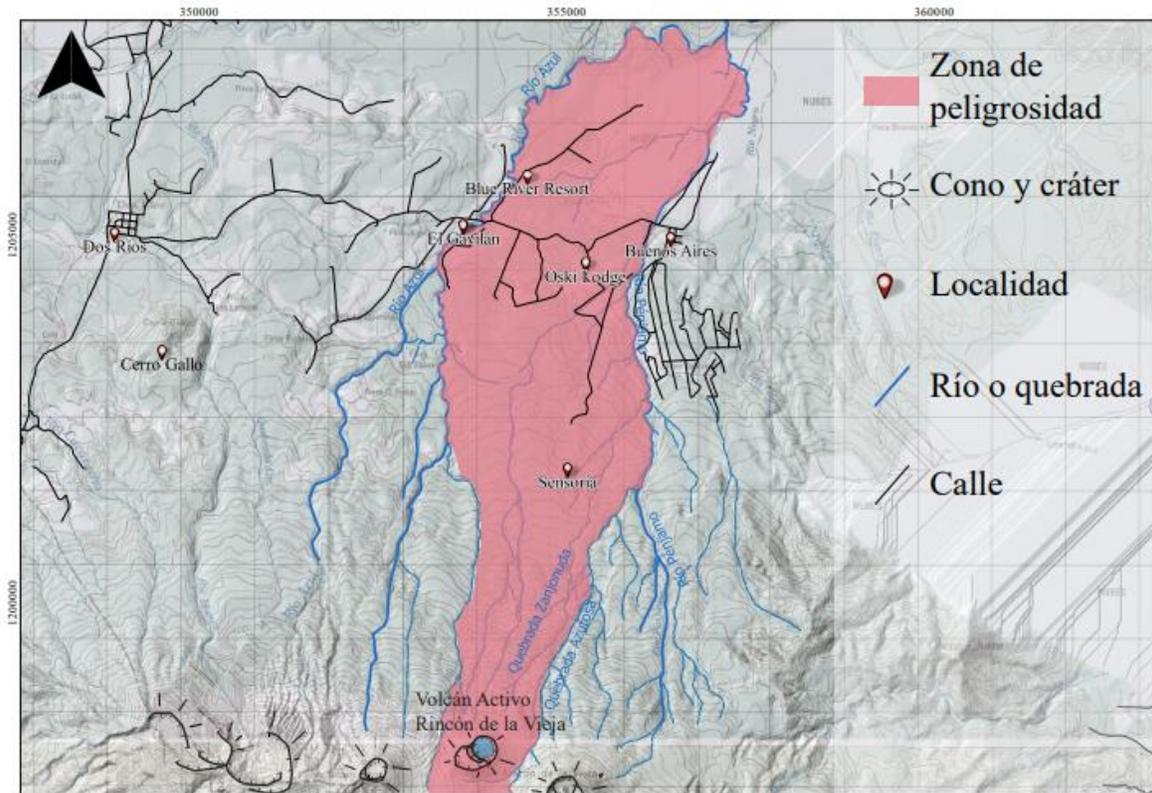


Fig. 6.14: Mapa de peligrosidad por coladas de lava.

6.3.3 Flujos piroclásticos

El vocablo piroclástico proviene de las palabras griegas *pyro*, que significa fuego y *klastos* que significa quebrado, representa el material formado por la fragmentación de la roca magmática mediante la actividad explosiva de un volcán. Un flujo piroclástico, también conocido como corriente de densidad piroclástica concentrada, CDPc, consiste en un flujo de material volcánico (gases y ceniza hasta grandes bloques métricos), semifluidizado, controlado por la gravedad y que se desplaza lateralmente a ras del suelo. Corresponde con un flujo con una alta concentración de fragmentos piroclásticos, donde la fase continua entre ellas es el gas y que posee una relación fragmentos/gas elevada. Su temperatura puede variar entre unos < 100 °C y 800 °C. Muchas veces las explosiones y los flujos resultantes pueden estar acompañados de una onda de impacto. Por otra parte, las oleadas piroclásticas (también denominadas corrientes de densidad piroclástica diluidas, CDPd), son un tipo de flujo piroclástico de baja concentración y densidad, fluidizados, donde la fase continua entre los fragmentos es el gas. Suelen acompañar a los flujos piroclásticos y, en detalle, suele existir una gradación completa entre los flujos piroclásticos y las oleadas.

Los autores del presente informe han localizado varios depósitos de cenizas con estructuras onduladas, adelgazamientos laterales o acuñamientos y laminación inclinada en sectores distantes como 4 km. Estos depósitos emulan oleadas piroclásticas (CDPd). Alvarado et al. (2019) y Aguilar y Alvarado (2020) encuentran más depósitos de oleadas piroclásticas para los últimos 6 ka en el flanco sur del volcán. Los depósitos de flujos piroclásticos más importantes y recientes que se han encontrado para este volcán están

asociados con la erupción denominada Río Blanco, se encuentran en el sector N del volcán, restringidos a los cauces de los ríos Azul y Pénjamo, desde la cota de 800 m s. n. m., hasta aguas abajo en la confluencia con el río Cucaracho, unos 10 km al N del cráter, alcanzando las comunidades de Gavilán y Buenos Aires. Estos depósitos poseen pómez en la base y escorias en su parte superior, con mezcla mecánica de ambos durante la erupción. Desde el cráter Activo hasta 5 km al N, las corrientes de densidad piroclástica concentrada con facies de flujos de escoria se presentan medianamente soldadas, pero más allá de esa distancia, los depósitos no presentan soldamiento en su parte superior, aunque la matriz es dura. Estos flujos fueron ampliamente descritos por Kempter et al. (1996), Soto et al. (2003a, b) y Aguilar y Alvarado (2020). Un mejor mapeo de la extensión de este depósito de flujo fue realizado para el presente informe (Fig. 3.3).

Las corrientes de densidad piroclástica (concentradas o flujos piroclásticos y diluidas u oleadas) son frecuentes durante las erupciones vulcanianas y freatosurseyanas recurrentes del Rincón de la Vieja, aunque su extensión no va más allá de un kilómetro del cráter Activo. Representan un peligro alto para los turistas ilegales o para el personal profesional y técnico en vulcanología. La probabilidad de un evento eruptivo mayor (pliniano y subpliniano) es mucho más baja, en particular dado que no se observan en la información de vigilancia volcánica (deformación geodésica, gases, sismología) llevada a cabo por el OVSICORI-UNA, evidencias que indiquen una intrusión de magma importante. Pero tampoco ha ocurrido una brecha temporal en la actividad eruptiva (lapso prolongado de inactividad) que pudiera sugerir una acumulación y diferenciación magmática que conlleve a un magma más ácido que el actual.

Los flujos piroclásticos fueron modelados por Soto et al. (2003a) y Alpízar (2018), quienes además mencionan que, ante un escenario eruptivo similar, la distribución de los flujos piroclásticos sería tanto hacia el norte como hacia el sur, donde afectaría un área menor. La amenaza, por probabilidades, es baja a moderada (aunque no nula) para los pobladores y la infraestructura vital, aunque es mediana a alta para los turistas ilegales cerca del cráter Activo o durante su ascenso, incluso para un evento pequeño. Con respecto al modelo de flujos piroclásticos de Soto et al. (2003a) y Alpízar et al. (2019), su distribución parece estar sobredimensionada para ambos flancos con respecto a lo mapeado en el campo, lo cual puede obdecer a los megarasgos topográficos que usualmente se aprecian en MED con resoluciones espaciales de 30 m a 90 m, lo cual es de esperarse debido a la base de datos utilizada en ese momento.

Claramente, si se presentara un evento eruptivo mayor con un colapso de columna eruptiva, los flujos piroclásticos pueden extenderse a más distancia y sus consecuencias serán de consideración (Fig. 6.15). Por ello, aunque las probabilidades actuales son bajas, sí deben de tomarse en consideración para el desarrollo turístico y habitacional de la región, en particular su sector caribeño, dado que el sector Pacífico en su mayor parte es sector protegido por el parque nacional Rincón de la Vieja.

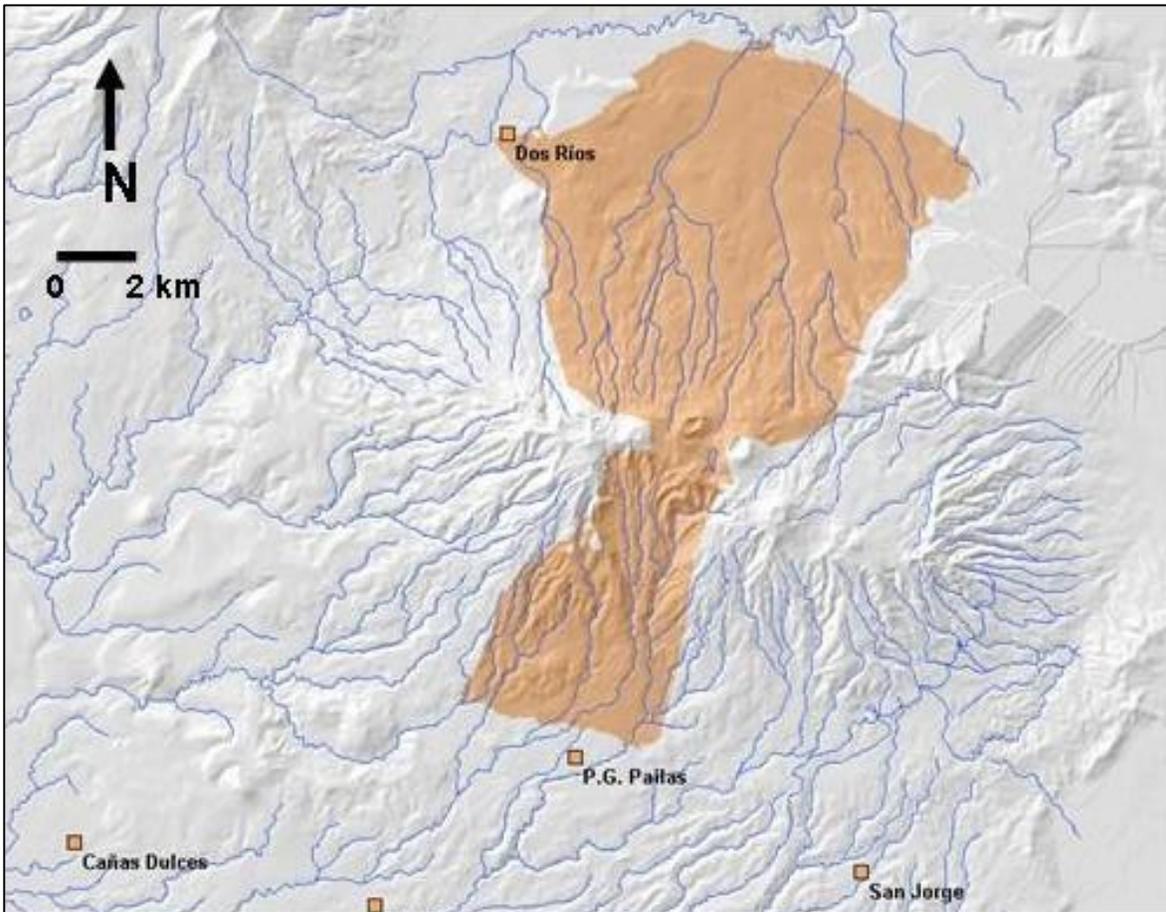


Fig. 6.15: Distribución hipotética de los flujos piroclásticos ante un escenario eruptivo similar al de la erupción pliniana del Rincón de la Vieja (mapa original sin coordenadas tomado de Soto et al., 2003b).

6.3.4 Piroclastos de caída

Cuando el magma asciende, los gases disueltos pueden ser súbitamente liberados por lo que se producen explosiones que fragmentan al magma en erupción y las rocas circundantes. En consecuencia, se forman fragmentos de diversos tamaños (submilimétricos hasta métricos) de lava triturada, reciente (incandescente o juvenil) o preexistente, incluso de modo subordinado de rocas no volcánicas. Estos fragmentos de roca que han sido expulsadas hacia la atmósfera y que luego caen nuevamente sobre la superficie terrestre se llaman piroclastos (también conocidos como tefras). Los piroclastos varían de tamaño y adquieren su nombre en función de la granulometría, desde ceniza (< 2 mm) a lapilli (2 mm a 64 mm) hasta bloques y bombas (> 64 mm). Los bloques poseen formas angulares, juveniles o no, mientras que las bombas poseen formas aerodinámicas de lava pastosa, debido a que fueron eyectadas parcialmente fundidas. Entonces, la ceniza volcánica es roca finamente pulverizada constituida de fragmentos de rocas preexistentes, escorias o pómez, así como cristales.

Los piroclastos son expelidos hacia arriba del cráter, primero como un chorro de velocidad elevada y, después, como una columna eruptiva, donde los piroclastos de mayor tamaño y densidad suelen caer contiguos al cráter. Los fragmentos de tamaño intermedio a más finos son transportados hacia arriba por medio de la columna eruptiva, la cual consisten en una zona inferior de empuje o chorro de gases/cenizas y por una zona superior convectiva, para finalmente tomar una forma de hongo o sombrilla. La altura de la columna eruptiva (entre unos 100 m y los 55 km de altura) está determinada por la temperatura del material y por la tasa de emisión. La dirección y fuerza del viento controlan el transporte de las tefras (cenizas y lapilli de pómez) a grandes distancias.

Por ejemplo, una columna eruptiva puede crecer rápidamente y alcanzar más de 20 km de altura sobre el volcán en menos de 30 minutos. Cuando la columna en ascenso termal en la atmósfera alcanza una densidad y temperatura igual a la que le circunda por enfriamiento, se expande lateralmente y forma el citado hongo o sombrilla de cenizas y vapor. A partir de ahí las cenizas y los lapilli son arrastrados por el viento para caer por gravedad, donde, al incrementarse la distancia desde el centro de emisión, la capa del depósito de tefra presenta una disminución en el tamaño del grano y forma depósitos más delgados. Las nubes eruptivas grandes pueden extenderse cientos o miles de kilómetros en la dirección del viento, para producir lluvias de ceniza sobre áreas de gran extensión; son los llamados piroclastos de caída o depósitos de caída.

La magnitud de las erupciones se puede establecer mediante una escala de intensidad (Índice de Explosividad Volcánica, con sus siglas internacionales en inglés VEI; Newhall y Self, 1982), que se basa en si la erupción fue eminentemente de coladas de lava o ligeramente explosiva con poca producción de cenizas, bombas y lapilli (tefras) con una columna de baja altura entre 0.1 km y 5 km (VEI 1-2), hasta con importantes volúmenes emitidos de tefras y alturas superiores a los 10 km o 25 km (VEI entre 4 y 8). Hasta el momento, a nivel mundial, no se ha registrado en tiempo histórico (por escrito) una erupción de intensidad 8, solo 4 de intensidad 7, unas 869 de intensidad 3 y un número muy superior a 700 de intensidad 0 (Siebert et al., 2010).

Al tener en consideración el registro histórico y estratigráfico Holoceno, en el Rincón de la Vieja, se podrían presentar los siguientes tipos de erupciones frecuentes: freatosurtseyana-vulcaniana, freática y menos frecuentemente, estromboliana.

Las erupciones estrombolianas se caracterizan por pequeñas emisiones de materiales en estado fundido o pastoso, que se suelen ver incandescentes, incluso de día, que están separadas por intervalos de pocos minutos u horas, acompañadas en ciertos casos por derrames de lava. Las explosiones son provocadas al liberarse las burbujas de gas, acumuladas en el magma de relativa poca viscosidad, cuando el techo de la columna magmática alcanza niveles superficiales. Las erupciones consisten en proyecciones periódicas de numerosas salpicaduras (bombas, lapilli y pocas cenizas) y bloques de lava incandescentes de diversos tamaños que se solidifican rápidamente.

Las erupciones vulcanianas (que también suelen ser freatomagmáticas), por su parte, predominaron durante los varios periodos explosivos principales del Rincón de la Vieja, tanto históricos como prehistóricos. En erupciones recientes a nivel mundial, se han observado erupciones freatomagmáticas tanto pobres en componentes juveniles (p. ej., freatovulcanianas), como otras en que el componente juvenil sí es abundante (p. ej., típicas freatomagmáticas), incluso donde el componente juvenil es visible a simple vista (Alvarado et al., 2016a, b).

Cuando no hay material juvenil (magma recientemente fragmentado) se denominan erupciones freáticas, aunque puede que muchas erupciones catalogadas como freáticas pueden contener material juvenil cuando se le busca con detenimiento bajo el microscopio petrográfico y electrónico (Alvarado et al., 2016a, b).

Entre los estilos eruptivos mencionados existe otro conocido como surtseyano o surtseiano (otra variante del freatomagmático), el cual tiene lugar cuando el magma entra en contacto con un cuerpo de agua abundante, generalmente procedente del mar o lagos cratéricos. La combinación entre agua y magma en justas proporciones (hasta en partes iguales), se convierte en una mezcla sumamente explosiva que produce una elevada fragmentación del magma y de las rocas circundantes. Entonces, cuando se tiene lagos cratéricos, ácidos, cargados de cieno volcánico (lodo conteniendo arcillas y limos), este tipo de actividad proyecta bloques y bombas que dejan una estela de vapor, así como chorros de fangos hirvientes que adquieren forma de árbol de ciprés, por eso se les suele llamar cipresoides.

Autores como Kempter et al. (1996), Kempter (1997), Soto et al. (2003a), Alpízar (2018) y Aguilar y Alvarado (2020) han realizado mapas de caída de ceniza basados en el registro geológico y sus resultados coinciden en que la ceniza emitida presentaría un eje de dispersión orientado hacia el W del cráter activo, aunque no excluyen que pueda presentarse otro hacia el oriente.

Referente a la gran erupción pliniana Río Blanco (*ca.* 300 A.D.), la mayor parte del depósito es una capa de pómez dacítica, blanco amarillento, con cantidades variables de escorias andesíticas negras (~10 %), piroclastos bandeados (pómez y escoria) y muy pocos líticos, es decir, existió una mezcla de dos magmas. Se estimó la altura de columna eruptiva

en >16 km (pliniana) y la duración de la erupción debió de haber durado de uno a dos días (Kempster, 1997; Soto et al., 2003a, b; Aguilar y Alvarado, 2020).

Con respecto a la mezcla de magmas, los vulcanólogos han determinado que las inyecciones de un nuevo magma en profundidad, en una cámara magmática somera, también pueden desencadenar erupciones al alterar el equilibrio térmico, mecánico y químico del magma antiguo y residente por un cierto tiempo. El nuevo magma, que proviene de una fuente más profunda y caliente (basáltico o andesítico basáltico), puede hacer que aumente bruscamente la temperatura del magma residente y más somero (andesítico o dacítico), haciéndolo entrar en convección. Este proceso le imprime una estructura vesicular a modo de esponja, por cargarse de gases. Todo ello llega a desestabilizar la cámara magmática y a disparar finalmente una erupción, como aconteció con la citada erupción pliniana. Sin embargo, adicionalmente, durante la erupción Río Blanco, en un momento dado, el magma en ascenso entró en contacto con el agua meteórica y de acuíferos que se filtraban en el volcán. Así, disparó una erupción violenta por interacción magma/agua, denominada freatomagmática.

Simulaciones realizadas por Campos (1997) para la erupción de 1995 sugieren que concentraciones de ceniza en el aire de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ a $100 \mu\text{g m}^{-3}$ son posibles a alturas de 6-11 km, unos 2000 km al occidente, tres días después de la erupción. Durante las erupciones de 1966, cayeron alrededor de 40 cm de ceniza en la cima del volcán, y para la actividad de 1995, se reportó caída de material hasta 30 km al oeste del volcán. No obstante, si bien durante la mayor parte del año los vientos provienen desde el este, es posible que su dirección cambie, durante ciertos periodos; es por esta razón que el mapa de peligros volcánicos propuesto, además de considerar la zona delimitada con base en el registro geológico, contempla dos escenarios eruptivos modelados en tres épocas distintas del año.

6.3.4.1. Modelación de escenarios de afectación por ceniza

Álpízar (2018) modeló dos escenarios de afectación por caída de ceniza mediante la herramienta Ash3D, desarrollada por el USGS. Esta se ejecuta en línea, y como parte de sus datos de entrada, toma un archivo de vientos proporcionado por el modelo numérico de predicción meteorológica del Sistema Global de Pronóstico de la NOAA (Mastin et al., 2013).

Con el fin de abordar el problema de la dispersión de cenizas resulta importante al menos considerar cuatro aspectos meteorológicos: el viento, la lluvia, la humedad y la estabilidad vertical de la atmósfera. Al menos en la vertiente Pacífica de Costa Rica estos cuatro aspectos están íntimamente relacionados entre sí, de tal forma que el viento alisio fuerte, baja humedad atmosférica, alta estabilidad y tiempo seco conforman el patrón de la época seca, mientras que el viento alisio débil, inestabilidad, alta humedad y tiempo lluvioso, establecen la época lluviosa (Zárate, 1988).

Se ha establecido que una nube de cenizas (incluyendo gases y aerosoles) podrá crecer verticalmente con mucha más facilidad en la atmósfera de la época lluviosa que en la época seca. En la temporada lluviosa, el proceso de nucleación de los aerosoles más el viento alisio débil y la lluvia misma, actúan para que las partículas no tiendan a alejarse, a menos

que la columna eruptiva alcancen los dominios de los vientos fuertes de la estratosfera inferior. El efecto de la cortante vertical del viento en la época seca es uno de los factores que más inhiben la convección, a través de un efecto de “guillotina” o cortante en las burbujas térmicas que se levantan, pero favorece que las sustancias volcánicas sean esparcidas a distancias más lejanas. Los veranillos en la época lluviosa, a mediados de año, actúan a manera de pequeñas réplicas de la época seca (Zárate, 1988).

Cuadro 6.5: Cuadro sinóptico simplificado de los efectos de la época del año sobre las partículas volcánicas (cenizas y aerosoles) y gases, según los cuatro aspectos meteorológicos importantes: la humedad, la lluvia, los vientos y la estabilidad atmosférica (realizado por los autores, basado en Zárate, 1988, Alvarado L. y Fernández, 2001; E. Zárate, com. escrita, 2021).

Nivel atmosférico y condición meteorológica	Época seca	Época lluviosa (los veranillos de la época lluviosa serían réplicas pequeñas de la estación seca, sobre todo en cuanto a lluvias)
Tropósfera baja (~1.5 km a 3 km)	Las partículas finas (cenizas y aerosoles) pueden transportarse más distancia, debido al viento alisio moderado, a veces fuerte, ausencia de lluvia y la estabilidad vertical. Transporte predominante y rápido al W y SW.	Las partículas finas (cenizas y aerosoles) no son esparcidas a grandes distancias por el viento alisio débil, la humedad y lluvia. Durante el día, las partículas viajarían al E y NE y hacia el W y SW por la noche. Incluso pueden presentar un retorno e irse precipitando ladera arriba.
~3 km a 7 km	Las cenizas se desplazarían al W.	Se moverían en un cono W y NW
~7 km a 13.5 km	Transporte predominante y rápido hacia un cono al E y NE, con distancias mayores que a < 7 km.	La dirección predominante de sedimentación es al W. Durante un temporal las partículas se podrían transportar hacia el NE y E.
~13.5 km a 19 km	Transporte con ligera predominancia hacia el W	Las áreas afectadas serían preferiblemente los flancos W y SW; en menor cuantía, SSW y NNW.
> 19 km	Transporte fuerte predominancia de difusión hacia W, pero también se presentaría difusión hacia el E en forma minoritaria.	Transporte predominantemente al W por un alto porcentaje del tiempo.

Los escenarios modelados por Alpízar (2018) se definieron como A (el más conservador, pero aun así importante) y B (el menos conservador y más drástico) donde sus características son:

Escenario A: Propuesto por Soto et al., (2003a): con una altura de columna eruptiva de hasta 7 km sobre el cráter y un volumen de hasta 10^6 m^3 . La duración de esta erupción es de nueve horas, según lo calculado por Kempter (1997).

Escenario B: Es el que describe Kempter (1997), una erupción pliniana y una duración de al menos 9 horas.

Para el escenario A, se modeló en tres meses diferentes, enero, mayo y octubre, respectivamente, donde se obtuvo espesores para la primera isopaca modelada de 3 cm (claramente, el espesor alrededor del cráter va a ser mayor). De acuerdo con el modelo, el eje de distribución del depósito sería hacia el SW en enero (Fig. 6.16) y hacia el W en octubre (Fig. 6.17), alcanzando una distancia de hasta 65 km desde el cráter. Para el caso de una erupción que ocurriera en mayo con las características descritas, la distribución de la ceniza sería hacia el E y SE del foco eruptivo, con un espesor máximo de 3 cm y el depósito alcanzaría una distancia máxima de 28 km desde el centro de emisión (Fig. 6.18).

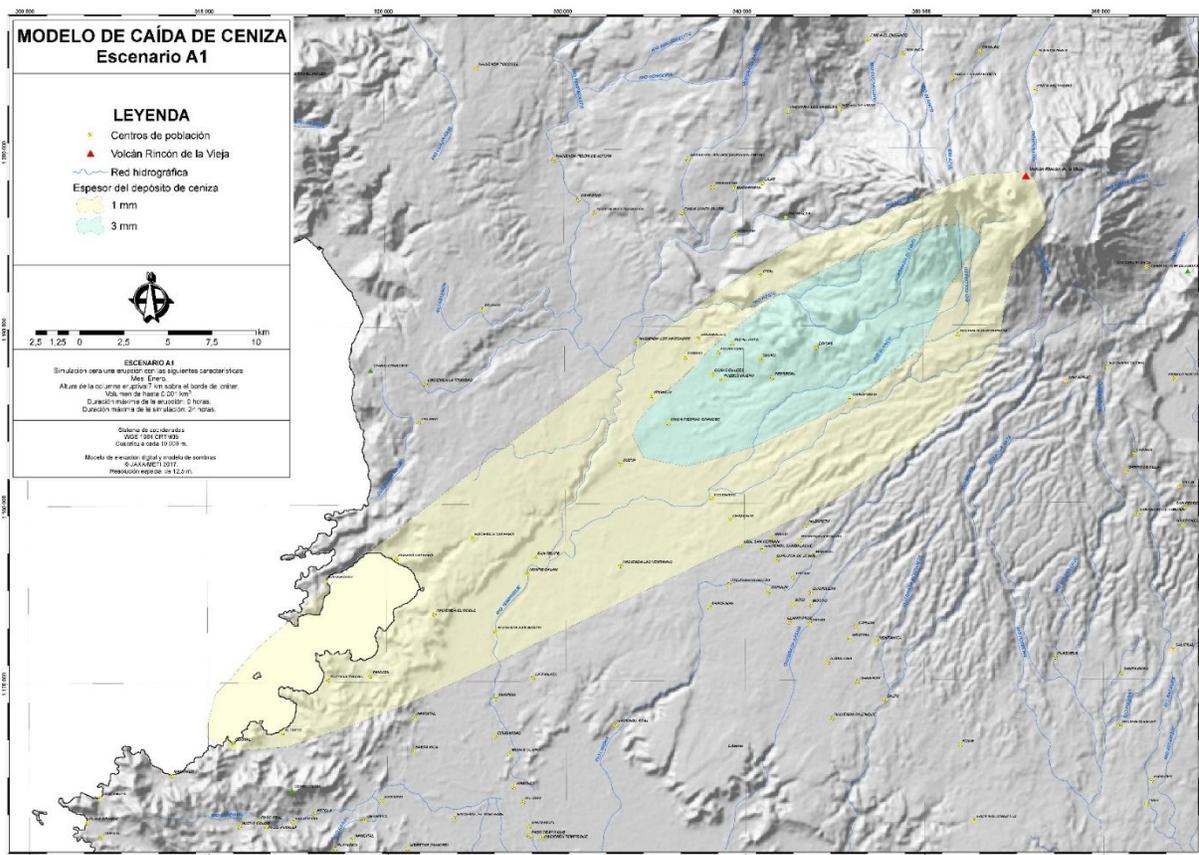


Fig. 6.16: Modelo de caída de ceniza para el escenario A durante enero (Alpízar, 2018).

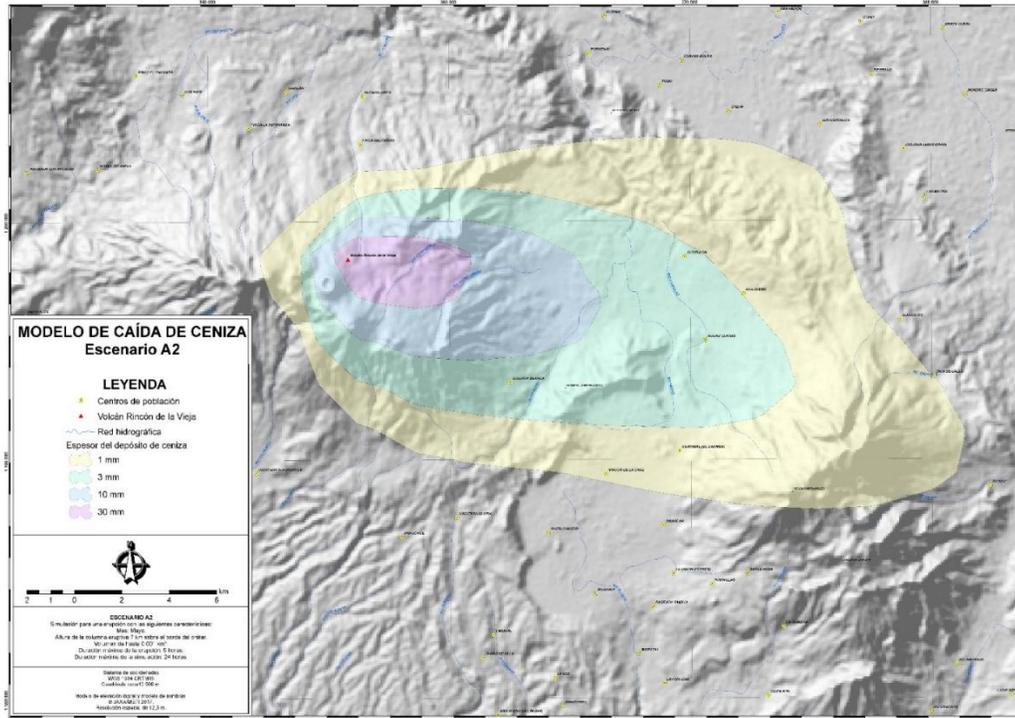


Fig. 6.17: Modelo de caída de ceniza para el escenario A durante mayo (Alpízar, 2018).

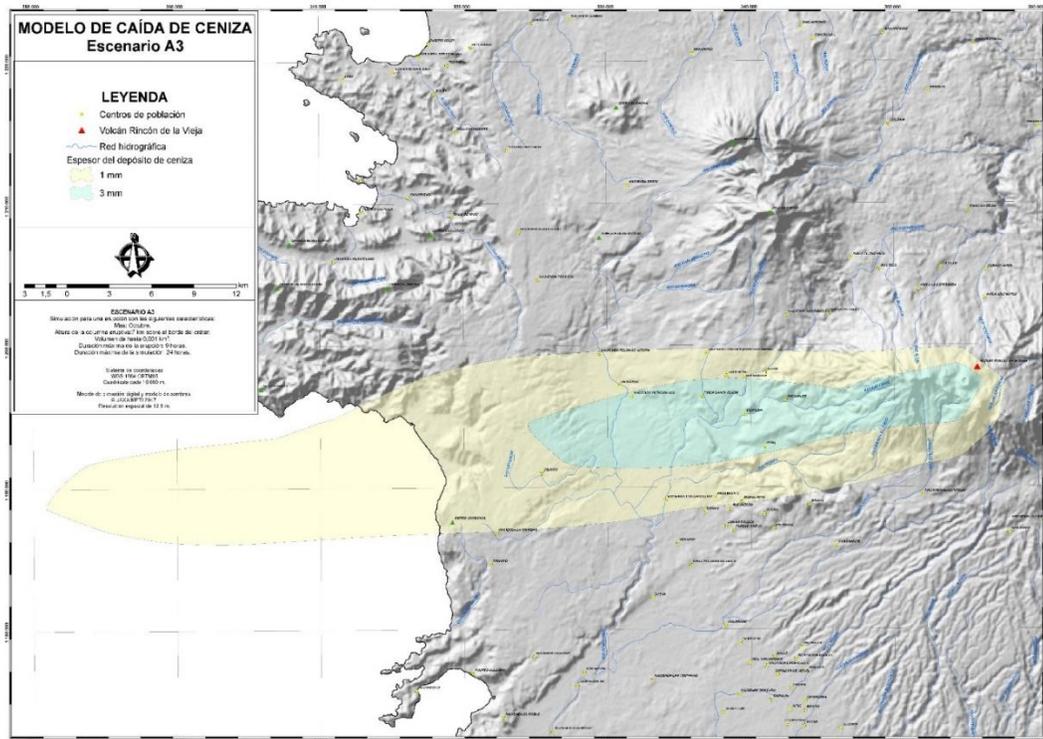


Fig. 6.18: Modelo de caída de ceniza para el escenario A durante octubre (Alpízar, 2018).

Respecto al escenario B, ante las mismas condiciones eruptivas, en las tres épocas del año, el comportamiento de nube de ceniza es sumamente variable según lo modeló Alpízar (2018), de forma tal que, si la erupción ocurriera en enero, el eje de distribución de los depósitos tendría rumbo NE y SW, distribuyéndose a ambos lados del volcán por más de 100 km. El espesor máximo de la primera isopaca del depósito en estas condiciones sería de 10 cm (Fig. 6.19), aunque claramente en los alrededores del cráter va a superar el metro y más de grosor. Si la erupción ocurriera durante el mes de mayo, el eje de dispersión del depósito nuevamente sería bidireccional (E y W), y se extendería por aproximadamente 50 km a ambos lados del volcán, con un espesor máximo de 30 cm para el depósito (Fig. 6.20). En el caso de que la erupción ocurra durante el mes de octubre, la ceniza se dispersaría hacia el W por más de 200 km y con 10 cm de espesor máximo para el depósito (Fig. 6.21). Un nuevo modelamiento fue realizado en el presente informe por J. Brenes-André y S. Núñez, el cual toma otra serie de consideraciones para el mismo tipo de erupción pliniana; sus resultados se presentan en extenso en el apartado que sigue.

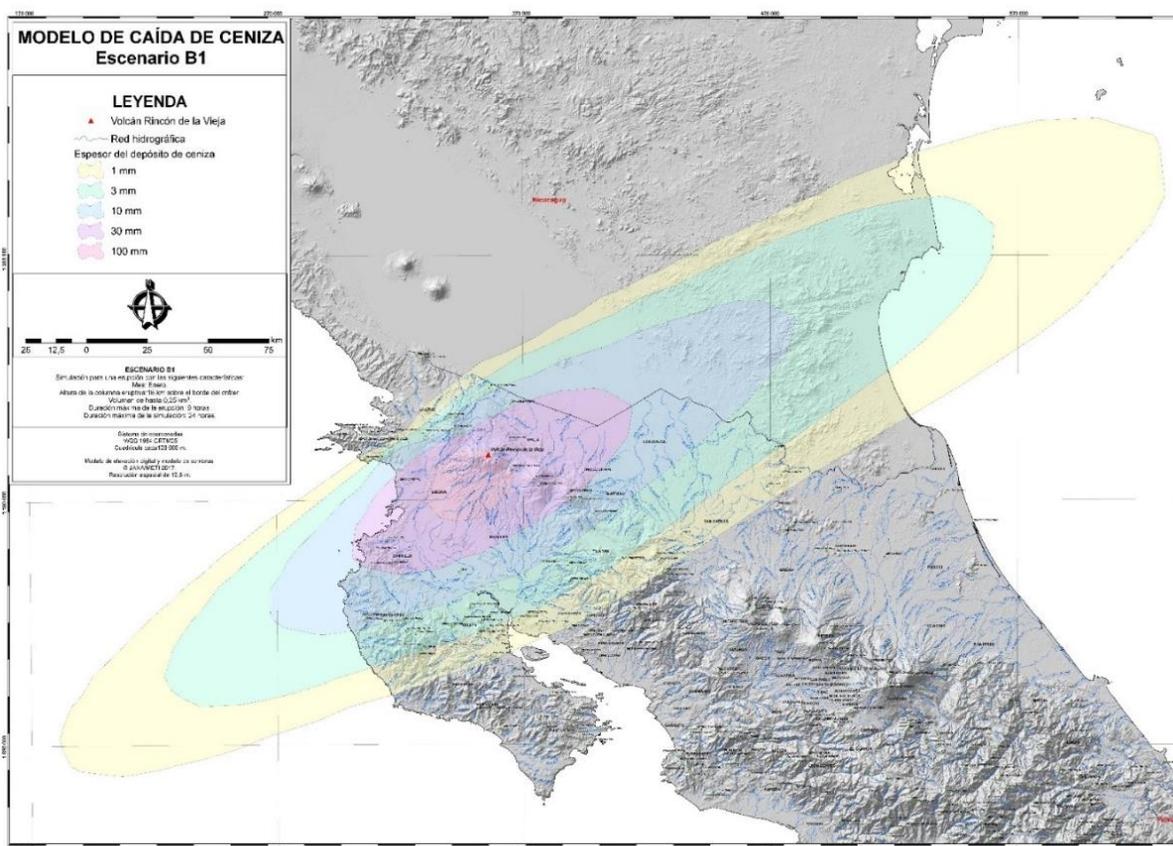


Fig. 6.19: Modelo de caída de piroclastos para el escenario de una pliniana en enero (Alpízar, 2018).

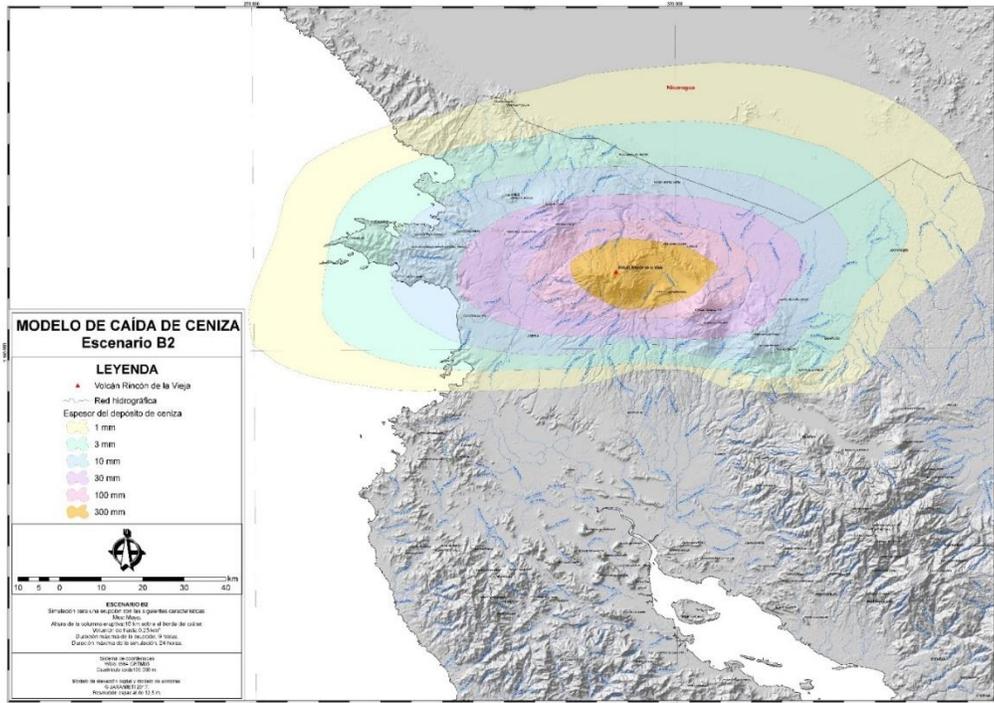


Fig. 6.20: Modelo de caída de piroclastos para una pliniana en mayo (Alpízar, 2018).

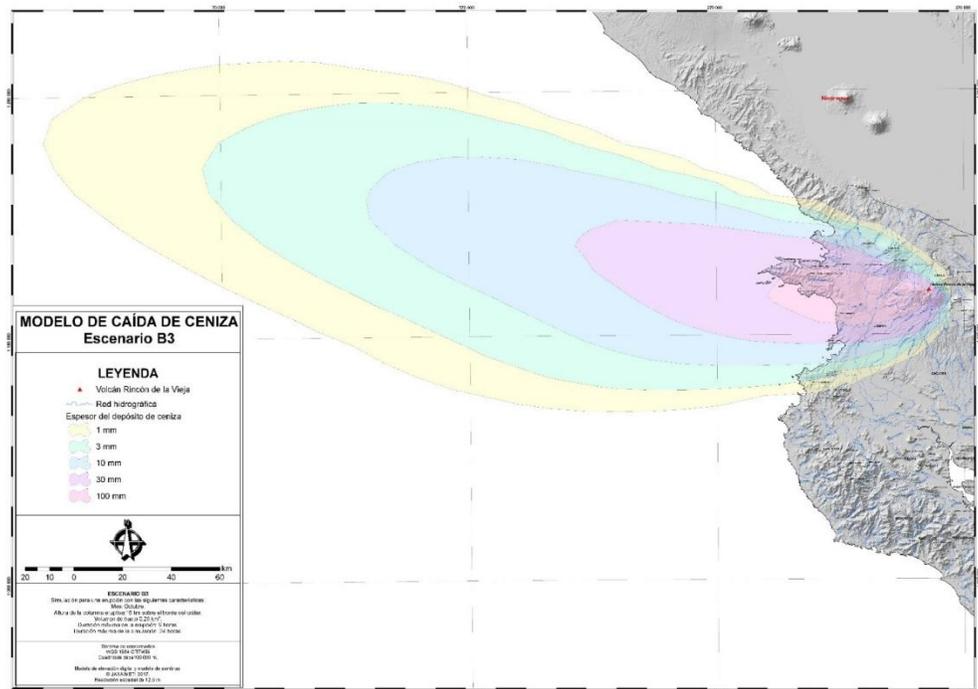


Fig. 6.21: Modelo de caída de piroclastos para una pliniana en octubre (Alpízar, 2018).

Alpízar (2018) combinó los modelos de afectación por caída de ceniza correspondientes a los escenarios B (Fig. 6.22), en un único mapa, que se utilizó como insumo final para su mapa preliminar de peligros volcánicos, esto debido a que el mapa de peligros idealmente debería de considerar cualquier escenario y época del año. En este mapa se consideran espesores para el depósito de entre 3 mm y 300 mm. Los mapas han sido combinados con la finalidad de que el resultado, no se limite exclusivamente al registro geológico, y sea aplicable durante distintas épocas del año, considerando las direcciones predominantes del viento en diferentes épocas. Se observa que la mayor área de afectación está hacia el sector caribeño y sorpresivamente hacia el oriente. Sin embargo, en el campo, no se han encontrado depósitos significativos vulcanianos, pero sí plinianos antiguos (más de 6000 años) en dichos sectores.

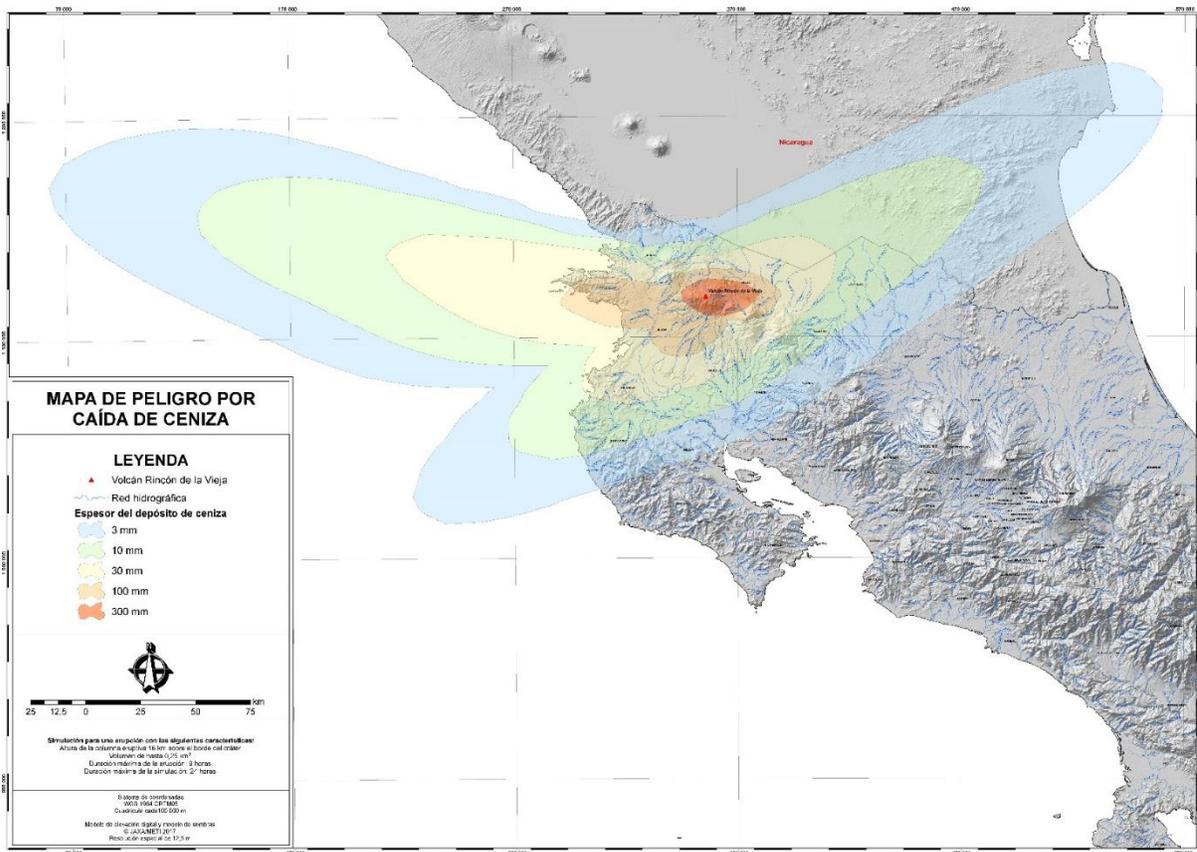


Fig. 6.22: Mapa de los diferentes escenarios eruptivos de peligro por caída de piroclastos durante cualquier época del año asociado con una pliniana (Alpízar, 2018).

6.3.4.2. Modelado vía FALL3D de la erupción pliniana prehistórica de inicios del primer milenio del Rincón de la Vieja

Una altura de columna estimada de 16 km conlleva que su parte baja quede afectada por una estratósfera muy dependiente de la temperatura y su parte más alta, al igual que la sombrilla, se encuentren en la troposfera que depende débilmente de la temperatura y es menos estratificada. De esta muy compleja interacción de la columna con la atmósfera se rescata los siguientes puntos (Alvarado y Fernández, 2001): a) *La troposfera baja, a sotavento de las montañas, no se comporta de igual forma que la troposfera media y alta debido a que los movimientos mesoescalares controlan las capas superficiales de la atmósfera, produciendo anomalías de humedad de signo negativo a sotavento y positivo a barlovento*; b) *la acentuada disminución de la humedad en la troposfera baja en períodos de El Niño*, afectaría la altura final de la columna.

Una limitante similar se tiene al hacerse predicciones de caída de ceniza basadas en los datos de una sola estación meteorológica, colocada en superficie, pues no incluye el hecho de que: *En la estación seca, en que los vientos alisios alcanzan Costa Rica con dirección dominante del noreste y con velocidades que llegan hasta 30 km/h en promedio en febrero, el flujo tiene componente del Este desde superficie hasta 450 mb y a partir de este nivel adquiere componente del Oeste. En la estación lluviosa el flujo tiene componente del Este desde la superficie hasta alturas sobre los 100 mb.* (Ramírez, 1983).

Por último, no hay que olvidar las afectaciones debidas a las termales en la costa, conocidas como IBL (*Internal boundary layer*), considerando que el terreno en esa parte es básicamente plano, lo que nos permite simplificar el problema descartando la estratificación térmica asociada con el flujo superficial de calor sin, por ello, dejar fuera los estudios de Echols y Wagner (1972) describiendo las delgadas IBL que se forman tierra adentro en una zona costera, y la evidencia de una capa más ancha por día comparada con la de la noche. Cuando los flujos de calor superficial cambian a lo largo del borde de dos superficies (como es el caso de la costa) el aire modificado se denomina capa fronteriza interna térmica (TIBL: *thermal internal boundary layer*), que pueden generarse por cambios de albedo, como podría suceder si una gran cantidad de pómez se depositara sobre el mar y fuera transportada a lo largo de la costa (quizá con alguna porción quedándose en la playa). De lo que se sabe, estas observaciones no se encuentran en ningún otro de los trabajos que hemos revisado, y esperamos sirvan para aclarar las observaciones que hacemos a modelos 1D escogidos como base para programas en PC.

Aunque la dispersión de la ceniza volcánica no es un suceso frecuente en nuestro país, tiene un impacto muy fuerte e inmediato cuando llega a ocurrir (afectación grave de las actividades ganaderas y agrícolas, desplazamientos de grandes números de personas, impactos apreciables en la salud y en las actividades manufactureras, entre muchas otras), razón por la cual debemos estar lo mejor preparados para ese momento. Las preparaciones en cuestión deben garantizar que las acciones que se lleguen a tomar reduzcan lo más posible el impacto negativo, por lo que se requiere conocer lo más exactamente posible el proceso en cuestión y su interacción con el ambiente. Para lograrlo se debe recurrir a un análisis científico tan amplio y profundo como lo permita la realidad nacional, lo que requiere que

los datos obtenidos en la academia y el gobierno con fondos de todos sean asequibles democráticamente sin costo y en un formato asequible. Requiere, igualmente, la capacitación científica de cada uno de los ciudadanos para que estén anuentes a seguir los procedimientos establecidos, o bien criticarlos con fundamento cuando no los compartan como corresponde a la crítica entre pares propia de la ciencia.

Los modelos de dispersión de ceniza muestran la distribución resultante de la interacción entre la ceniza y el viento presente al momento de la erupción, con la pluma volcánica generada, ya sea por una fuente puntual (un cráter), como por una extendida, como en el caso de una fisura o una corriente de densidad piroclástica. Si la velocidad vertical de la pluma es sensiblemente mayor a la del viento, la fase inicial evoluciona como una columna boyante vertical, que eventualmente se distribuye lateralmente como una corriente gravitacional alrededor del nivel neutro de boyancia. Esto es lo que se conoce como una pluma fuerte. En el caso contrario, en que la velocidad del viento es mucho mayor que la velocidad vertical de la pluma, esta se curvará gradualmente dando lugar a una columna débil. Que tan lejos alcance cada uno de los piroclastos presentes en la columna dependerá de las características del clasto (textura, densidad, forma), que definen la velocidad de caída y de las velocidades verticales causadas por la turbulencia de los gases presentes en la columna volcánica. En resumen, cada uno de los depósitos de tefra es el resultado de la dinámica de la pluma (la altura, el perfil de velocidades, la vorticidad de las plumas débiles), los parámetros de cada uno de los clastos (textura, densidad, forma), las características de la atmósfera cercana a la columna (campo de velocidades, viscosidad, temperatura y densidad) y del proceso de sedimentación (Bursik, 2001).

Segundo máximo: En Aguilar y Alvarado (2000) se reporta un segundo máximo a unos 20 km de la fuente en dirección oeste. En las simulaciones también se genera un segundo máximo, pero a unos 70 km NW de la fuente, que se cree que indica que las condiciones iniciales son algo diferentes a las prevalecientes al momento de la erupción prehistórica, sea el patrón de viento adoptado, la altura de columna, las granulometrías, entre otros. Kempter et al. (1996) sugieren que fue causado por una capa de viento más rápida que la inmediata inferior, y que termina de extraer los gruesos que no fueron extraídos por la primera capa. Ese segundo máximo tiene como mínimo 20 kg m^{-2} , que con una densidad de 1000 kg m^{-3} equivale a un espesor de 2 cm en acuerdo con los resultados mostrados en Bonadonna y Costa (2013) en su figura 9.5 para subplinianas.

Como una primera explicación, las simulaciones sugieren que ese segundo máximo no es producto de la precipitación sino más bien de una extracción eólica por la interacción de dos capas con velocidades diferentes sobrepuestas, pues aparece en 6 de nuestras 7 simulaciones con el mismo patrón de viento, sea el de las 11 a. m. o de las 3 p. m., pero con diversas granulometrías. Suponiendo que se dio una columna débil que, en lugar de ascender verticalmente, lo hace curvándose hacia el suelo, se esperaría que aumente el número de bloques, lapilli y los gruesos que se desprenden de la parte inferior de la columna, que típicamente se extiende por unas decenas de kilómetros a partir de la fuente. Por ello, las plumas débiles generan depósitos angostos (Bonadonna et al., 2015, p. 533) similares a los que se observan en el mapa generado a partir de la capa ii-sup.

La presencia de 3 lóbulos con direcciones diferentes en el mapa generado a partir de la granulometría de la capa iii sugiere la posibilidad de que para calcular la masa eruptada, se utilicen por razones de accesibilidad solo muestras recolectadas en uno de esos lóbulos, que sería entonces menor a la real. Una posible segunda interpretación se puede lograr al conocerse, en nuestro caso, el perfil en altura de los vientos presentes durante la erupción (Fig. 6.23).

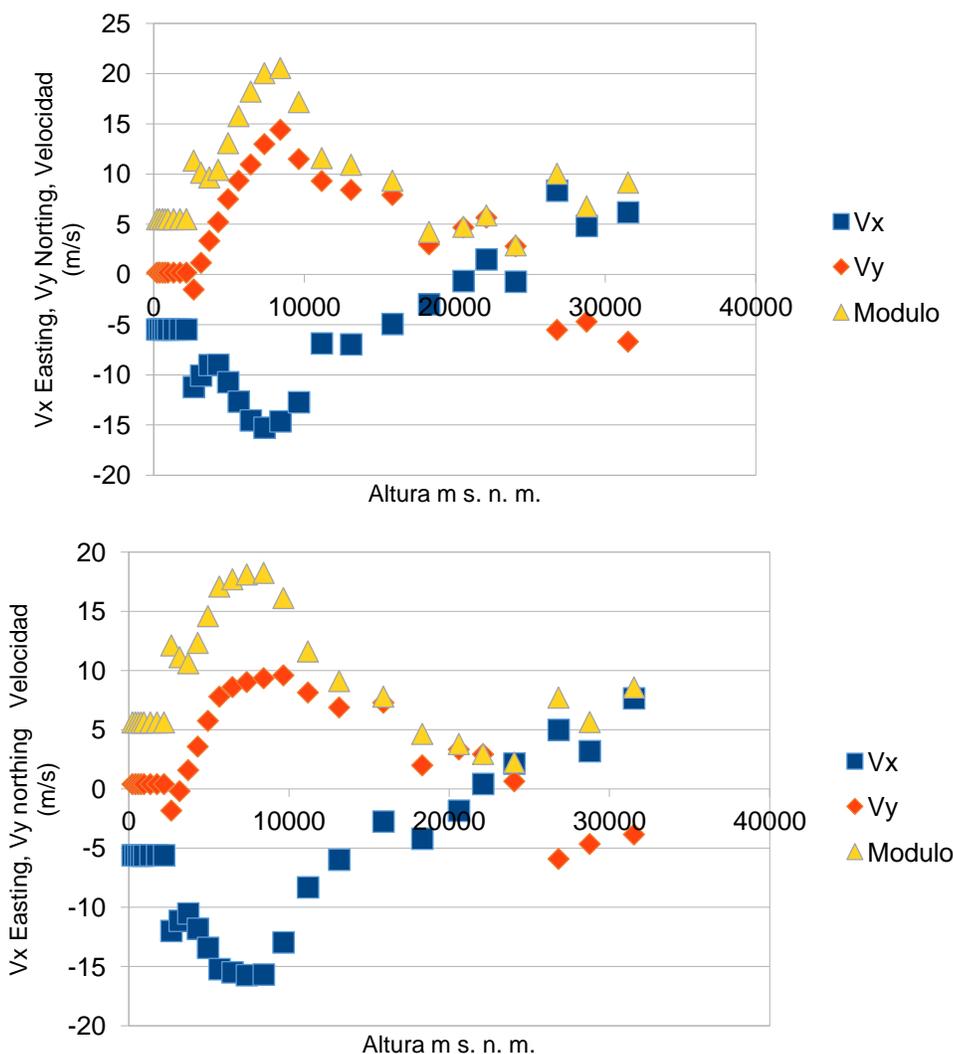


Fig. 6.23: Gráfico en función de la altura de las componentes de viento en dirección E (V_x positivo), N (V_y positivo), y del módulo de la velocidad para las horas 11 a. m. (arriba) y 3 p. m. (abajo) del 28 marzo 2022.

Ya que el cráter Activo volcán tiene una altura de 1700 m s. n. m., y en ambos gráficos se ve que para alturas menores a 2187 m s.n.m. la velocidad es constante (5 m/s), y solo hay componente en dirección W, es razonable proponer que la constancia de la velocidad se debe a que el volcán impide el paso del viento. Por tanto, la consideración de vientos predominantes hacia el W sería válida hasta la altura del cráter, y no más arriba. Para el caso

de las 11 a. m. en la siguiente capa a 2656 m s. n. m., y en el de las 3 p.m. para las 2 capas siguientes (2656 m s. n. m. y 3159 m s. n. m.) se observa que la componente V_y cambia de dirección, como se esperaría según el análisis de la influencia del mar cercano. El efecto es más evidente si se grafican los 6 valores en el mismo gráfico (Fig. 6.24)

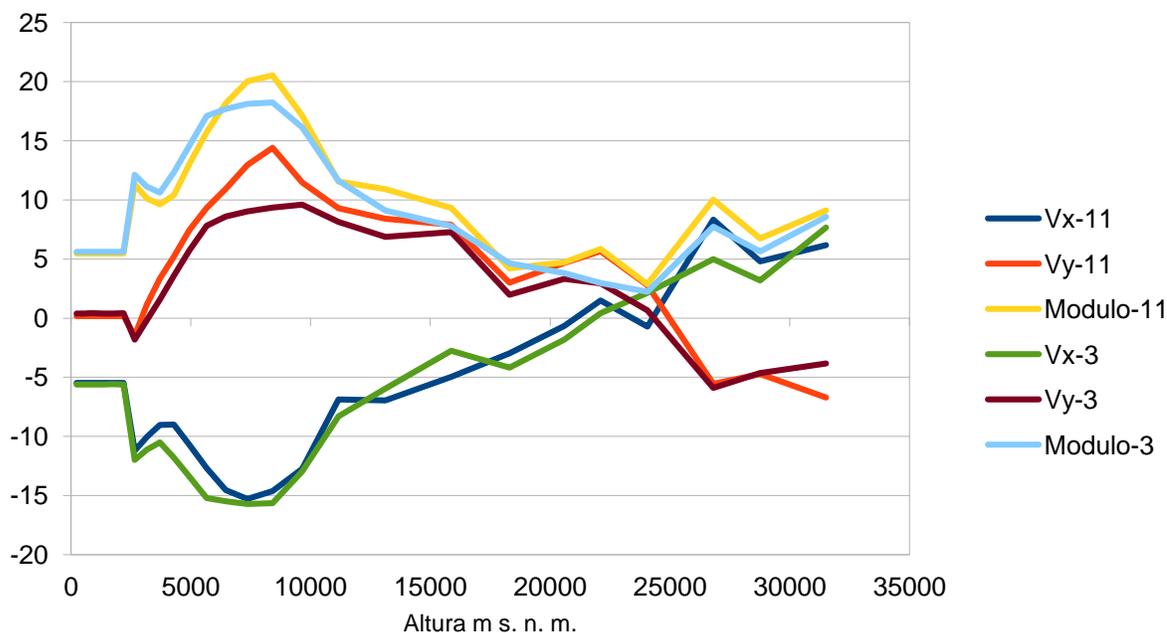


Fig. 6.24: Comparación de las componentes N y E, así como del módulo de velocidad, de las dos horas (11 a. m. y 3 p. m., 28 de marzo del 2022).

Fácilmente se ve que, entre los 3000 m s. n. m. y 6000 m s. n. m., las componentes de velocidad en dirección W para las 3 p. m. es un poco mayor que la correspondiente para las 11 a. m., por lo que se considera es lo que causa de que los primeros 3 lóbulos se alejen de la costa a las 3 p. m. La componente en la dirección N (prácticamente a lo largo de la costa) para las 11 a. m. es mayor que la correspondiente a las 3 p. m., siendo mayor la diferencia alrededor de 8000 m s. n. m. Por lo tanto, los 3 primeros lóbulos corresponderían a material extraído de la columna en ese rango de altura. Se nota que la componente en dirección N es también mayor para alturas de 22 000 m s. n. m., y que más arriba de 25 000 m s. n. m., la corriente de viento invierte la dirección.

Sin embargo, como se acaba de indicar, la validación directa de los resultados de la simulación no puede hacerse al no disponer del patrón de viento durante el mes del evento. Una dificultad adicional es que, tanto el módulo como la dirección del viento quedan afectadas por la cercanía de dos cuerpos de agua, el océano Pacífico y el lago de Nicaragua. Por ello, la validación de los 7 mapas a las 11 a. m. y a las 3 p. m. se hará por analogía con resultados obtenidos para los eventos del Mount St. Hellens (mayo 18, 1980) y días posteriores que, en algunos aspectos semejan la situación bajo estudio con la existencia de dos máximos, una altura máxima de columna de 23 km y una alta producción de pómez (Sarna-Wojcicki et al., 1980; Armienti et al., 1988). También para la erupción de El Chichón,

en México, cuya pluma presenta varios lóbulos (Schneider et al., 1999), como también se dio en la erupción de 1991 del volcán Hudson, Chile (Kratzmann et al., 2010).

Kratzmann et al. (2010) proponen que la variación en el tamaño dominante de las partículas depositadas (entre ceniza fina y lapilli) fue causada por la fuerte variación en dirección de los vientos presentes durante las primeras etapas de la erupción del Hudson. En el caso del Rincón de la Vieja, nuestras simulaciones fueron hechas con patrones de viento en los que la intensidad más que la dirección del viento fue la que cambió, con erupciones con características diversas como lo sugieren las 7 granulometrías correspondientes y con una altura de columna constante de 16 km.

Aunque con un poco de cuidado y paciencia se hubieran podido ajustar los valores iniciales para obtener resultados más acordes con los valores obtenidos en campo, se decidió no hacerlo por 2 razones fundamentales: a) no se tiene manera de conocer el verdadero campo de viento al momento de la erupción, ni las características de las erupciones con el detalle requerido para poder validar nuestra simulación; b) y la variación de todos los parámetros iniciales nos impediría tener una idea del efecto que algunos de esos parámetros puedan tener en lo que se simula.

Para ser coherentes, la caracterización de cada una de las capas, se ha hecho utilizando la moda, la dispersión y el porcentaje en peso de cada una de las subpoblaciones obtenidos por la deconvolución (vía SFT) de las granulometrías correspondientes. En la propuesta de Wohletz et al. (1989), cada una de esas subpoblaciones está representada por una distribución de Weibull cuya moda sería el tamaño representativo correspondiente a un proceso de transporte muy bien definido.

Los parámetros en cuestión se resumen en el Cuadro 6.6, donde Phi es la moda, II-inf son las dispersiones correspondientes y la columna II-inf % son los porcentajes en peso, en este caso de la capa II-inf. Información de importancia se puede obtener al elaborar, a partir de estos datos, varios gráficos. Así, se grafican en porcentajes relativos en peso de cada una de las distribuciones de Weibull, generadas a partir de las 7 granulometrías (Fig. 6.25).

Cuadro 6.6: Parámetros de las distribuciones de Weibull (en su orden moda, dispersión y 5 en peso) asociadas a cada una de las 7 capas bajo análisis.

PHI	II-inf	II-inf%	II-sup	II-sup%	III	III-%	IV-inf	IV-inf%	IV-med	IV-med%	IV-sup	IV-sup%	VI	VI%
-1.84	-0.87	80												
-0.69	-0.42	12												
3.33	-0.43	8												
-2.8			-0.87	83										
0.18			-0.86	11										
3.15			-0.6	7										
-4.4					-0.83	64								
-1.49					-0.82	31								
1.81					0.02	1								
3.34					-0.41	4								
-4.25							-0.66	25						
-2.4							-0.70	60						
-0.7							-0.44	10						
1.75							-0.32	1						
3.35							-0.38	4						
-4.8									-0.78	49				
-1.75									-0.90	25				
2.81									-0.67	8				
3.4									-0.28	18				
-3.89											-0.84	54		
-1.37											-0.78	43		
1.86											0.08	1		
3.05											-0.61	2		
-4.09													-0.77	25
-2.59													-0.50	7
-2.03													-0.96	26
-0.84													-0.81	32
1.46													0.02	3
3.39													-0.30	8

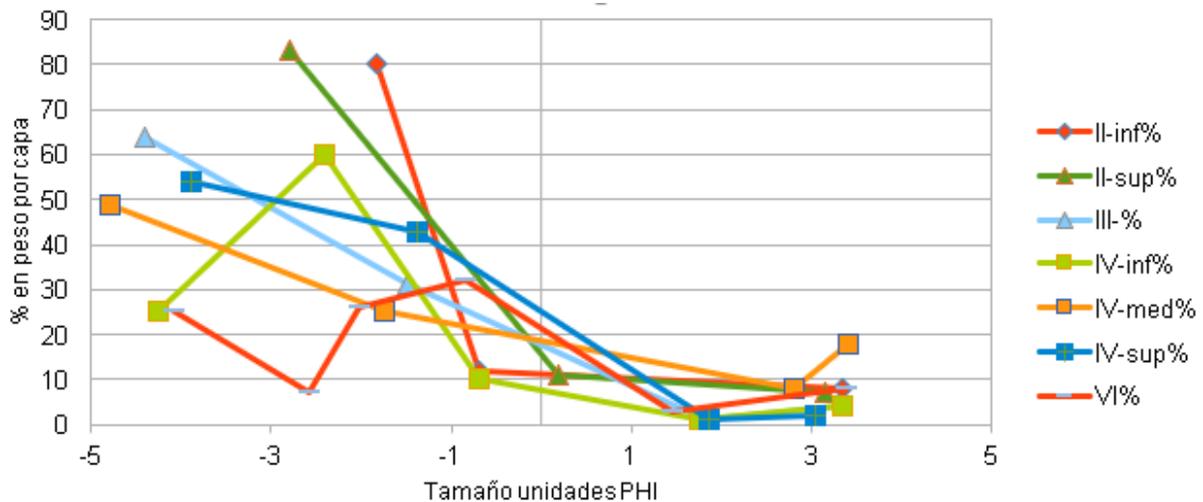


Fig. 6.25: La distribución porcentual de cada moda, según la capa correspondiente.

Según la granulometría de la capa iv-med esta es la que más finos contiene (20 %), por lo que es razonable suponer que son los que llegaron más alto en la columna. Una apreciable proporción del 50 % de gruesos componen el máximo más cercano al cráter, y solo una pequeña parte dan lugar al débil segundo máximo a mayor distancia. Si esto es correcto, la capa iv inf debería mostrar un marcado segundo máximo dado que tiene un 50 % con -4 phi, y un extra de 40 % con alrededor de -1 phi, y prácticamente nada de finos; eso es efectivamente lo que se observa. Por el contrario, la distribución para la iv med casi no tiene un segundo máximo, posiblemente porque tiene un bajo porcentaje de gruesos: un 50 % de la moda más gruesa (-5 phi) y un 20 % de la gruesa (-2 phi), causando que el máximo más cercano a la fuente sea alargado. Además, no solo tiene un 10 % de finos (+3 phi) como los otros, sino también un 20 % con 3.5 phi que al distribuirse en casi toda el área impide distinguir el 4 lóbulo. Este 4 lóbulo sería generado por una corriente de viento aún más alta que las demás, que se mueve en una dirección diferente. Para el Mount St. Hellens se indica la existencia de una situación similar: la distribución de ceniza en el suelo está desplazada hacia el norte en relación con la posición mapeada de la pluma, porque los vientos debajo de la capa de viento de alta velocidad estaban más hacia el norte (Sarna-Wojcicki et al., 1980).

Del gráfico de dispersión versus moda (Fig. 6.26), se observa que las curvas de las capas ii sup y la iv med son muy parecidas, en tanto que las curvas asociadas a las capas iii, iv sup y vi son parecidas en el ámbito de -2 phi a 3 phi. Los mapas asociados a esas capas prácticamente no muestran un segundo máximo.

Por su parte, la distribución por % relativo de peso de cada una de las dispersiones (Fig. 6.27) nos muestra que las erupciones fueron predominantemente magmáticas, pues las dispersiones son menores a -0.5.

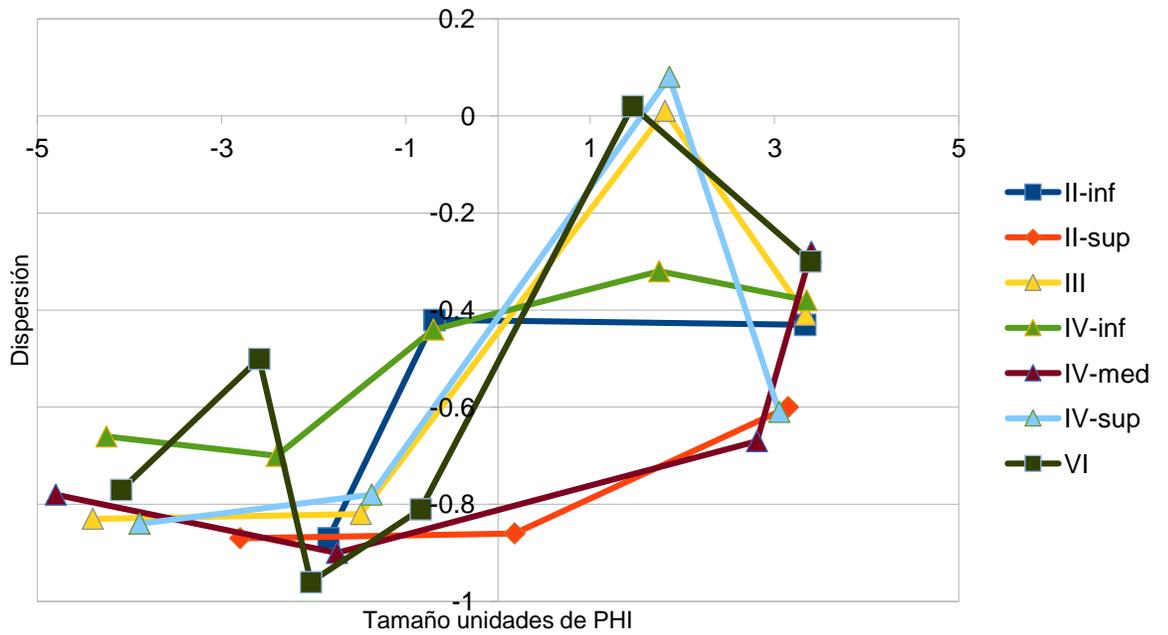


Fig.6.26: Distribución de la dispersión de cada una de las distribuciones de Weibull, asociadas a cada una de las 7 granulometrías.

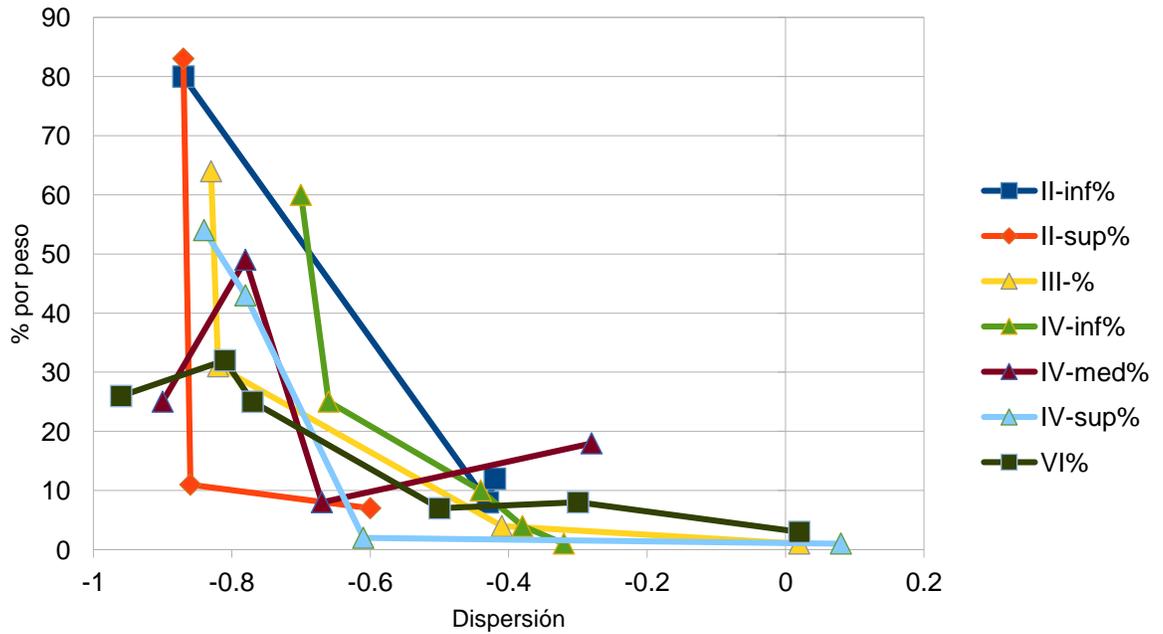


Fig. 6.27: Distribución de las dispersiones según su peso relativo, mostrando que casi un 90 % de las 7 granulometrías están constituidas por clastos de origen magmático (dispersiones menores a -0.5)

El segundo máximo observado en Mount St Hellens se atribuye a la combinación de: 1) una selección brusca dentro de la columna eruptiva vertical, 2) la erupción de material fino sobre la capa de viento de alta velocidad a altitudes de 10 km a 13 km y 3) la deposición de finos a través y debajo de esa capa (Sarna-Wojcicki et al., 1980) propuesta que sugiere procesos de elutriación muy definidos. La deconvolución vía SFT de la capa iv med, por ejemplo, muestra estar constituida por 49 % de clastos con moda de -4.8ϕ y 25 % con moda de -1.75ϕ , es decir, unas tres cuartas partes de la capa está constituida por gruesos que fueron expulsados de la columna por efecto del viento lo que consideramos como una selección brusca pues la mitad es de 32 mm y una cuarta parte es 8 veces menor. Los finos (3.4ϕ) llegarían a lo más alto de la columna (16 km), una altura similar a la de Mount St. Hellens. Según Armienti et al. (1988), la agregación de partículas explica la ocurrencia de un segundo máximo en todo el depósito, pero no su presencia en cada clase definida por la velocidad de deposición (Armienti et al, 1987). Por ello, esos autores sugieren que la presencia de una fracción considerable de masa de la columna, en una capa donde el viento tiene su valor máximo junto con la agregación de las partículas más pequeñas genera el observado segundo máximo. En el caso del Rincón de La Vieja, las 7 granulometrías utilizadas como entrada inicial fueron recolectadas a unos 8 km de distancia de la fuente, por lo que ya incluirían el efecto de esa posible agregación.

Kempton et al. (1996) estimaron que la columna llegó a 16 km de altura, por lo que sobrepasó el límite entre la troposfera y la estratosfera. Por ello, los esfuerzos cortantes del viento rápidamente convirtieron la pluma de un cono vertical que se expandía en una delgada lámina, algo inclinada. La lámina fue elutriada zonalmente en la estratosfera cuando la parte inferior se movía hacia el este a velocidades de jet, mientras la parte superior se movía lentamente hacia el occidente en la región de transición no estacionaria de vientos que se mueven hacia el W a vientos veraniegos hacia el E. En el caso en que alcanzara una altura de 30 km debe incluirse los posibles efectos que causaría la inversión de la dirección del viento a partir de los 25 km, y el incremento del módulo a partir de ese punto.

Modelo fractal de transporte (versión 1.0): El modelo fractal de una erupción volcánica desarrollado, entre otras, en Brenes (2013) es una extensión de la idea desarrollada por Wohletz et al. (1989) de interpretar una granulometría como la suma de varias distribuciones de Weibull, cada una asociada a un proceso de fragmentación, según se presentó en Brown (1988). La pliniana del Rincón de la Vieja permite presentar por primera vez el complemento del modelo fractal de una erupción volcánica, al incluir la parte de transporte. Según Kempton et al. (1996, en su figura 10), el gráfico del logaritmo del espesor de ceniza en función de la distancia a la fuente (Fig. 6.28) está compuesto por dos rectas cuya pendiente cambia alrededor de 4.0 ± 0.8 km. El exceso de material en la sección entre la fuente y ese punto de inflexión ellos lo atribuyen a uno de 2 posibles factores: a) pulsos eruptivos de altitud variable, que depositó material a distancias menores a los 4.0 ± 0.8 km o b) desprendimientos de la periferia de la columna (líticos, balísticos). Se considera difícil explicar cómo en ambas regiones eventos al azar como lo serían los pulsos y los desprendimientos generarían rectas bien definidas, que se cortan aproximadamente a la misma distancia de la fuente. Por ello se piensa que las rectas son producto de procesos de transporte (quizá inicialmente turbulento que luego se transforma en laminar) con características muy definidas por el tamaño de los clastos involucrados.

Esta perspectiva es acorde con las observaciones hechas en Sheridan et al. (1987), de que las modas de las distribuciones de Weibull que se obtenían en las deconvoluciones eran muy similares, a pesar de que las granulometrías provenían de eventos eruptivos muy diversos. Implícita en esta discusión está la idea de que la distribución por tamaño de clastos volcánicos es la firma de los procesos responsables de su formación, la que ha sido demostrada tanto en estudios de campo (Walker, 1971; Sheridan, 1971; Sheridan y Updike, 1975; Carey y Sigurdsson, 1982), como en estudios teóricos y de laboratorio (Anderson y Hallet, 1986; Kranck y Milligan, 1985; Iversen y White, 1982). Se ha escogido la granulometría de la capa iv med para presentar los argumentos de esta nueva manera de análisis pues tanto Kempter et al. (1996) como Aguilar y Alvarado (2020) concuerdan que esa capa posiblemente fue la más explosiva, por lo que es de esperar tanto que los transportes característicos quedarían bien marcado en la granulometría como que la eyección de material fuese continua por un lapso grande de tiempo, lo que nos permitiría suponer que los procesos de transporte llegaron pronto a un estado de equilibrio en el tiempo. Como punto de partida, se acepta la idea de que cada granulometría es la suma ponderada de varios procesos de caracterizados por una distribución de Weibull (Wholetz et al., 1989) con una dispersión que refleja el grado de evolución (número de ciclos de conminución) y una moda que se asocia a un tamaño representativo, pero cada una esas distribuciones de Weibull centradas en cada una de las modas y normalizadas a la unidad son visualizadas como funciones probabilidad continuas en phi, que representen la probabilidad de que una partícula de un cierto tamaño haya sido producida por uno de los procesos de transporte en cuestión. Según el desarrollo del transporte secuencial (Wholetz et al., 1989) la distribución de Weibull tiene la misma forma que la de fragmentación solo que en lugar de la dispersión γ asociada a la fragmentación se utiliza el parámetro g .

Ya que solo se tienen granulometrías recolectadas en un solo sitio se aprovechará la observación de Kempter et al. (1996) de que hay poca pérdida de material al alejarse de la fuente para proponer que $g = \gamma$ en las 4 distribuciones de Weibull obtenidas por deconvolución de la granulometría de la capa iv med. Cada una de esas 4 funciones de Weibull son el producto de dos funciones $F(\phi)$ y $G(\phi)$ multiplicado por un factor de normalización K ,

$$F(\phi) = 2^{-[3(2+\gamma)(\phi - \phi_0)]} \quad H(\phi) = 2^{-[3(1+\gamma)(\phi - \phi_0)]}$$

$$G(\phi) = \exp[-H(\phi)/(1+\gamma)]$$

Los parámetros obtenidos a partir de SFT para la capa iv med se presentan en el Cuadro 6.7. Para analizar el proceso de transporte asociado a cada una de las subpoblaciones evidenciadas, se utilizará la respectiva función de probabilidad $K F(\phi) G(\phi)$ descrita arriba, por lo que, de manera natural, el mapa de caída solo incorporará los clastos con tamaño ϕ que tenga una probabilidad apreciable. Como el programa FALL3D para cada clasto de tamaño ϕ calcula la trayectoria sin ser afectada por ningún otro clasto, el proceso de transporte queda incorporado por los parámetros de la distribución de Weibull calculados a partir de datos de campo. Los resultados obtenidos para cada una de las 4 distribuciones de Weibull con las modas de -4.8 phi (superior izquierda), -1.75 ph (superior derecha), 2.81 phi (inferior izquierda, y 3,4 phi (inferior derecha) generados con el patrón de vientos de las 11 a. m., se pueden observar de modo gráfico (Fig. 6.29).

Cuadro 6.7: Valores de la moda φ_0 y la dispersión γ asociadas a cada una de las distribuciones que sumadas, ponderadas con el porcentaje respectivo, generan la granulometría en cuestión. El factor K es el producto de la constante de normalización por el porcentaje correspondiente.

Moda φ_0	Dispersión γ	Porcentaje	Integral	Normalización K	Capa
-4,8	-0,78	49	0,0554/2	17,684	1
-1,75	-0,9	25	0,000349/2	1432,664	2
2,81	-0,67	8	0,203/2	0,76812	3
3,4	-0,28	18	0,7514/2	0,4791	4

La constante de normalización se obtuvo aproximando la integral por la regla del trapecio, con valores de medio phi, una aproximación bastante buena como se aprecia al comparar la deconvolución vía SFT con la suma propuesta en este trabajo.

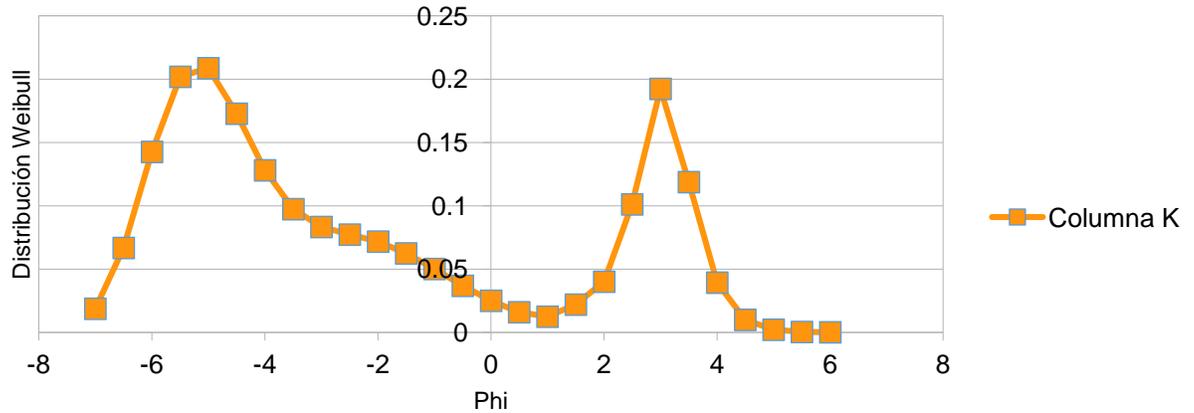
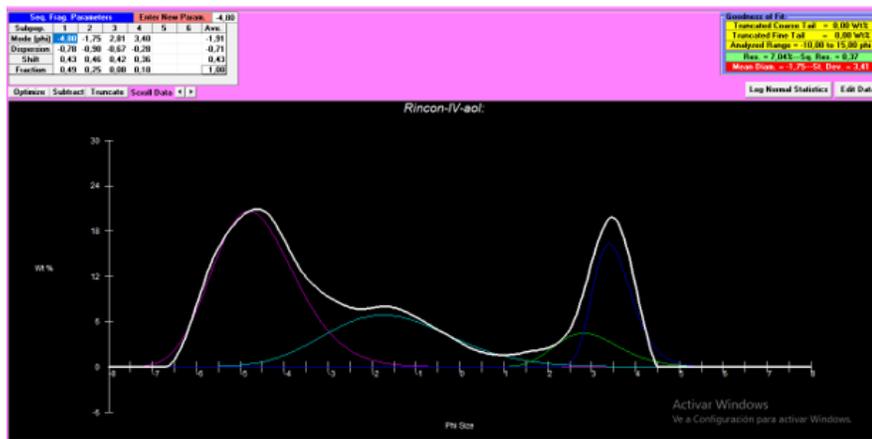


Fig.6.28: Arriba la deconvolución usando SFT y abajo la granulometría reconstruida por el proceso propuesto por los autores (capa iv-med, 4 subpoblaciones), que son muy similares, lo que confirma la escogencia de los parámetros.

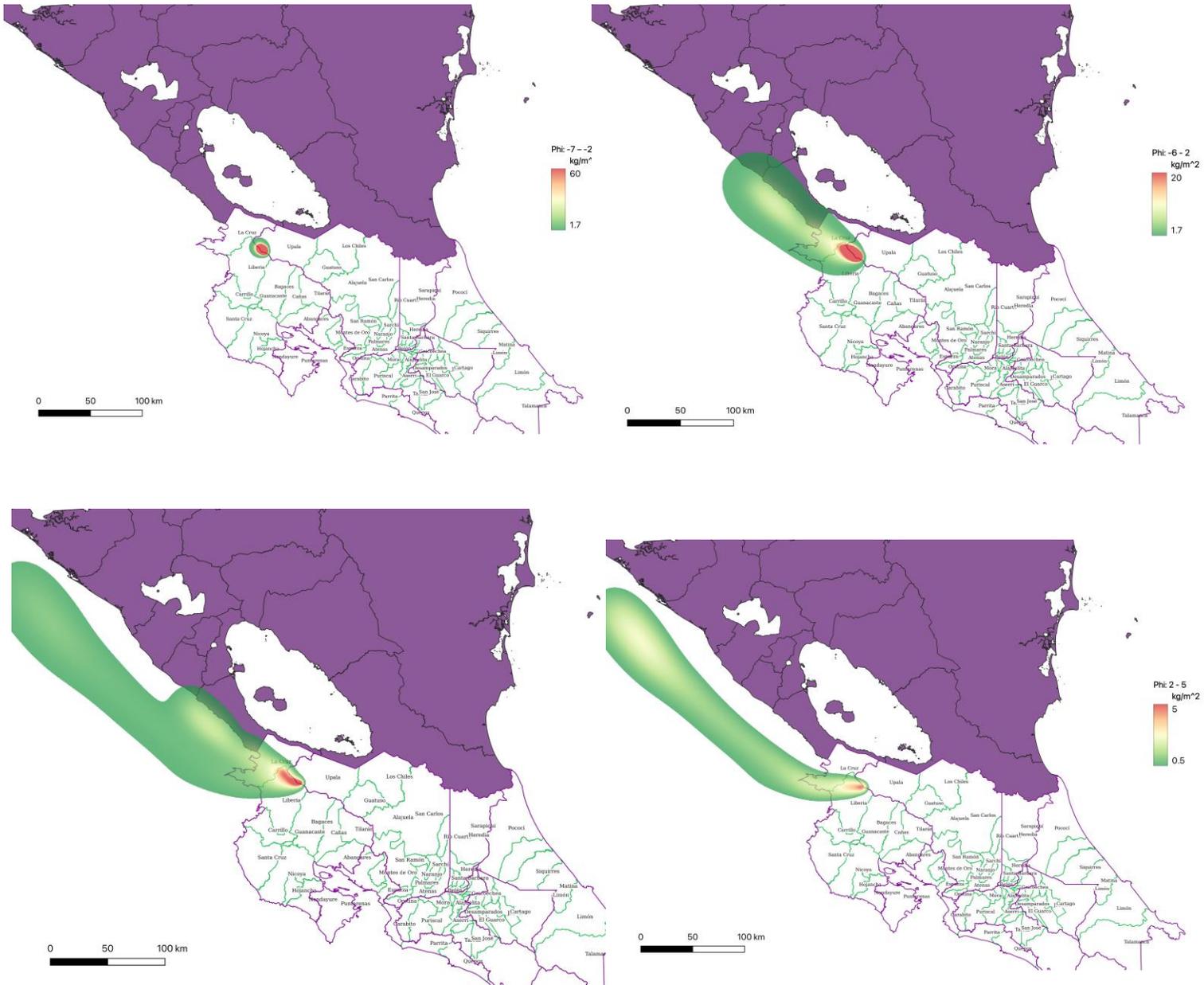


Fig. 6.29. Los mapas corresponden a la moda de -4.8 phi (superior izquierda), -1.75 ph (superior derecha), 2.81 phi (inferior izquierda, y 3.4 phi (inferior derecha) generados con el patrón de vientos a las 11 a. m.

Wohletz et al. (1989) asocian los procesos de transporte a moda ϕ_0 según la siguiente convención: balística (clastos mayores a -4ϕ), tracción (clastos entre -4ϕ y 1ϕ), saltación (clastos entre 1ϕ y 4ϕ), y suspensión (clastos menores a 4ϕ), una clasificación que no es aceptado por todos. Pero los -4ϕ son apenas 1.6 cm que no sería necesariamente caída, por lo que puede ser por cualquier tipo de transporte. De hecho, en la misma publicación se incorpora una deconvolución, de una muestra de una oleada del volcán Ukinrek en que las primeras dos subpoblaciones (modas -3.5ϕ y -2.73ϕ) se asocian a transporte balístico en lugar de tracción, como hubiera correspondido. Las siguientes dos subpoblaciones (modas 0.31ϕ y 0.38ϕ) son asociadas a tracción como correspondería, pero no se está cumpliendo con la condición de que cada proceso de transporte debe estar asociado a solo una subpoblación. Como se observa en la deconvolución que se incluye en este trabajo, la primera y segunda subpoblación se sobreponen en el rango de -5ϕ a -1ϕ , que incluye tamaños asociados a probabilidades significativas de hasta 6 % lo que dificulta asociar rangos de tamaño muy bien definidos para cada transporte. Al ser esta la primera vez que se analiza el proceso de transporte desde esta perspectiva, se prefiere que las asociaciones sean, por el momento, provisionales.

El mapa de la esquina superior izquierda corresponde a clastos de tamaño característico de -4.8ϕ , que caen muy cerca del cráter. La zona roja corresponde a 60 kg m^{-2} , o sea espesores de 0.6 m, tomando una densidad de 1000 kg m^{-3} (Fig. 6.30). Aunque según Wohletz et al (1989) estos clastos se habrían desprendido de la columna o bien de la pluma, nos inclinamos por clasificarlos como producto de tracción ya que los parámetros iniciales de la distribución de Weibull fueron obtenidos de una muestra recolectada a unos 5 km del cráter, quizá una mezcla de procesos balístico y de tracción, sea por movimiento en la ladera o bien por una oleada generada por la expansión violenta de gases en el cráter. El mapa superior derecho, correspondería a clastos de tamaño característico de -1.75ϕ , que tocaron el suelo en algún lugar más cercano a la fuente y luego se transportaron por tracción. La zona roja corresponde a 20 kg m^{-2} , o sea espesores de 0.2 m, tomando una densidad de 1000 kg m^{-3} . El mapa inferior izquierdo correspondería a clastos de tamaño característico de 2.81ϕ . Los dos lóbulos que se evidencian sobre el terreno sugieren que los clastos que la componen tuvieron una distribución vertical muy amplia mientras estuvieron en la columna, de manera que fueron transportados por dos capas de viento de velocidades y direcciones diferentes, tocando suelo en lugares diferentes para luego ser transportados por saltación. Cada lóbulo está asociado a una capa de viento con velocidad diferente: el lóbulo más largo se asocia a una capa más rápida. La zona roja correspondiente a 20 kg m^{-2} , o sea espesores máximos de 0.2 m, tomando una densidad de 1000 kg m^{-3} . La saltación se da a nivel de suelo en el caso de oleadas o flujos piroclásticos o por remobilización eólica a nivel de suelo. El mapa inferior derecho muestra los clastos con tamaño característico de 3.4ϕ , que según Wohletz et al. (1989) habrían sido movilizados por saltación. Sin embargo, el patrón de caída es el de una corriente de aire que primero viajó perpendicular a la costa para luego rotar y alinearse con ella, como es de esperarse en una capa fronteriza interna térmica (TIBL) generada por flujos de calor superficial que cambian a lo largo del borde de dos superficies (como es el caso de una costa). Por ello, en este trabajo se asocia a un transporte por suspensión (Fig. 6.30).

Al ser esta la primera vez que se lleva a cabo un análisis desde esta perspectiva, y considerando que la clasificación dada por Wohletz et al. (1989) tiene sus contradicciones, incluiremos aquí los parámetros de Inman y de Folk por completitud (Cuadro 6.8). Resulta

importante recalcar que al sumar los 4 mapas anteriores (Fig. 6.31), generados con un tamaño variable escogido al azar, resulta muy similar al que se generó usando la granulometría (valores enteros de phi) obtenidos de la granulometría original (Fig. 6.28), que corrobora la coherencia del método.

Cuadro 6.8: Parámetros de Inmann, columna 2 la moda y 3 la dispersión, y de Folck, columna 4 la moda, 5 la dispersión, 6 la skewness, y 7 la kurtosis para las 7 capas.

Capa	M_ϕ	σ	M_ϕ	σ	Skewness	Kurtosis
ii-inf	-1,37	1,38	-1,41	1,72	-0,02	1,41
ii-sup	-2,32	1,8	-2,05	1,99	0,13	1,29
iii	-3,39	1,98	-3,12	2,02	0,25	0,96
iv-inf	-2,44	1,52	-2,43	1,63	0,02	1,19
iv-med	-3,0	4,13	-1,62	3,51	1,69	0,59
iv-sup	-2,5	1,83	-2,54	1,67	-0,06	0,77
vi	-1,69	2,41	-1,6	2,46	-0,05	1,04

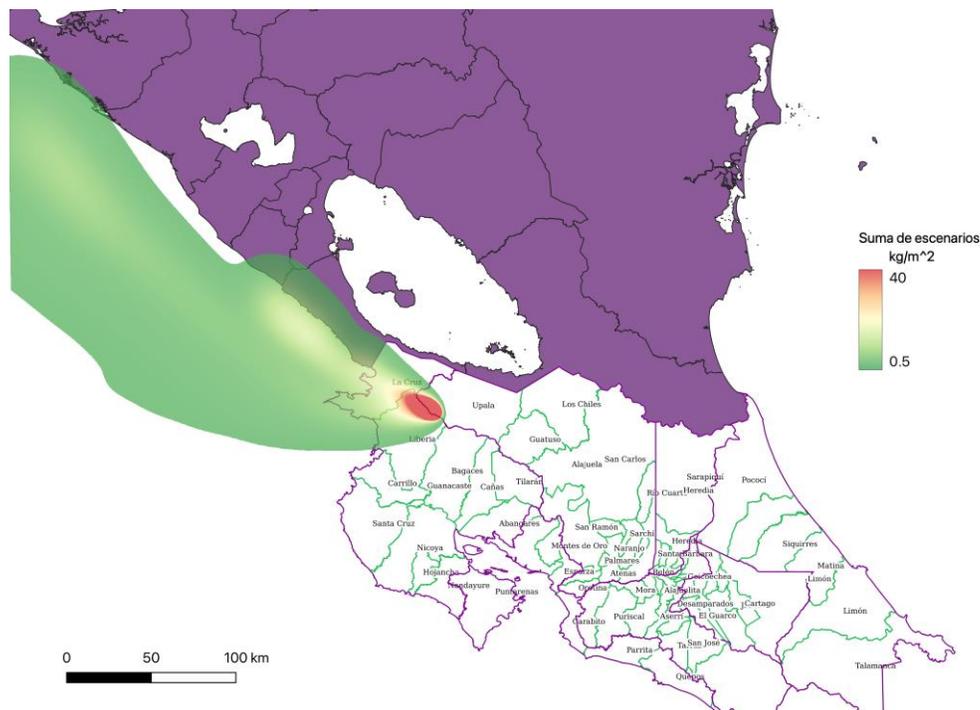


Fig. 6.30: Suma de los 4 mapas generados vía FALL3D con clastos de tamaño variable escogido al azar, utilizando las distribuciones de Weibull.

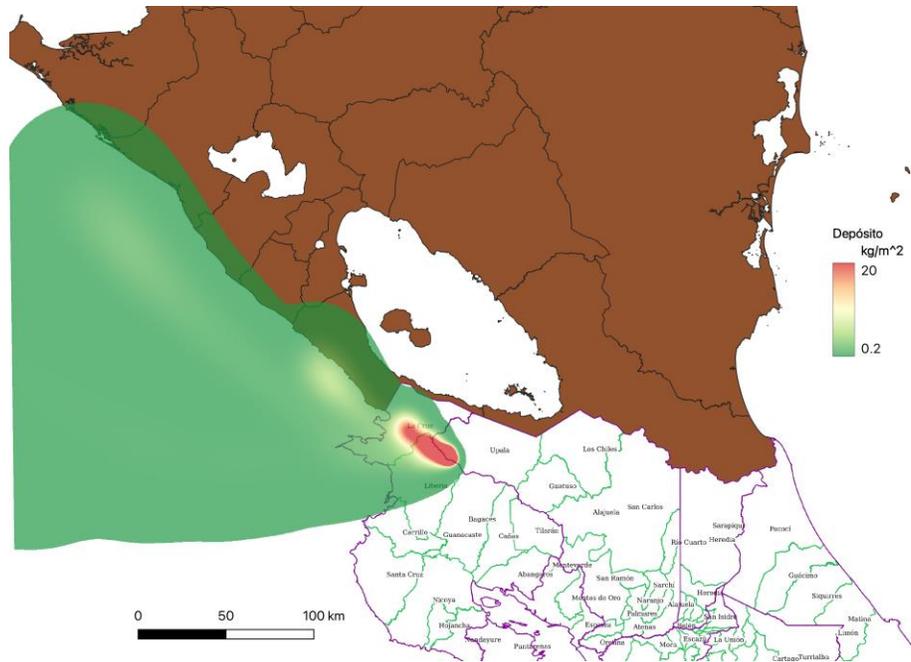


Fig. 6.31: Mapa de caída de ceniza generado vía FALL3D con la granulometría (en enteros de phi) de muestra recolectada en el campo.

Las ventajas que se obtienen al generar los mapas de caída con esta nueva metodología:

1- Como deducen Wohletz et al. (1989) a partir de consideraciones físicas, el proceso de fragmentación genera distribuciones de Weibull que, aunque parecidas en forma a las distribuciones gaussianas generalmente usadas, permiten asociarles una dimensión fractal

2- La granulometría original de la capa iv med está definida en el ámbito -7ϕ a 4ϕ , lo que implicaría un total de 23 puntos de poder obtenerse en unidades de medio phi. Ese gran número de puntos conlleva requerirse poco más de 10 horas de supercómputo para generar el mapa, con el agravante de no poder discriminar los efectos de un proceso particular de transporte. Como alternativa, al proponer usar las 4 distribuciones de Weibull asociadas, por definición a un determinado proceso de transporte, no solo se ahorra tiempo de supercómputo, sino que también cada mapa resultante muestra el efecto de ese proceso en particular

3- Un ejemplo de esa especificidad es el hecho que el segundo máximo solo aparece con la distribución de moda $-1,75\phi$, asociado a tracción. En la simulación no se activó la posibilidad de que los clastos se agregaran, lo que sugiere que el segundo máximo es producto de la orografía y los vientos presentes durante la erupción

4- Nótese que esta nueva perspectiva incorpora la topografía local, permitiendo no solo establecer un área de peligro más real que el círculo de un radio pre-establecido que suele indicarse en la literatura, (Fig. 6.32) sino también una valoración más real de la posible amenaza.



Fig. 6.32: Ampliación del área calculada a partir de la moda de -4ϕ , que destaca la proporción relativa de las 3 áreas de peligrosidad: roja, amarilla y verde.

6.3.4.3. Aspectos para considerar por el peligro volcánico por la caída de piroclastos

Las cenizas constituyen, dentro de los peligros volcánicos directos, el de mayor alcance, estableciendo una amenaza para la vida debido a su peso en los techos, a las partículas en suspensión en el aire y el agua (ríos y lagos), al transporte de gases nocivos, ácidos y sales, así como al enterramiento que producen de los cultivos. Entre los efectos más frecuentes de las cenizas, se registran la muerte o la quema parcial o total de los bosques y los sembradíos (Fig. 6.33 y 6.34), incluyendo sus productos agrícolas, así como los efectos en los animales (fauna silvestre, ganadería, animales domésticos).

La exposición a las cenizas trae consigo la aparición de problemas médicos en humanos y animales, agravándose las dolencias respiratorias y las alergias (Ortiz, 1996), así como problemas gastrointestinales y óseos. En los seres humanos, las cenizas están relacionadas con la aparición de bronquitis y asma, además de exacerbar enfermedades pulmonares y cardiovasculares crónicas, así como alergias. Las partículas mayores a $10 \mu\text{m}$ generalmente se filtran en la nariz (hasta en un 98 %) y en la garganta, por lo que causan problemas como irritación en las vías respiratorias superiores (Fig. 6.33). Pero aquel material particulado (partículas finas sólidas suspendidas en el aire) con diámetros inferiores ($\leq \text{PM}_{10}$ o PM_{10}) se clasifican como torácicas y respirables, siendo bastante tóxicas aquellas con diámetros aerodinámicos menores de 4 micrómetros, en especial aquellas inferiores a 2.5 micras (μm , $\leq \text{PM}_{2.5}$ o $\text{PM}_{2.5}$). Estos tamaños son uno de los principales determinantes para que estas entren hasta los alveolos pulmonares, constituyéndose en partículas respirables las cuales pueden penetrar y alojarse en el interior profundo de los bronquios y en los pulmones y, de ahí, al torrente sanguíneo, tanto en los seres humanos como en los animales, por lo que, pueden causar problemas serios de salud. Así, cuando el ambiente se satura en gases, cenizas y aerosoles extremadamente finos, las personas pueden iniciar la inhalación y la respiración de partículas, permitiendo el paso directamente a las vías respiratorias inferiores, lo que conlleva al potencial aumento de desarrollar cardiopatías y neumopatías como el del asma, la bronquitis, la hipertensión arterial, entre otros posibles problemas cardiovasculares, así como la probabilidad de desarrollar cáncer de pulmón (Horwell y Baxter, 2006).

Dado lo anterior, lo recomendable es protegerse con sombreros, camisas de manga larga, anteojos con protección lateral (tipo industrial) para proteger los ojos, así como mascarillas faciales (tapabocas o cubrebocas) del tipo NIOSH N95 o FFP2 NR (EN 149: 2001), o aquella que recomiende el Ministerio de Salud, diseñadas para filtrar las partículas finas y neutralizar. No se recomienda el uso de las mascarillas quirúrgicas, porque son mucho más delgadas y no cuentan con material filtrante eficiente. Los centros educativos, alberges de ancianos son los que hay que prestarles particular atención, pero, en general, la población.

Pese a ello, con o sin máscara, si se siente irritación por los gases, lo recomendable es alejarse del lugar inmediatamente. Las personas con problemas respiratorios, alergias, niños y adultos mayores o con condición física baja, no deben de exponerse a condiciones de este tipo. En general, la prolongada exposición a los gases volcánicos es uno de los factores que produce lo que los médicos denominan estrés oxidativo, lo cual afecta a los seres humanos y animales de diversas maneras, por lo que hay que prestar particular atención a las poblaciones bajo la influencia de la polución volcánica y, particularmente, los guardaparques.

La caída significativa de ceniza contaminará temporalmente las fuentes de agua natural y acueductos. La magnitud de los cambios en el agua tiene una estrecha relación con el tamaño del cuerpo de agua y la cantidad de ceniza que caiga. Se debe tener en cuenta que la contaminación de ríos y quebradas poseen un mayor riesgo por su área expuesta, por lo mismo, se espera que los cuerpos de agua pequeños, más cercanos al volcán, sean los más afectados. Los principales problemas se relacionan con los cambios químicos que pueden producir las cenizas y la sedimentación que estas partículas dejan en el agua. Si hay una significativa caída de ceniza, el agua para consumo de los animales probablemente será escasa. Las fuentes naturales de agua y piletas construidas pueden permanecer temporalmente contaminados y los equipos de bombeo pueden ser dañados por las partículas de roca abrasivas. Se recomienda cubrir con lonas pueden proporcionar una protección. Por lo anterior, la restauración de calidad de los suministros de agua para el ganado suele ser una alta prioridad, si el ganado ha de permanecer en los terrenos afectados por la caída de cenizas.

A ello se le debe agregar la contaminación de los ríos y las fuentes de agua e incluso interrupción del abastecimiento del agua, la obstrucción de filtros y tuberías, los problemas con la disposición de aguas servidas y la inhabilitación temporal de los sistemas de alcantarillados, por lo que se puede incrementar el riesgo de enfermedades en las áreas afectadas. La ceniza puede alterar las características organolépticas (sabor, olor y color) del agua. Este líquido vital puede contaminarse con flúor, metales pesados (aluminio, cobre, arsénico), lo que provoca intoxicación. Aunque en primera instancia no impide su consumo, si se debe velar por la composición química del agua, para lo cual se recomienda periódicamente controlar el grado de acidez y los contenidos de Al, Cu, Fe, Mn, F, As, B, Mn, V y Rn, entre otros, para comprobar que sea apta para el consumo humano por periodos prolongados. En otros casos, se puede dar enfermedades gastrointestinales, que pueden llevar a la muerte en personas crónicas (Stewart et al., 2006).

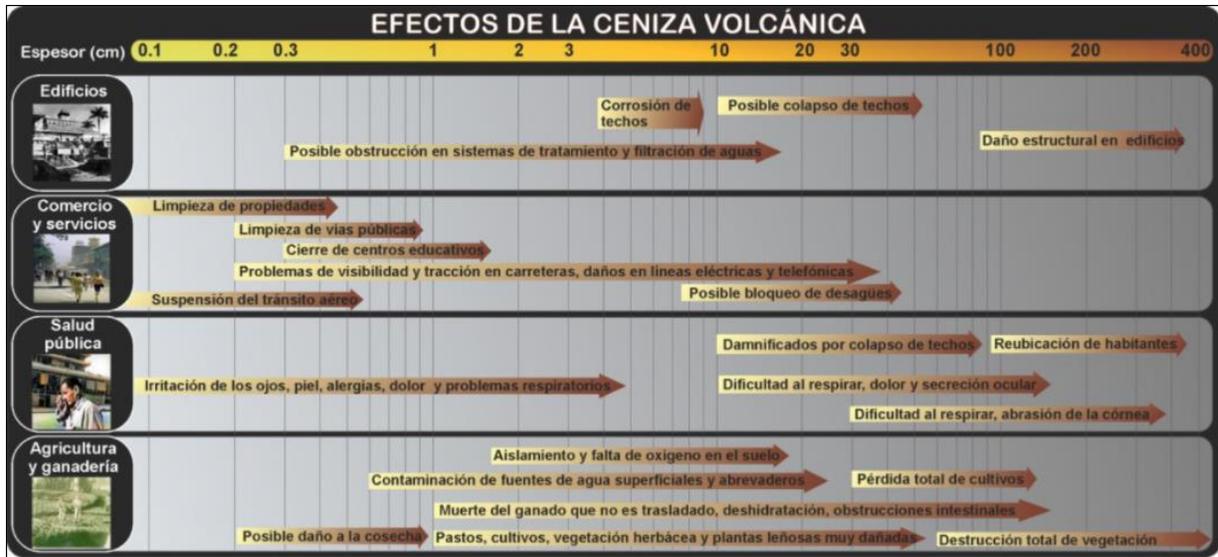


Fig. 6.33: Efectos de la ceniza volcánica (basado en <http://volcanoes.usgs.gov/ash/agric/> y PAT, 2018) modificado y adaptado a casos costarricenses.

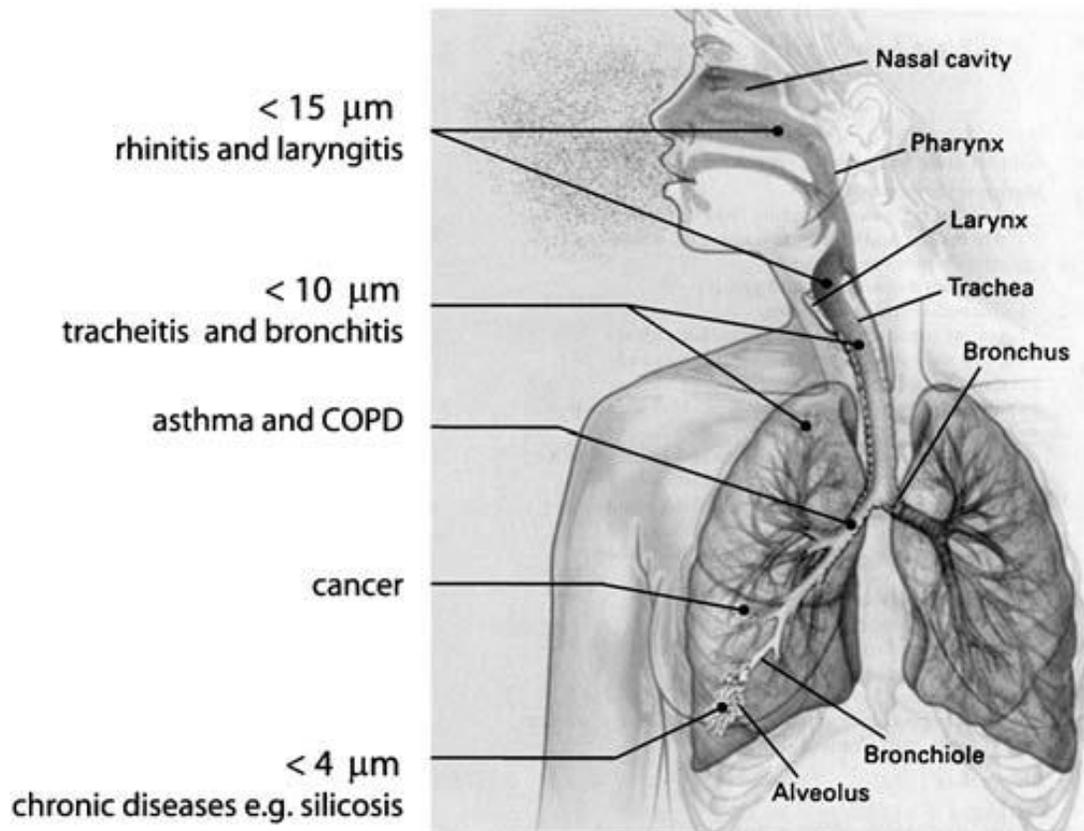


Fig. 6.34: Diagrama de los pulmones humanos donde se muestra su anatomía y las vías respiratorias, así como la penetración de las partículas de cenizas según sus diámetros aerodinámicos y el potencial peligro asociado (Modificado de Beckett, 2000, según Horwell y Baxter, 2006).

Las cenizas finas pueden presentar problemas por poseer un enorme poder de abrasión y pH de 2 a 4.5, lo que se puede traducir en daños por capacidad en los equipos electrónicos y electromecánicos, incluyendo las computadoras y pueden permanecer mucho tiempo y ser constantemente removidas por el viento. De estos sobresale los efectos en la aviación, puesto que el viento transporta la fracción de partículas más finas de las cenizas a mayores distancias y puede poner en serio peligro a la navegación aérea y cerrar el tránsito aéreo en los aeropuertos por prevención, trayendo cuantiosas pérdidas económicas (Ortiz, 1996; Ortiz y Araña, 1996).

El efecto que las cenizas tienen en la salud humana y sobre los animales ha sido un tema poco abarcado en Costa Rica. Quizá los primeros trabajos científicos se realizaron con la erupción del Irazú entre 1963 y 1965. Los principales efectos epidemiológicos fueron conjuntivitis aguda, irritación de las vías respiratorias (laringitis) y cuadros acelerados de bronquitis (exacerbación de estados bronquiales) y asma, así como de neumoconiosis desarrollada y solo dos casos comprobados de dermatitis por contacto (Horton y McCaldin, 1964; Solano, 1964).

Otro aspecto hasta hace poco debidamente contemplado en la comunidad científica sobre la peligrosidad de las cenizas es su remobilización por el viento una vez depositadas. Esta remobilización eólica también puede tener impactos en la salud (Jarvis et al., 2020).

Las cenizas, a su vez, son altamente conductoras, por lo que a mayor cantidad de humedad (especialmente cuando posean gran cantidad de minerales de alteración y sales) y compactación, su resistividad será menor, por lo que aumentará la conductividad (≤ 164 ohm-m a 214 ohm-m), con ello, la posibilidad de un cortocircuito o salto de corriente. Un aumento de la conductividad eléctrica puede provocar daños en los sistemas de distribución de energía, tales como cortos circuitos en las líneas de transmisión (efectos en los transformadores, arcos aislantes), así como alteraciones en los campos magnéticos que dificultan las telecomunicaciones. La interrupción de la conducción de electricidad puede disparar y repercutir en una serie de eventos en cascada perjudiciales en los usuarios, tales como daños a la salud por falta de fluido eléctrico para preservar los alimentos, efectos a otras instalaciones de infraestructura que dependen de la electricidad para su adecuado funcionamiento, tales como las lecherías, el turismo, etcétera (Wardman *et al.*, 2011, 2012, 2014; Scaini et al., 2014; Wilson et al., 2012).

Dentro del marco de todo lo anterior, los cuadros 6.9 y 6.10 presentan de manera sinóptica los efectos en Costa Rica ocasionados por la caída de cenizas (mayoritariamente asociadas con erupciones vulcanianas) en las diversas actividades socioeconómicas, líneas vitales y la salud durante el siglo XX y parte del XXI. Sin embargo, no se incluyen dentro de los efectos en la economía ni en las soluciones, la desviación o el aporte de recursos para brindar soluciones, tales como los programas de asistencia agropecuaria con financiamiento local e internacional, asesoría, subsidios, créditos, indemnizaciones o la condenación de deudas, así como la reubicación (personas, animales), o bien, las donaciones nacionales e internacionales.

Cuadro 6.9: Efecto de las cenizas en la economía agropecuaria durante las erupciones en Costa Rica (1963-2020) y sus soluciones técnicas (basado en Horton y McCaldin, 1964; Murata et al., 1966; Parsons, 1967; Ruiz y Jiménez, 1968; Wille y Fuentes, 1975; Hilje y Saunders, 2008; Aguilar y Alvarado, 2014; Alvarado et al., 2016a; Coto-Cedeño, 2019). Dentro de las inversiones y soluciones no se incluyen los programas de asistencia agropecuaria con financiamiento local e internacional, donativos, asesoría, subsidios, créditos, indemnizaciones o la condenación de deudas, así como la reubicación.

Actividad	Causas directas	Efectos en la economía	Soluciones
Agricultura: papa, cebolla, cebollín, repollo, coliflor, zanahoria, brócoli, hortalizas, café, algodón, granos básicos, maíz, tabaco, caña de azúcar y tomate.	La ceniza destruyó grandes extensiones de terrenos cultivables. Impidió la fotosíntesis y un desequilibrio en la fisiología de las plantas por la alteración de la fijación del carbono. Aumento de las plagas como áfido amarillo (<i>Sipha flava</i>) en la caña de azúcar; en el algodón el mal del talluelo (<i>Rhizoctonia solani</i>), el perforador de la hoja (<i>Bucculatrix thuberiella</i>), áfidos (<i>Aphis gossypii</i>) y escarabajos (<i>Anthonomus grandis</i>); en el café la cochinilla harinosa (<i>Planococcus citri</i>), el gusano minador de hojas (<i>Leucoptera coffella</i>), la araña roja (<i>Oligonychus yothersi</i>), las escamas (<i>Coccidae</i>) y el pulgón (<i>Toxoptera citricida</i>).	Disminución en las cosechas o pérdidas de los cultivos. Suministros de diversos tipos para paliar con la crisis. Desempleo.	Introducción de insectos depredadores como la vaquita (<i>Cryptolaemus monstrouzeri</i>) y el abejón (<i>Strethorus</i> sp.) en el café. Uso intensivo de agroquímicos (insecticidas: Malathión, Diazinón, Phorato y Lannate). Eliminación de las cenizas a través de bombas de motos de agua y máquinas sopladoras. Cubrir ciertos cultivos con plásticos. Medidas para generar nuevas fuentes de trabajo. Suministro de agua en camiones cisterna.
Pastizales y ganadería	La ingesta de cenizas en grandes cantidades provoca irritación intestinal, diarreas, úlceras, parálisis caquéxica, abortos y la muerte. Embate de la plaga baba de culebra (<i>Prosapia distanti</i>) en el kikuyo. Los pastos de piso y especialmente el kikuyo son los menos afectados; los más afectados son los de corte, el imperial, el guate y el gigante. Aglomeración no deseable del ganado transportado a otros lugares. Enfermedades por perturbaciones nutricionales causadas por llevar los animales aclimatados a gran altitud a las llanuras bajas.	Disminución en la producción de leche, precio del producto en el mercado y desabastecimiento parcial en algunas regiones. El ganado que, por edad, mala condición de la ubre, problemas de esterilidad o enfermedad, fueron sacrificados. Pérdidas en productos de origen animal. Desempleo. Suministros de diversos tipos para paliar con la crisis.	Fortalecimiento de los controles veterinarios, las medidas de higiene de los hatos. Campañas de vacunación y suministro de medicamentos al ganado enfermo. Limpieza de ojos, nariz y lomo de los animales. Aporte de mezcla de concentrado, melaza, pacas, suplementos alimenticios (probióticos y aditamentos). Equipos de sopladoras y bombas de motor para eliminar las cenizas. Techado de abrevaderos, lavado de los potreros, sellado de las entradas de aire en los establos y galerones. Entabular el ganado. En casos extremos, el traslado de los animales. Suministro de agua en cisternas.

Cuadro 6.10: Efecto de las cenizas en la población y servicios durante las erupciones en Costa Rica (1963-2020) y sus soluciones técnicas (Horton y McCaldin, 1964; SNAA, 1964; Solano, 1964; Miller, 1966; Parsons, 1967; Aguilar y Alvarado, 2014; Alvarado et al., 2016a). Dentro de los efectos en la economía y soluciones no se incluyen el apoyo local e internacional (donativos, asesoría, subsidios, créditos, indemnizaciones o la condenación de deudas), así como la reubicación de personas.

Actividad	Causas directas	Efectos en la economía	Soluciones
Salud pública	Ardor de los ojos, conjuntivitis aguda. Dolencias respiratorias (irritación e inflamación de la garganta y nariz, tos seca); las afecciones de los bronquios aparecían particularmente en personas con bronquitis crónica y enfermedad torácica previa. Asma, neumoconiosis. Irritación de la piel, alergias y rara dermatitis por contacto. Centro de educación cerrados temporalmente.	Algunas incapacidades. Evacuaciones, refugiados, damnificados y creación de albergues. Atención en Ebais.	Uso de modos de protección improvisados y medicados. Permanencia en lugares cerrados. Uso mascarillas nasobucales (tipo NIOSH N95 o EN 149: 2001), para filtrar las partículas finas.
Tendido eléctrico	Corto circuito en el fluido eléctrico; efecto directo en el alumbrado y ordeño mecánico del ganado de leche.	Pérdidas en la economía local y en el cobro de la electricidad. Mantenimiento extra y sustitución de aisladores y transformadores.	Lavado del aislamiento, colocación de mangueras aislantes en los conductores; sustitución de los transformadores con el incremento en el aislamiento. Ordeño del ganado de leche en forma manual.
Agua	El agua incrementó en su uso durante los días de mayor caída de ceniza, debido al lavado de ropa, techos, viviendas y vehículos. Aumento en la turbiedad, sedimentación y efectos directos en los filtros en plantas de tratamiento de agua potable. Descenso en el pH haciéndola corrosiva y un aumento en la dureza total, lo que dio problemas en la industria y en la saponificación, así como en los contenidos en hierro, superando los permisibles.	La eficiencia de los filtros se iba deteriorando conforme la temporada de lluvias avanzaba, debido a lo enumerado previamente. Las plantas de captación y tratamiento del agua para hacerla potable se encontraron con el problema de mantener el agua captada y la tratada en reservorios abiertos a la atmósfera contaminándose con la caída de ceniza.	Aumento en la demanda de cloro, que obligó a duplicarla con el fin de mantener el residual a 0.5 ppm en los tanques de almacenamiento. Se ideó un método para regenerar las capas filtrantes colmatadas, dividiendo el lecho filtrante en secciones y cambiando la arena de cada una de ellas. Se ensayó con agua floculada a base de sulfato de aluminio y cal, con gran éxito.
Infraestructura	Cobertura de los techos, canoas, tanques recolectores de agua y calles. Las canoas se llegaron a bloquear y colapsar.	Compra de barredoras y mayor cantidad de empleados para limpiar las cenizas y maquinaria para el traslado.	Limpieza de techos, calles, pistas de aeropuertos. Contratación de personas para la limpieza. Se aconseja construir techos con inclinaciones superiores a los 20°; preferiblemente unos 35°, y con materiales de construcción adecuados. Además, proteger los techos con pintura anticorrosiva y limpiarlos de ceniza con mucho cuidado de caída o de no interactuar con cables con corriente eléctrica.
Tráfico aéreo	Cierre temporal del tránsito aéreo y desvío de vuelos. Trastornos en las reservaciones y contratos. Depósito de ceniza en las pistas de los aeropuertos.	Pérdidas por el cierre del tránsito aéreo, desvío de vuelos, compensación económica de los vuelos, cancelación de hoteles y tours, servicios indirectos (restaurantes, tiendas).	Limpieza rudimentaria de las pistas y uso de un aeropuerto alterno.

Los mapas de caída de ceniza usualmente son uno de los componentes de los mapas de peligro, al ser sobrepuestos a otras capas como ciudades, hospitales, entre otros, se puede estimar ciertos aspectos que van a influir en el riesgo. En el presente estudio se llevó a cabo ese ejercicio con algunas capas.

Al sobreponer la caída a las 11 a. m. con la capa de los aeropuertos locales (Fig. 6.35) se observa que la mayoría podría seguir operando, a pesar de la cercanía con la fuente eruptiva, permitiendo el transporte aéreo de posibles afectados, y la traída de equipo y suministros para posibles albergues.

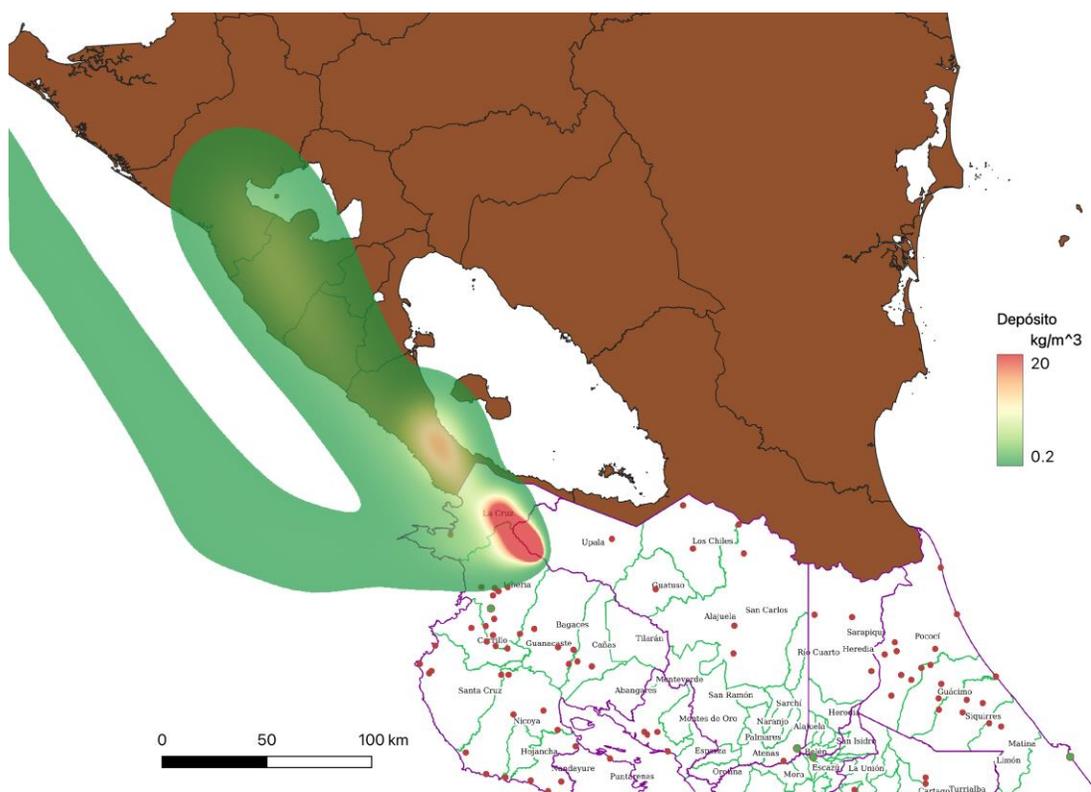


Fig. 6.35: Sobreposición del patrón de caída para las 11 a. m. con la capa de los aeropuertos locales.

Tabla 5: Efectos provocados por la caída de ceniza en los sistemas de energía eléctrica del PG Borinquen (adaptado de Heiken et al., 1995; Wardman et al., 2012).

Etapas	Plazo	Problema	Posibles soluciones
Construcción y operación	Mediano - largo	Gran acumulación de cenizas (más de 15 cm), especialmente si está húmeda, provoca el colapso de techos no reforzados de concreto.	Retirar la ceniza de los techos. Hay que trabajar con cuidado ya que la ceniza húmeda es muy resbaladiza. Retirar la acumulación de cenizas de las proximidades de edificios. Fijar las cenizas para evitar futuras removilización por el viento y disminuir el contenido en polvo del aire.
Construcción y operación	Corto - largo	Vehículos inmovilizados: atasco en los filtros de aire, aceite o combustible. Pérdida de la visibilidad del conductor por la caída de la ceniza o por acumulación de la misma en el parabrisas.	Importante reserva de filtros. Utilizar un sistema de pre-filtro. Cambiar el aceite frecuentemente. No mover el vehículo si no es por razón de emergencia.
Construcción y operación	Mediano - largo	Elevado contenido en polvo volcánico en el aire. Problemas oculares y pulmonares.	Los trabajadores deben llevar máscaras antipartículas. La ceniza debe estabilizarse para evitar que su removilización siga dañando los sistemas.
Operación	Mediano - largo	Acumulación de ceniza seca en los sistemas de distribución, especialmente aisladores.	Limpiar con chorro de aire y cepillos. Vientos superiores a 40 km/h remueven hasta el 95% de la ceniza siempre que esta se mantenga seca.
Operación	Mediano - largo	Acumulación de ceniza húmeda. Las condiciones meteorológicas durante la caída de cenizas gobiernan la adherencia de la ceniza a las superficies y su conductividad eléctrica. Una capa de ceniza de solo 0,3 - 0,6 mg/cm ² que en la normativa IEEE corresponde a una grave contaminación, producen daños importantes en las líneas de 115 kV. Los aisladores de resina EPOXI resultan especialmente vulnerables.	Una lluvia intensa remueve 2/3 del depósito. Se recomienda el empleo de aisladores de porcelana en toda la zona de posible caída de las cenizas. Hay que limpiar cuidadosamente la ceniza de los transformadores y aisladores de las subestaciones. En ellas es conveniente disponer de un sistema de chorro de aire a presión.
Operación	Mediano - largo	Gran acumulación de cenizas en la grava del parque de maniobras de una subestación provoca una pérdida importante de aislamiento (100 Ohm/m) haciendo muy peligrosa cualquier operación.	Recubrir el suelo con una nueva capa de grava limpia.
Operación	Mediano - largo	Caída de árboles sobre las líneas de alta tensión debido al peso de la ceniza.	Mantener adecuadamente la limpieza del entorno de la línea de alta tensión
Operación	Mediano - largo	Atascos en los filtros de los sistemas de ventilación de las computadoras y sistemas de control.	En zonas de riesgo hay que disponer de un número extra de filtros de aire.
Operación	Mediano - largo	Problemas en los sistemas de aire comprimido	Cambiar frecuentemente los filtros.
Operación	Mediano - largo	Sobrecarga en los ventiladores de los transformadores debido a la acumulación de ceniza.	Limpiar cuidadosamente las palas de los ventiladores. La ceniza húmeda es muy difícil de remover y suele exigir una limpieza a fondo.
Operación	Mediano - largo	Incremento del ruido inducido por las líneas de alta tensión (500 kV) alcanzando valores de 39-48 dB.	No hay remedio.
Operación	Corto - largo	Daños en actuadores hidráulicos, rodamientos, interruptores, etc. Las cenizas volcánicas son muy abrasivas.	Limpiar y lubricar el material expuesto frecuentemente.
Operación	Mediano - largo	La caída de la ceniza provoca oscuridad. El encendido imprevisto y rápido de los sistemas de alumbrado origina un pico en la demanda de energía que sobrecarga el sistema.	Anuncios por radio y TV para que la población ahorre energía.
Operación	Largo	Fuerte erosión en los álabes de las turbinas de los generadores.	En general la caída de cenizas es lo suficientemente excepcional para no plantear un problema.

Cuadro 6.11: Eventuales efectos provocados por la caída de ceniza en los sistemas de energía eléctrica (tomado de Soto, 2013).

6.3.5 proyectiles balísticos

Al ocurrir una explosión en el cráter, los fragmentos de roca (particularmente las bombas y los bloques) son lanzados a alta velocidad por los aires para luego caer en la superficie del terreno en pocos segundos a decenas de segundos, pueden alcanzar distancias de varios centenares de metros a kilómetros con una velocidad capaz de herir e incluso matar a personas y animales, o bien causar daños estructurales, buenas razones para estudiarlos.

Debido a que estos proyectiles siguen generalmente una trayectoria parabólica, similar a una bala de cañón, se les denomina proyectiles balísticos. La palabra tiene su origen en el griego que significa lanzar, adoptada por un arma romana de asedio, la ballista o balista, que lanzaba un proyectil o una flecha.

La trayectoria de un proyectil lanzado desde un cañón sigue una curva definida por una ecuación diferencial ordinaria que se deriva de la segunda ley de Newton. La ciencia de la balística se ha perfeccionado para comprender los proyectiles con fines bélicos y la criminología forense y al vulcanismo, por lo que hay sub-ramas en la balística de armas (Robinson, 1943; Corner, 1950; Campos, 2010; Cambres, 2015), acá adaptadas a la balística volcánica:

1. *Balística interior*: Estudia los procesos que se producen en el interior del volcán, es decir, aquellos procesos que impulsan al proyectil y su forma y estado reológico.
2. *Balística intermedia*: Estudia los procesos que ocurren en las proximidades de la boca (velocidad de salida), desde que la onda de choque primaria sale por la boca hasta que los gases y cenizas propulsantes, originados lo abandonan y dejan de impulsar al proyectil.
3. *Balística exterior*: Estudia las trayectorias y los efectos perturbadores del medio ambiente (viento) sobre el proyectil y el transporte y forma del proyectil (bamboleo, Magnus “chanfle”, forma, textura, efecto Coriolis, arrastre tanto en régimen de Stokes como Newtoniano) desde que abandona la boca (velocidad de salida) hasta que hace blanco (velocidad de llegada), o bien, a partir de este punto continúa con velocidad constante hasta finalmente impactar (velocidad terminal).
4. *Balística terminal y sus efectos (balística de efectos)*: Estudia los efectos causados por el choque del proyectil contra un cuerpo dado (daños, potencia de penetración y destrucción) hasta que el proyectil queda en reposo.

5. *Balística forense*: Estudia y aplica los conocimientos balísticos para el esclarecimiento de lo acontecido (procedencia, velocidad, energía, entre otros) con el proyectil y sus efectos (cráter de impacto, estructura de deformación, daños).

Soto et al. (2003a, b), indican que a distancias de hasta 1 km del cráter activo se han observado bloques de más de 1 m de diámetro, mientras que fragmentos de 5 cm han alcanzado hasta 8 km de distancia. Históricamente, se tiene registro de bombas y bloques que han caído hasta a 800 m del borde del cráter. En el caso particular de este volcán, es común que ocurran erupciones freáticas o freatomagmáticas de forma esporádica y repentina, cuyo impacto se restringe a los alrededores del cráter activo. Ante estas erupciones, las comunidades más cercanas al volcán no se suelen ver afectadas, pero debido a las condiciones hostiles de la topografía en este sector, que la visibilidad en la cima en muchas ocasiones es nula por causa de los gases, y a la casi total ausencia de lugares para resguardarse, el peligro de sufrir daños por impacto de bloques o bombas para quienes se encuentren en la cima o sus alrededores es muy alto.

El mapa de peligros muestra que en general, en un radio de 2 km a 5 km desde el cráter activo se puede dar afectación por balística. En el caso específico de las obras geotérmicas, la probabilidad que se vea afectado por balística es muy baja a nula (Fig. 6.36).

Fig. 6.36: Amenaza volcánica por balística. (Falta)

6.3.6 Terremotos volcánicos

Los sismos que acompañan a la actividad volcánica suelen ser menores en magnitud que los no volcánicos (llamados tectónicos). Los sismos volcánicos por lo general poseen hipocentros poco profundos (profundidades < 10 km), con un radio de daño menor (< 5 km) en el caso de los volcanotectónicos, aunque posiblemente la intensidad superficial sea alta, por lo que en ciertas ocasiones sí pueden causar daños considerables en infraestructura y deslizamientos. Pueden ocurrir antes, durante o después de una erupción volcánica. Las máximas magnitudes hasta el momento de un terremoto volcánico son de M_w 7.1 a 7.75, aunque claramente son raras o poco frecuentes (Zobin, 2001; White y McCausland, 2016).

Eventos más grandes que M_w 7.75 suelen corresponder con sismos relacionados con grandes fallas límites de placas (fallas transformantes y zonas de subducción), que actuaron como disparadores de la actividad eruptiva a distancia (p. ej., Williams y Self, 1983), aunque no necesariamente son eventos por movilidad directa de magma, es decir, volcanotectónicos en el sentido estricto de la palabra.

En general, un terremoto puede, bajo ciertas circunstancias particulares, disparar una erupción volcánica y viceversa, una erupción volcánica puede provocar un terremoto al momento o varios años después. El terremoto puede promover una erupción por diferentes causas, como pueden ser los cambios de los esfuerzos y el estrés tectónico a los que está sometida el reservorio magmático, en particular si el sistema estaba metaestable (es decir, próximo o cercano a erupcionar), o donde las fallas pueden facilitar el ascenso del magma, o donde la perturbación sísmica puede favorecer una sobrepresión de los volátiles, al cerrar y abrir vías, en función de la orientación de las fracturas. Pero en general, los sismos locales o regionales rara vez disparan, o a lo sumo promueven las erupciones volcánicas, si las condiciones preestablecidas son favorables para ello (Alvarado et al., 2007; Bonali et al., 2013; Seropian et al., 2021, y referencias allí incluidas).

En el otro sentido, una erupción o la actividad volcánica puede desencadenar un terremoto, incluso varios años después, dado que puede afectar la tectónica regional, más si ya estaba cerca del período de ruptura (Williams y Self, 1983; Alvarado et al., 2007).

En Costa Rica, la erupción de 1723 del Irazú estuvo acompañada de varios sismos volcánicos, el mayor de ellos con magnitud $M_w \sim 5.1$ a 5.6, recalculada con base en estimaciones de m_b , M_s y M_L (Alvarado y Schmincke, 2013). Para la erupción del Arenal de 1968, el mayor evento tuvo una magnitud M_w 5.1 medida instrumentalmente y relacionada con un enjambre de sismos volcánicos (Zobin, 2001).

En el caso concreto del Rincón de la Vieja se tienen dos casos documentados. El primero asociado con el terremoto de San Casimiro u Orotina (4 de marzo de 1924, M_s 7.0), donde el 20 de marzo e inicios de abril (*Diario de Costa Rica*, 25-III-1924; 11-IV-1924) se habla de una actividad eruptiva fuera de lo normal en el volcán (Montero, 1999). Otro caso estuvo relacionado con el sismo de Bijagua identificó un aumento en la sismicidad local luego del sismo de Las Armenias de Upala del 12 de julio del 2011 (M_w 5.3; Taylor et al., 2012), donde el Rincón de la Vieja inicia una nueva fase eruptiva el 22 de agosto y el 9-16 de setiembre de ese mismo año (la última erupción desde julio del 2003; Bakkar, 2017).

Las fallas volcanotectónicas alrededor del Rincón de la Vieja poseen un potencial de generar sismos de magnitud máxima estimada M_w 6.5, que pueden generar aceleraciones importantes en el campo cercano o incluso mayores a 1 g en el campo cercano y disparar deslizamientos. Pero más importante aún, es que el Rincón de la Vieja posee el potencial de que, ante un evento sísmico local o regional, pueda promover una erupción si el magma está cerca de la superficie, dado que además posee un sistema hidrotermal que puede desarrollar una sobrepresión advectiva, situación en la que se puede establecer si se aplica el cuadro 2 del trabajo de Seropian et al. (2021).

Aunque la compresión en profundidad puede desfavorecer el ascenso de magmas, si el magma está en superficie, la compresión en profundidad genera esfuerzos tensionales en superficie que, aunado a las fallas de rumbo, pueden favorecer el ascenso de volúmenes limitados de magma, los cuales eventualmente pueden desembocar en una erupción.

En general, la previsión o preparación que hay que tomar ante un sismo volcánico de magnitud intermedia ($5.0 < M_w \leq 6.5$) es la misma que la de un sismo tectónico, es decir, se debe de velar por el adecuado diseño de la infraestructura en general siguiendo la normativa del código sísmico vigente, así como las normativas de construcción y edificación en lugares estables, para que no sean afectados por un deslizamiento o crecidas de los ríos.

6.3.8 Formación de nuevos cráteres y conos

A lo largo de sistemas de fallamiento cortical profundo (p. ej., fallas o fisuras) existe la posibilidad de formación de nuevos cráteres, conos piroclásticos, derrames de lava y eventualmente grandes volcanes.

Aunque el conducto central o cráter Principal ha sido la vía principal de ascenso preferencial del magma en tiempo histórico y al menos en los últimos 2 000 años, la geomorfología sugiere que otros focos han estado activos en el Holoceno (últimos 11 000 años). En efecto, en el volcán Rincón de la Vieja está establecido una zona de debilidad fisural doble E-W donde se han formado los cráteres activos y dormidos, así como los conos y cráteres secundarios o satelitales. La probabilidad de formación de un nuevo foco eruptivo en el corto plazo es muy baja, pero no nula y en tal caso, el peligro asociado sería similar al que representa el estadio eruptivo de los últimos miles de años.

6.4 AMENAZAS VOLCÁNICAS INDIRECTAS

Se entiende por aquella incidencia potencial que no está relacionada directamente con la actividad, sino que suelen ser un resultado indirecto o posterior a un evento volcánico directo. De los trabajos anteriores y de la reevaluación de la peligrosidad se puede deducir, de modo integral, lo siguiente:

6.4.1 Lluvia ácida

Se considera que el agua de una lluvia es fisicoquímicamente normal cuando no presenta contaminación por actividades industriales o naturales y está en equilibrio con el CO_2 atmosférico a una concentración y presión normal, por lo que es levemente ácida debido a la formación de ácido carbónico (pH alrededor de 5.6). Sin embargo, los gases volcánicos y los aerosoles (coloides de partículas sólidas o líquidas suspendidas) cáusticos que se escapan hacia la atmósfera, reaccionan con el agua de los ríos y los lagos para formar ácidos, o pueden reaccionar con la humedad de la atmósfera, que actúa como núcleos de condensación, para producir lluvia ácida (pH < 5.65). Así el dióxido de azufre (SO_2) forma ácido sulfúrico (H_2SO_4), el sulfuro de hidrógeno (H_2S) reacciona y forma un hidroácido llamado ácido sulfhídrico (H_2S), el cloruro de hidrógeno forma el ácido clorhídrico (HCl), el fluoruro de hidrógeno el ácido fluorhídrico (HF) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) reacciona con el agua forma ácido nítrico (HNO_3). La precipitación llega a formar ácidos fuertes de gran impacto en el ambiente, así como ácido carbónico y otros ácidos débiles, de impacto menor. Todos ellos ocasionan corrosión, daños a la vegetación y, aún en concentraciones muy bajas, son nocivos para los ojos, piel y el sistema respiratorio de humanos y animales.

Sobre los efectos de la lluvia ácida en las erupciones pasadas del Rincón de la Vieja prácticamente no hay nada documentado, dado que, la principal atención eran los efectos de las cenizas. Pese a ello, resulta claro que, en las erupciones recientes y mejor documentadas del Arenal, Poás y Turrialba, sí se han presentado efectos de la lluvia ácida, por lo anterior, se hará una introducción general de los mismos.

La precipitación ácida puede acelerar la lixiviación de nutrientes y metales pesados del suelo forestal y afectar el follaje de los árboles; en el ser humano pueden producirse molestias en la piel y ojos e irritaciones intestinales, principalmente en niños y ancianos; sin embargo, no provoca daños irreversibles si se atiende a tiempo.

Aunque existen pocos reportes de lluvia ácida y gases, su extensión y efectos no son para nada claros, por ello, se realizó una estimación. La peligrosidad por lluvia ácida precipitada en los suelos alrededor del volcán, principalmente debido al SO_2 fue estimada (Fig. 6.37). El área verde muestra los posibles lugares con baja afectación, en donde se tendría un alcance de hasta 30 km a la redonda del volcán. La zona más afectada por la lluvia ácida sería a 10 km. Las zonas de Dos Ríos, Finca Nueva Zelandia, El Gavilán, Curubandé y Quebrada Grande tendrían una afectación baja. El cuadro 6.12 muestra la peligrosidad según la magnitud de la erupción presentada en el volcán, además de los posibles efectos y síntomas que podría tener la población con la exposición a la lluvia ácida generada por las reacciones químicas y la solubilización de las sustancias emitidas por el volcán durante las erupciones.



Fig. 6.39: Mapa de peligrosidad por lluvia ácida debido a las emisiones del volcán Rincón de la Vieja.

Cuadro 6.12: Determinación de la frecuencia (F) eruptiva y su período de retorno (Pr) para definir los niveles de amenaza.

Período	Frecuencia	F	Pr	Ejemplos
Milenario	Muy baja	F ₀	5000 años a 10 000 años	Acidificación de suelos Muerte de árboles Muerte de arbustos de mediano tamaño Lavado de metales solubles en el suelo Muerte de plantas pequeñas Muerte del suelo
Milenario	Muy baja	F ₁	1000 años a 5000 años	Acidificación de suelos Muerte de árboles Muerte de arbustos de mediano tamaño Lavado de metales solubles en el suelo Muerte de plantas pequeñas
Milenario	Baja	F ₂	500 años a 1000 años	Acidificación de suelos Muerte de árboles Muerte de arbustos de mediano tamaño Lavado de metales solubles en el suelo
Centenario	Moderada	F ₃	100 años a 500 años	Acidificación de suelos Muerte de árboles Muerte de arbustos de mediano tamaño
Anual y Decadal	Muy alta	F ₄	10 años a 50 años	Acidificación de suelos Muerte de árboles
Anual a Decenal	Muy alta (actividad cuasipermanente)	F ₅	1 años a 10 años	Acidificación de suelos

6.4.2 Avalancha de escombros volcánica y deslizamientos

El colapso lateral del flanco de un volcán (conocido también como sector colapso, colapso sectorial o colapso del flanco) y la generación de un megadeslizamiento o derrumbes gigantes (por lo general $> 0.1 \text{ km}^3$), conocido como avalancha de escombros volcánica (*volcanic debris avalanche*), puede originarse por uno o varios factores como: a) la presión interna de los gases volcánicos, b) una intrusión magmática, c) un terremoto u d) otros factores que favorecen la inestabilidad de laderas (Ui , 1989; Siebert, 1996; Ui et al., 2000).

Un aspecto probable, pero difícil de estimar por el momento, es que el flanco N del cráter Principal llegue a colapsar dado el debilitamiento de la pared debido a las aguas hiperácidas del lago cratérico que disuelven las rocas (particularmente los depósitos piroclásticos) y por efecto de las frecuentes explosiones (Kempter et al., 1996; Kempter y Rowe, 2000). En el caso de un colapso de la pared norte y su lago cratérico, el aporte de la salmuera contenida en él (con una profundidad de unos 30 m o menos) puede conllevar a grandes deslizamientos y lahares con volúmenes superiores a los históricos. Además, un gran deslizamiento puede conllevar a la descompresión de la cámara magmática y disparar una actividad explosiva intensa.

Estos eventos no ocurren muy frecuentemente, pero son acompañados por destrucción a gran escala. Dado su relativo largo período de recurrencia (por lo general una o dos veces en la vida de un volcán), en donde un evento en cada volcán se presenta cada varios miles de años (Siebert, 1996; Ui et al., 2000; Alvarado et al., 2004), no se suelen incluir en el mapa de peligrosidad volcánica.

Aunque existe la probabilidad que el sistema de fallamiento del Rincón de la Vieja pueda favorecer en un futuro nuevas avalanchas de escombros volcánicas, debido a que los movimientos sísmicos pueden favorecer los procesos de colapso hacia el N, en donde se presenta una alta densidad de fracturamiento y fuerte hidrotermalización, su probabilidad de ocurrencia en el corto plazo es baja a muy baja.

Los deslizamientos menores, como los que suelen ocurrir durante lluvias y terremotos, son más frecuentes y se han dado algunas veces en tiempo histórico en el propio macizo del Rincón de la Vieja. Algunos de ellos se pueden presentar en el propio borde del cráter del Rincón, dado que suele presentar fracturas abiertas.

6.4.3 Lahares

Los flujos de lodo o lahares son corrientes de detritos volcánicos (rocas y sedimentos), que pueden contener componentes orgánicos (vegetación, animales) y antrópicos mezclados con agua que descienden por los cauces de las laderas de los volcanes durante las erupciones o incluso en períodos pos-eruptivos o de calma total. Pueden ser disparados por lluvias torrenciales, deshielo, erupción a través de un lago volcánico o el desbordamiento o derrumbe de un lago cratérico, terremotos, deslizamientos saturados en agua y varios otros procesos menos frecuentes. Estos eventos son extremadamente destructivos y han causado cuantiosas pérdidas de vidas humanas y animales, así como daños en el mundo a la infraestructura, ambiente y la economía en general en diversas partes del mundo.

Paniagua et al. (1996) realizaron un análisis de los daños ocasionados por la actividad eruptiva del Rincón de la Vieja durante 1995. Destacan que las velocidades estimadas de los lahares históricos variaron entre 23.6 km/h y 94.3 km/h con un tiempo de llegadas a los puentes, después de viajar 11 km, en el rango de 28 a tan solo 7 minutos. Por ello, recomiendan no habitar ni construir en las orillas de los ríos Blanco, Azul, Azufroso y Pénjamo (Paniagua et al., 1996). Respecto a la ocurrencia de lahares en el volcán Rincón de la Vieja, se cuenta con registro de algunos flujos que descendieron por los ríos Pénjamo y Azul durante 1991 y 1995 (Soto et al., 2003a, b) y claramente en fechas recientes. Sin embargo, no existe registro de que hayan causado decesos.

En la actualidad, uno de los problemas mayores y frecuentes es la incomunicación temporal de las personas (lugareños) y turistas que tienen que hacer uso del vado en la quebrada Azufrada, dado que el camino de acceso comunica con Sensoria y con el Dino Park (Fig. 6.38).

Cuadro 6.13: Velocidades de los lahares del volcán Rincón de la Vieja, noviembre de 1995 (basado Fernández et al., 1995 y Paniagua et al., 1996).

Fecha	Hora local erupción	Hora llegada Río Pénjamo	Tiempo de locomoción (min)	Distancia río Pénjamo hasta sitio de puente	km/h
7/1195	09:33	10:00	27	11.0 km	24.4
	13:22	13:30	8	“	82.5
	18:51	18:58	7	“	94.3
8/11/95	06:10	06:25	15	“	44.0
	07:29	07:44	15	“	44.0
	08:21	08:36	15	“	44.0
	09:49	10:04	15	“	44,0
	16:02	16:30	28	“	23.6
Promedio			16.3	“	50.1



Fig. 6.38: Vado en la quebrada Azufrada y pilares del puente sin concluir, que suele dejar por varias horas incomunicado a unas 20 familias por efecto del tránsito y sedimentos blocosos dejados por los lahares.

El cuadro 6.14 ayuda a visualizar los ríos considerados por los diferentes autores y a ponderar por orden de importancia y la eventual peligrosidad. Los mapas solo presentan aquellos lahares disparados por la actividad volcánica contemporánea (sineruptivos) o ligeramente posterior (poseruptivos), pero no se incluyen aquellos lahares disparados por terremotos o por deslizamientos o por períodos muy lluviosos.

En los periódicos de 1966 (*La Nación*) se dice que las erupciones del 19 de diciembre de ese año provocaron que gran cantidad de peces murieran en los ríos Colorado y Blanco del sector Pacífico. Se desconoce si esto fue producto de lahares o de la lluvia ácida, o que los ríos bajaban con cenizas ácidas contaminantes, pero sin llegar a desarrollar lahares. En tal caso, hoy día, el río Blanco no posee peces en absoluto (Alvarado, 2021).

En efecto, en el cuadro 6.14 se observa como hay varios ríos sin reportes históricos comprobados de lahares, que incluso se han propuesto en varios trabajos como potencialmente peligrosos, como lo son los ríos Blanco (en ambos flancos del volcán) y los ríos Colorado y Tizate. En tal caso, ante un evento explosivo relevante, se deben de tener en consideración, no solo estos ríos, sino cualquiera que descienda del volcán como una medida preventiva.

Los efectos de los lahares son relativamente predecibles y, por consiguiente, es posible realizar acciones y obras de mitigación para reducir las condiciones de riesgo. Entre las medidas están las siguientes:

- a) Desarrollo de áreas urbanas o habitacionales lejos de los cauces y zonas de inundación de los ríos (álveo), respetando la zona de restricción de construcción con respecto a la distancia de los cauces.
- b) No acercarse al cauce de un río cuando hay temporales, erupciones volcánicas ni terremotos cercanos, además de estar alerta si se vive cerca, incluso en quebradas presuntamente “secas”.
- c) En aquellos cauces frecuentados históricamente por lahares y donde puede haber infraestructura vital y vidas humanas en juego (p. ej., turistas), se recomienda tener un sistema de alerta temprana para crecidas o lahares y ciertas medidas ingenieriles preventivas, aunque estas suelen ser onerosas y generan una falsa seguridad en la población.
- d) No realizar actividades recreativas en quebradas (secas o con agua discurriendo), particularmente en la estación lluviosa y si no se tiene una visión del entorno aguas arriba (al menos 100-200 m) o si su ruta de evacuación es larga y difícil.

Cuadro 6.14: Ríos y quebradas tomados en cuenta por los principales estudios de peligro volcánico del Rincón. Incluye tanto eventos históricos como aquellos cauces propuestos a ser afectados en el futuro. En negrita, los ríos y quebradas en los que histórica y comprobadamente existen reportes de lahares (concentrados o diluidos) durante los dos pasados eventos eruptivos históricos. El trabajo de Alvarado et al. (2018) está enfocado a las obras ICE, por eso no se contemplan otros ríos o quebradas.

Río/ quebrada	Paniagua et al. (1996)	Kempter (1997); Kempter et al. (1996)	Soto et al. (2003)	Soto (2010)	Alvarado et al. (2018)	Alpizar (2018) y Alpizar et al. (2019)	Número de veces propuesto
Blanco (Caribe)	x	x	x	x		x	5
Azul	x	x	x	x		x	5
Azufrosa	x	x	x				4
Azufrada		x	x			x	3
Zanjonuda		x	x				2
Pénjamo	x	x	x	x		x	5
Negro (Caribe)							0
Jala Piedras						x	1
Aguas Verdes							0
Provisión							0
Negro (Pacífico)		x					1
Blanco (Pacífico)	x	x	x	x			4
Colorado	x	x	x	x			4
Tibio			x				1
San Antonio					x		1
Tizate	x			x	x		3
Salitral	x				x		2
Pacayal					x		1
Gata					x		1
Agria	x						1

6.4.3.1. Modelos determinísticos para lahares

Debido a que los lahares son los eventos con mayor posibilidad de ocurrencia en el área de estudio y a que su alcance, mortalidad y la destrucción suelen tener significativa magnitud, se han considerado diferentes modelos determinísticos de afectación por lahares para el volcán Rincón de la Vieja utilizando la herramienta LaharZ (Schilling, 1998).

Los lahares que han afectado el área de estudio se han encauzado generalmente por la quebrada Azufrada, Zanjonuda y los ríos Pénjamo y Azul, recorriendo hasta 16.6 km de distancia desde el cráter y llegando a afectar el cauce del río Cucaracho (p. ej., 8 de mayo de 1991). Autores como Kempter (1996), Kempter y Rowe (2000) y Soto et al. (2003a, b) han descrito en detalle los depósitos y sugieren que el río Pizote podría llegar a verse afectado por lahares en caso de una erupción de tamaño considerable, o bien, a raíz de un eventual colapso del flanco caribeño del cráter activo.

Pese a ello, los trabajos de modelización han abarcado otros ríos y quebradas donde históricamente no se tiene registro de lahares, con el fin de tener otra serie de escenarios. Para ello, se elaboró un modelo general que abarca todos los flancos del macizo (Fig. 6.41); este considera volúmenes variables ($8 \times 10^5 \text{ m}^3$, $1 \times 10^6 \text{ m}^3$, $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ y $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$) y un modelo de elevación digital con resolución espacial de 12.5 m del sensor ALOS PALSAR, obtenido de *Alaska Satellite Facility* (2015). Los puntos de disparo se ubicaron en las partes altas de los ríos y quebradas que nacen en las laderas del volcán.

La escogencia de volúmenes modelados se basó principalmente en los siguientes criterios:

1. Alcance que han tenido los lahares generados hacia el norte del volcán Rincón de la Vieja en el pasado;
2. Frecuencia con la que ocurren lahares de pequeño volumen en el área de estudio;
3. Experiencias previas documentadas, para las cuales se conocen los volúmenes o el alcance aproximado de los lahares (volcán Rincón de la Vieja);
4. Validaciones previas realizadas a los modelos con base en los depósitos de lahares antiguos en el Rincón de la Vieja.

En la modelación se incluyó también el cálculo de una zona de amenaza proximal, la cual además de la topografía, considera la relación entre distancia L y altura H (Schilling, 1998), que en este caso fue de 0.24. En esta zona es donde, por sus condiciones topográficas y su posición con respecto al cráter activo, es más probable que se generen lahares.

Las Figuras del 6.39 al 6.43 representan los diferentes grados de amenaza por lahares hacia las obras del campo geotérmico Borinquen 1, así como hacia los principales caminos de acceso. Claramente, los efectos adversos incrementan desde el volumen menor modelado de $100\,000 \text{ m}^3$ hasta el mayor de $1\,500\,000 \text{ m}^3$. Pese a que tal y como se dijo, no se tienen registros históricos de lahares importantes hacia el flanco Pacífico del Rincón de la Vieja,

pero si existen algunos depósitos antiguos en los cauces de los ríos. Aunque la probabilidad de ocurrencia es muy baja, a menos de que se presente un evento subpliniano a pliniano, se contemplaron dentro del análisis. También, se pueden presentar diferentes escenarios de ocurrencia de lahares ante eventos hidrometeorológicos importantes, terremoto o actividad volcánica tipo vulcaniana importante hasta pliniana. La probabilidad de ocurrencia a corto plazo (presente siglo) es baja a muy baja, pero no improbable.

En los mapas se observa cómo las pendientes son elevadas y con cuencas de captación relativamente cerradas o estrechas, propicias para la generación de lahares, ya sea debido a deslizamientos cosísmicos, a deslizamientos durante temporales o huracanes o bien, por acumulación de cenizas o piroclastos gruesos en caso de erupciones volcánicas importantes. Los mapas muestran los eventuales efectos de dos modelados de lahares ($100\ 000\ m^3$ y $1\ 500\ 000\ m^3$) bajando por una quebrada sin nombre. Para el volumen más bajo modelado, los efectos son prácticamente nulos sobre las obras propuestas, a lo sumo sobre algunos puentes. Pero si se modela el caso extremo, entonces los efectos son de consideración, aunque su probabilidad de ocurrencia es muy baja, quizás de un evento cada milenio. Las figuras muestran los eventuales efectos de dos modelados de lahares ($100\ 000\ m^3$ y $1\ 500\ 000\ m^3$) bajando por las quebradas Gata y Pacayal, así como el río Salitral. Para ambos volúmenes modelados, los efectos son prácticamente nulos sobre las obras propuestas, a lo sumo sobre algunos puentes.

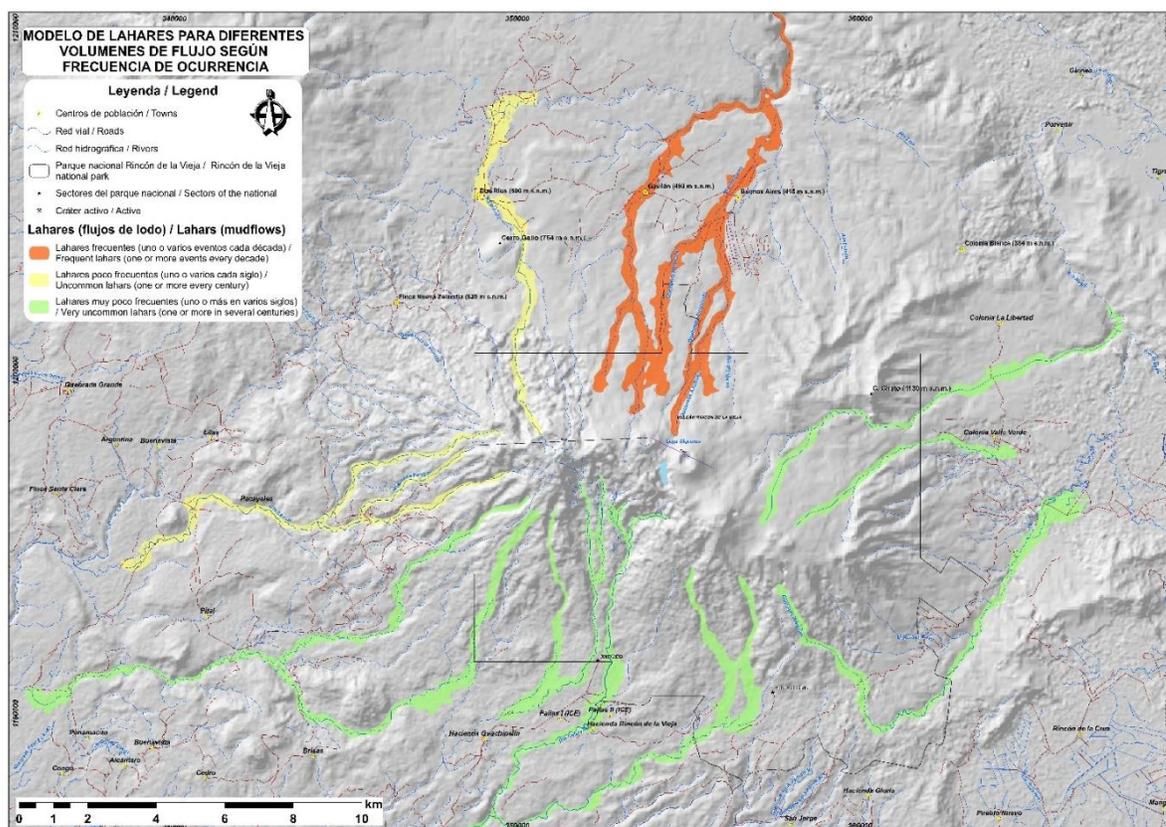


Fig. 6.39: Modelo de afectación por lahares para el volcán Rincón de la Vieja con volúmenes variables, según su frecuencia de ocurrencia (Modificado de Alpízar, 2018 y Alpízar et al., 2019).

Uno de los aspectos que se realizó fue volver al campo con el fin de buscar depósitos de lahares en los sectores de interés ICE, así como sectores habitacionales o potencialmente urbanizables con el fin de tener un mejor criterio. Aunque no se han presentado lahares en el resto de los ríos modelados en tiempo histórico, si se parte del escenario de la pliniana Río Blanco o de las otras subplinianas, en el caso de que se hallan presentado lahares, deberían de quedar algún rastro de los depósitos de los últimos 5 milenios.

Entonces el impacto de los lahares en el flanco S, en un evento máximo que se dirija hacia las obras de Borinquen, la afectación sería mínima, principalmente la tubería al sur del proyecto y en algunas plazoletas de producción, esto si el río Pacayal se viera impactado. En el caso de la quebrada Gata, la cual atraviesa en medio del proyecto, la principal afectación sería la tubería. Referente a la quebrada ubicada al norte del proyecto (quebrada Sin Nombre), podría generar algún daño, ya que se proyecta que, en un evento, máximo podría afectar infraestructura, como es la casa de máquinas, subestación eléctrica, tubería y plazoletas de producción (Fig. 6.41, 6.42 y 6.43). Esta información resulta importante porque a pesar de que históricamente en el lado sur no ha habido mayor afectación por lahares, no se puede decir que no podría pasar en algún momento y esto debe ser contemplado en los planes de emergencias. La probabilidad de que esto suceda es baja a muy baja en los próximos 60 años.

Pero en realidad el flanco más afectado en forma recurrente por lahares históricos es el caribeño. Para enfatizar en la afectación que tendría el sector N debido a lahares que desciendan por los ríos Blanco, Azul y Pénjamo. En la Fig. 6.44 se despliegan los resultados del modelo, sobrepuestos con una capa que incluye todas las estructuras humanas (viviendas, granjas, hoteles, servicios públicos) identificadas en una imagen satelital de Google Earth @ correspondiente a diciembre de 2014.

Según el modelo de la Fig. 6.44, para un escenario de $8 \times 10^5 \text{ m}^3$ (menor volumen modelado), una gran parte de los asentamientos podrían ser inundados por un lahar, siendo Dos Ríos el sitio que eventualmente se vería más afectado.

En la Fig. 6.45 se presentan los resultados del análisis para lahares de $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ con un 95 % de confiabilidad, en esta se representa el alcance mínimo, medio y máximo que tendría un flujo con volumen de $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$.

En la Fig. 6.46 se muestra en detalle una parte del escenario de afectación para un volumen de $8 \times 10^5 \text{ m}^3$. donde se sobrepone el modelo con el contorno de los depósitos de lahares que han descendido recientemente por el cauce del río Pénjamo, obtenidos a partir de una imagen satelital de la plataforma Google Earth.

Es importante considerar, que los límites establecidos en los modelos no son definitivos y pueden variar según las condiciones propias de cada flujo. En este caso, debido a que el tamaño de píxel del MED utilizado para la modelación es de 12.5 m, se puede considerar ese valor como la incertidumbre de los modelos obtenidos. Así pues, para los volúmenes modelados, es posible que las zonas de inundación varíen hasta 12.5 m a ambos lados del contorno trazado.

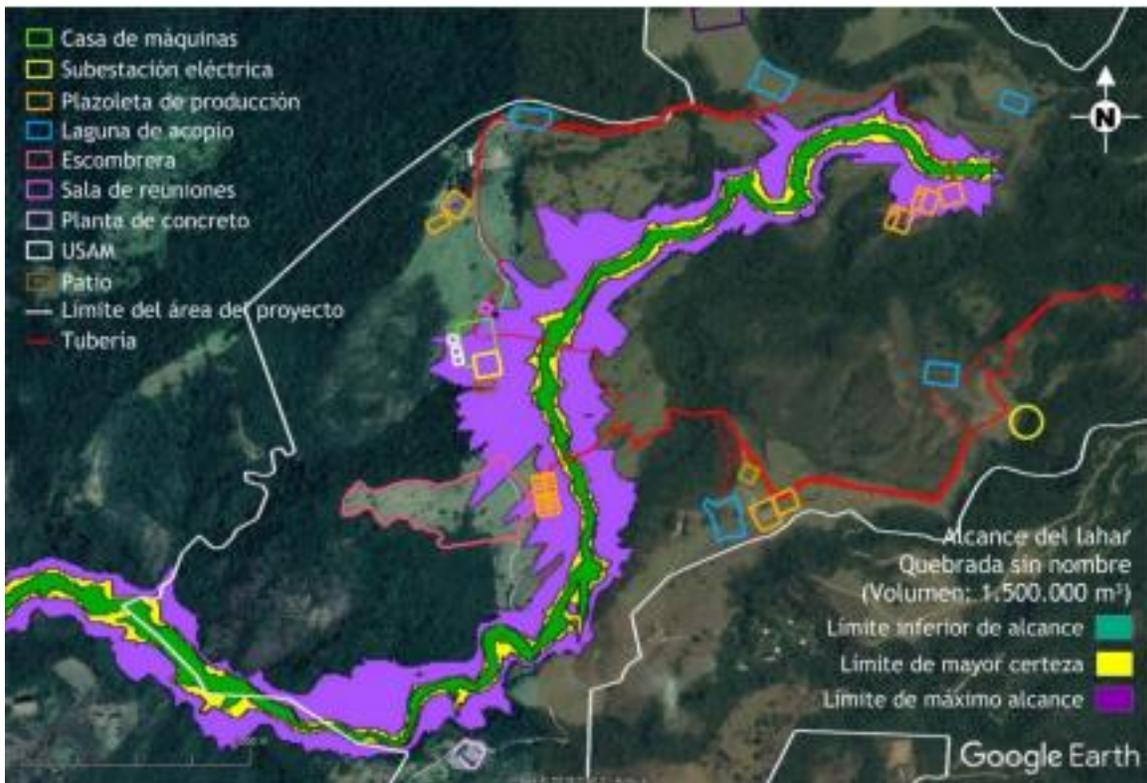
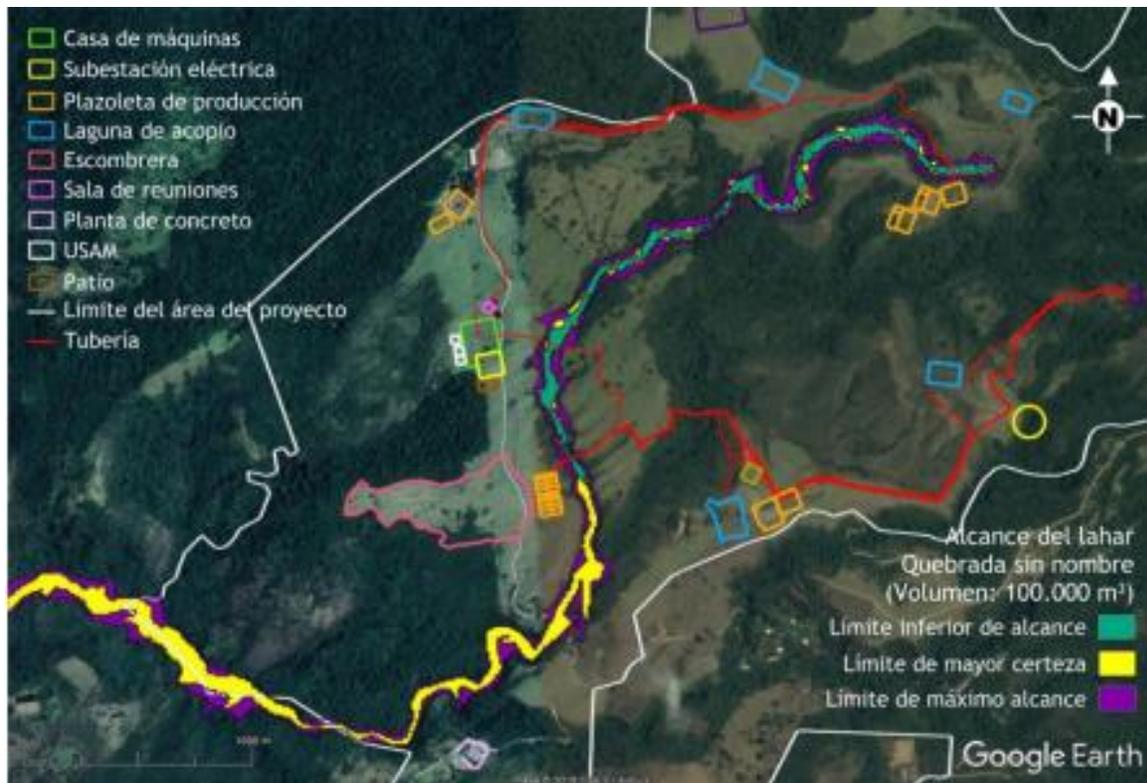


Fig. 6.40: Mapa de detalle de un posible lahar de 100 000 m³ (arriba) y 1 500 000 m³ (abajo) bajando por la quebrada “Sin Nombre” (Alvarado et al., 2018).

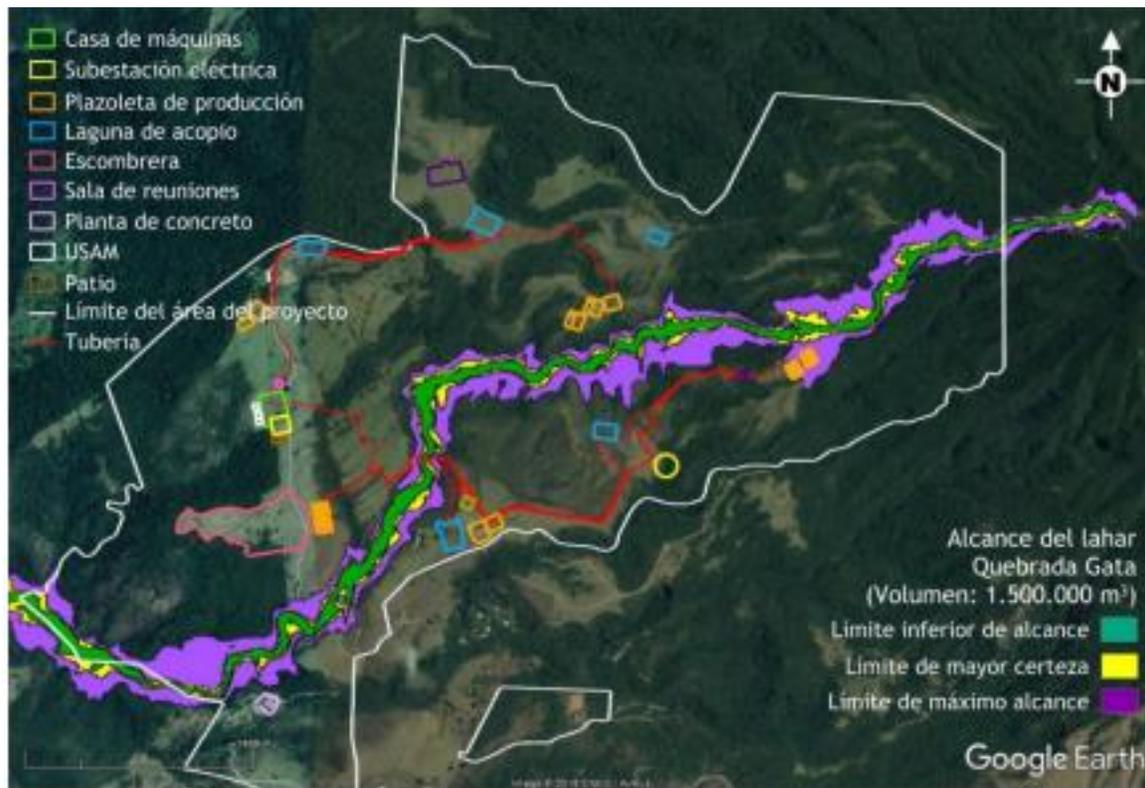
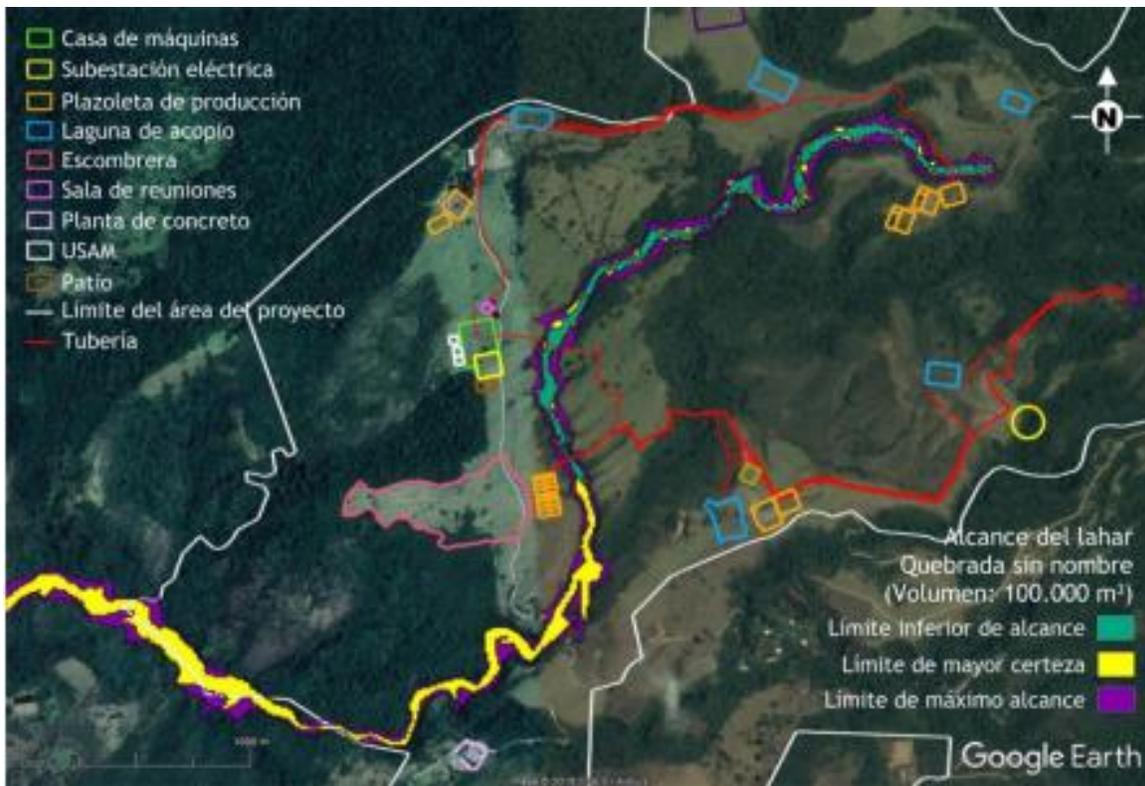


Fig. 6.41: Mapa de detalle de las obras y de un posible lahar de 100 000 m³ (arriba) y 1 500 000 m³ (abajo) bajando por la quebrada Gata (Alvarado et al., 2018).

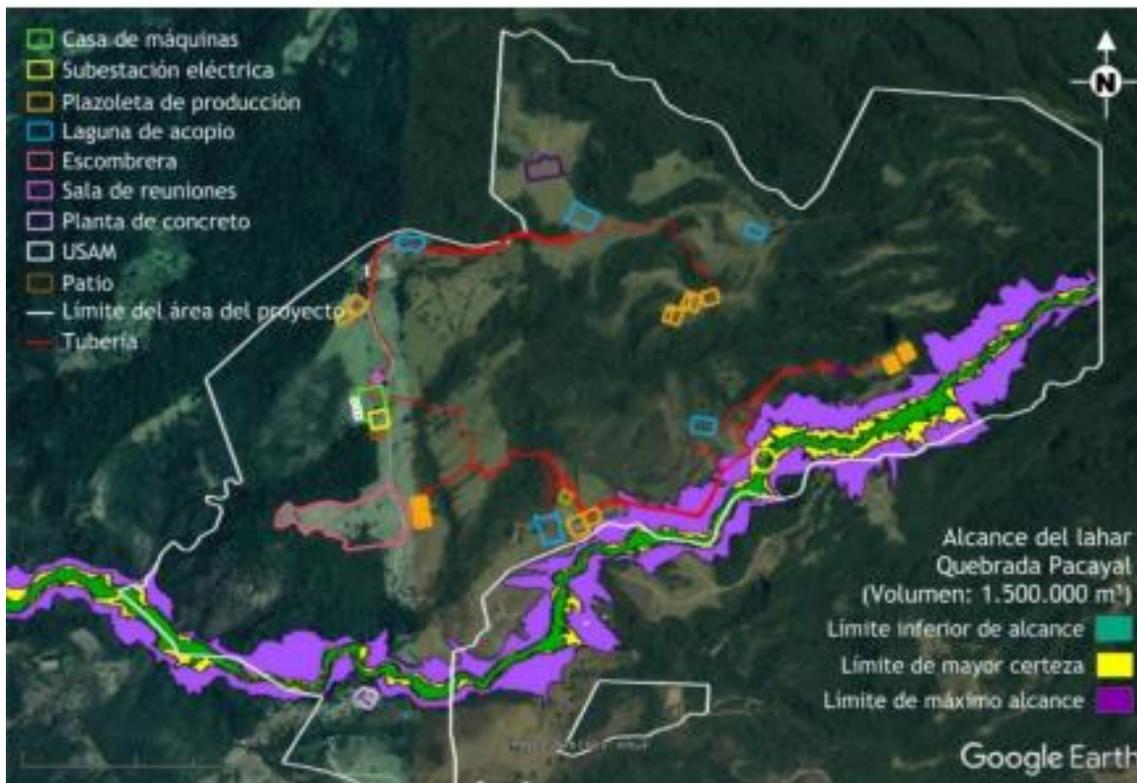
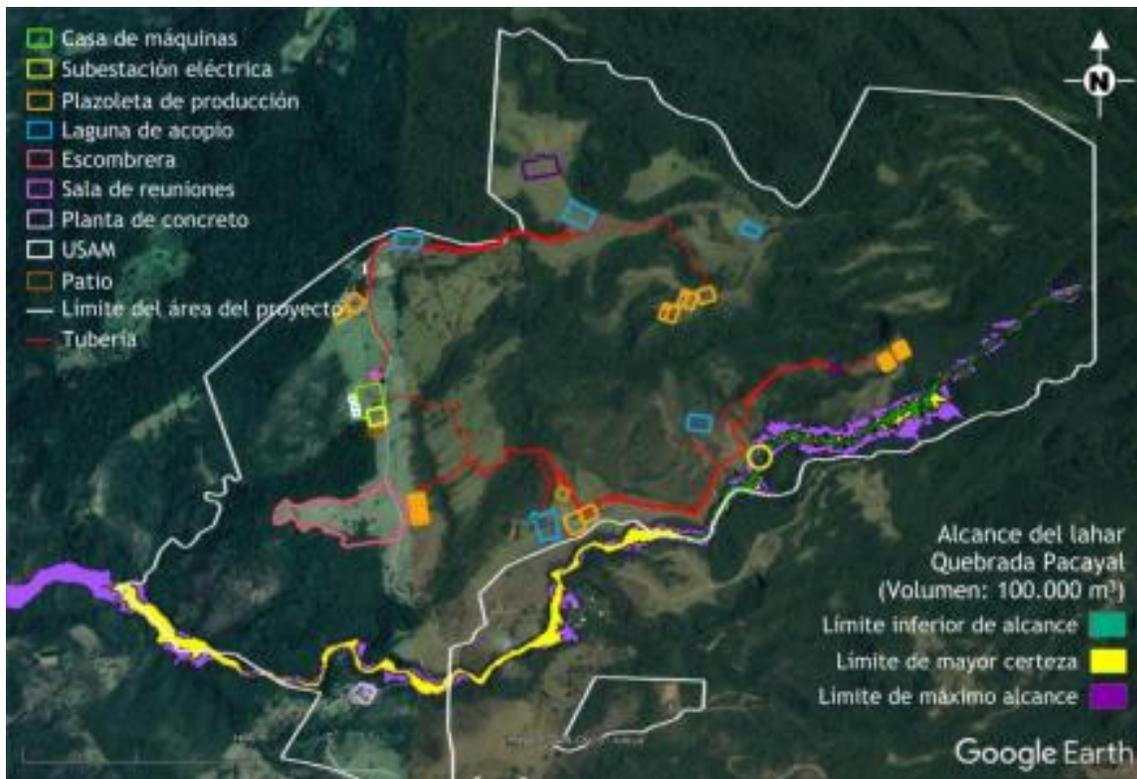


Fig. 6.42: Mapa de detalle de las obras y de un posible lahar de 100 000 m³ (arriba) y 1 500 000 m³ (abajo) bajando por la quebrada Pacayal (Alvarado et al., 2018).

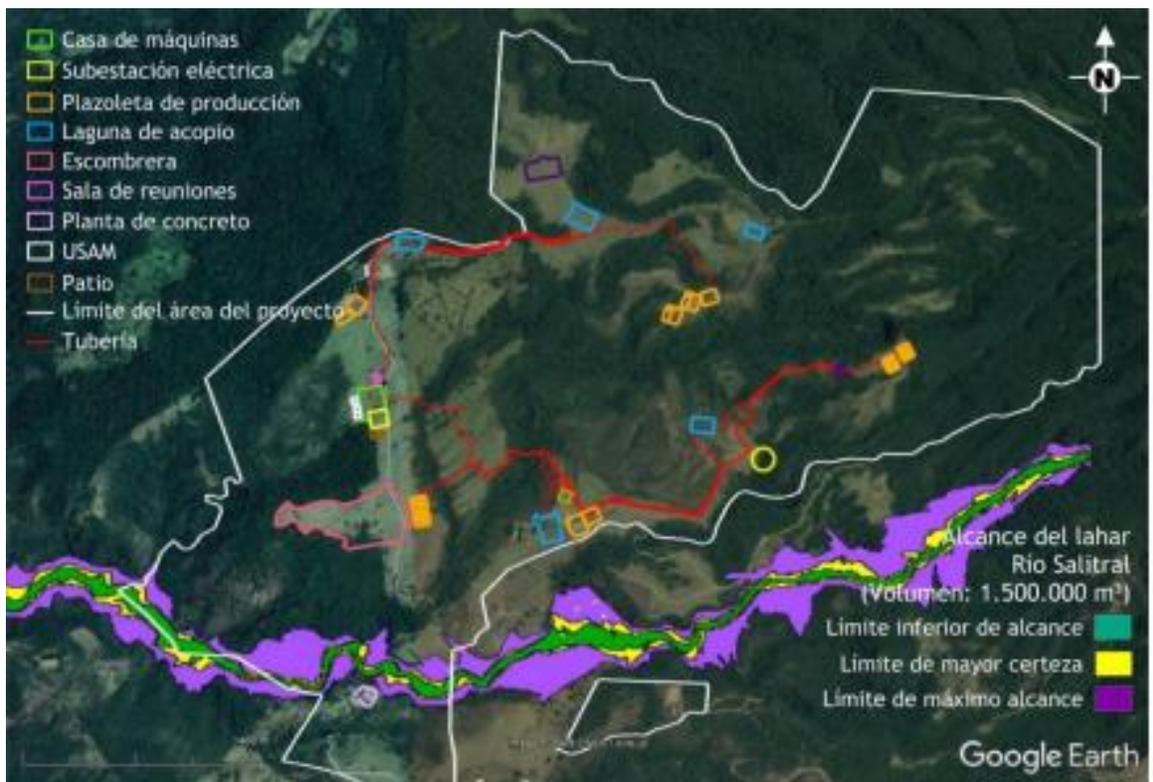
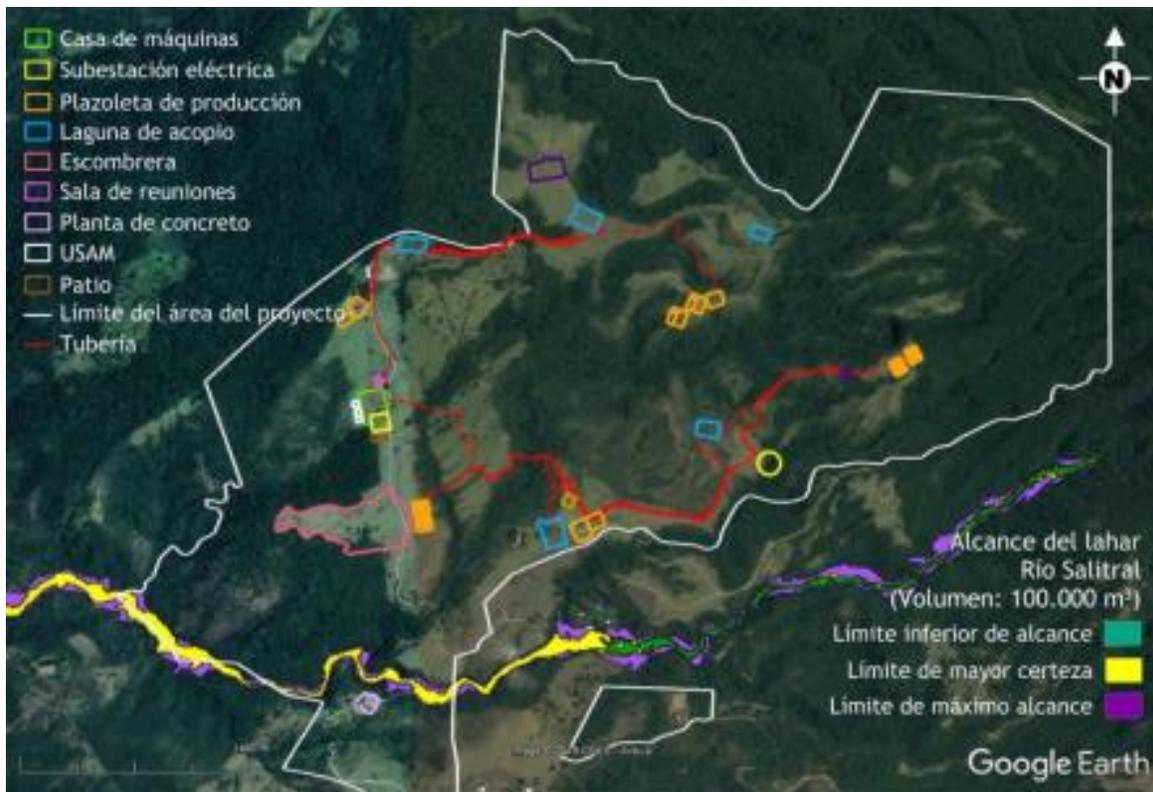


Fig. 6.43: Mapa de detalle de las obras y de un posible lahar de 100 000 m³ (arriba) y 1 500 000 m³ (abajo) bajando por el río Salitral (Alvarado et al., 2018).

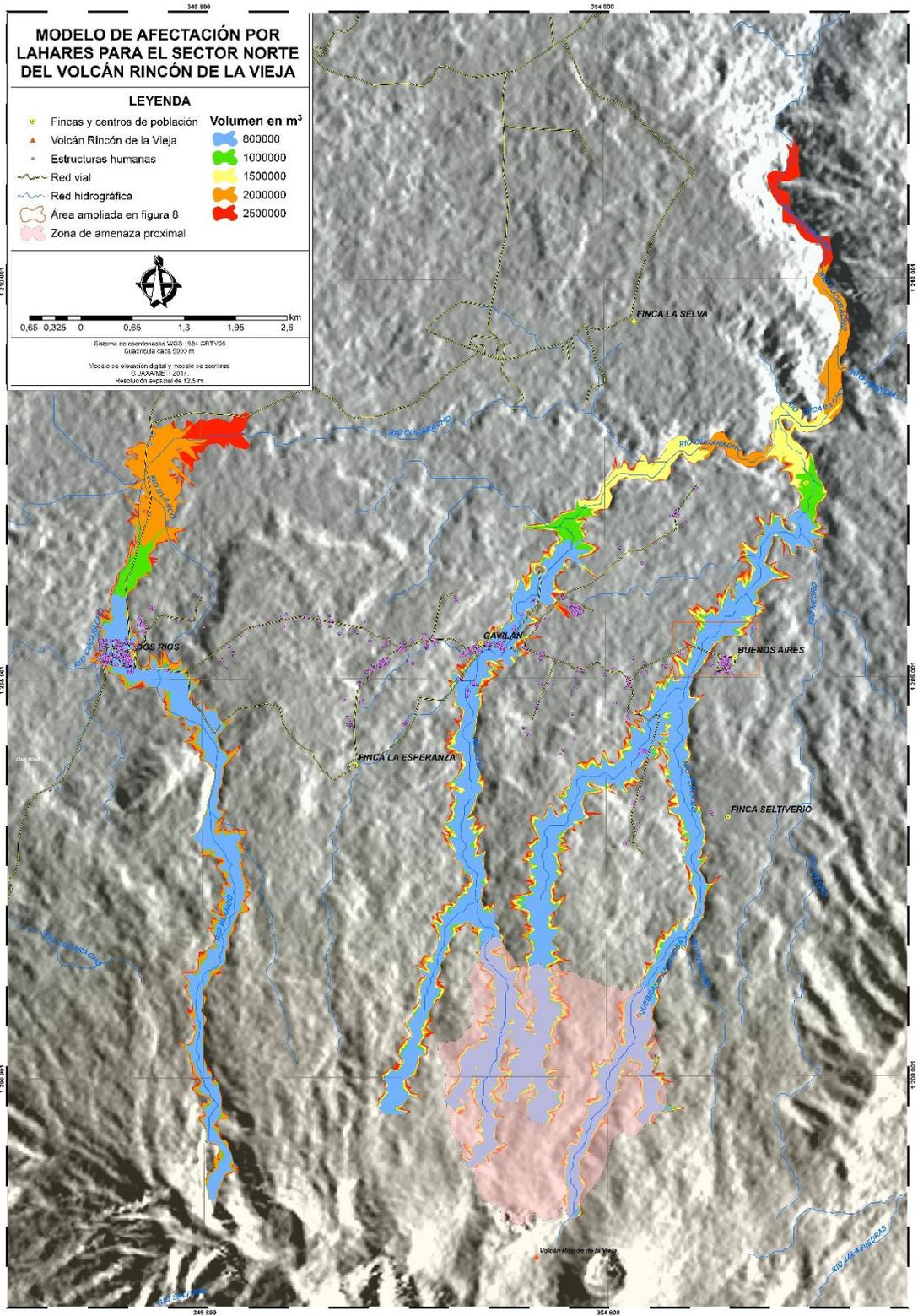


Fig. 6.44: Modelo de afectación por lahares para diferentes volúmenes en la zona caribeña del volcán (Alpizar, 2018).

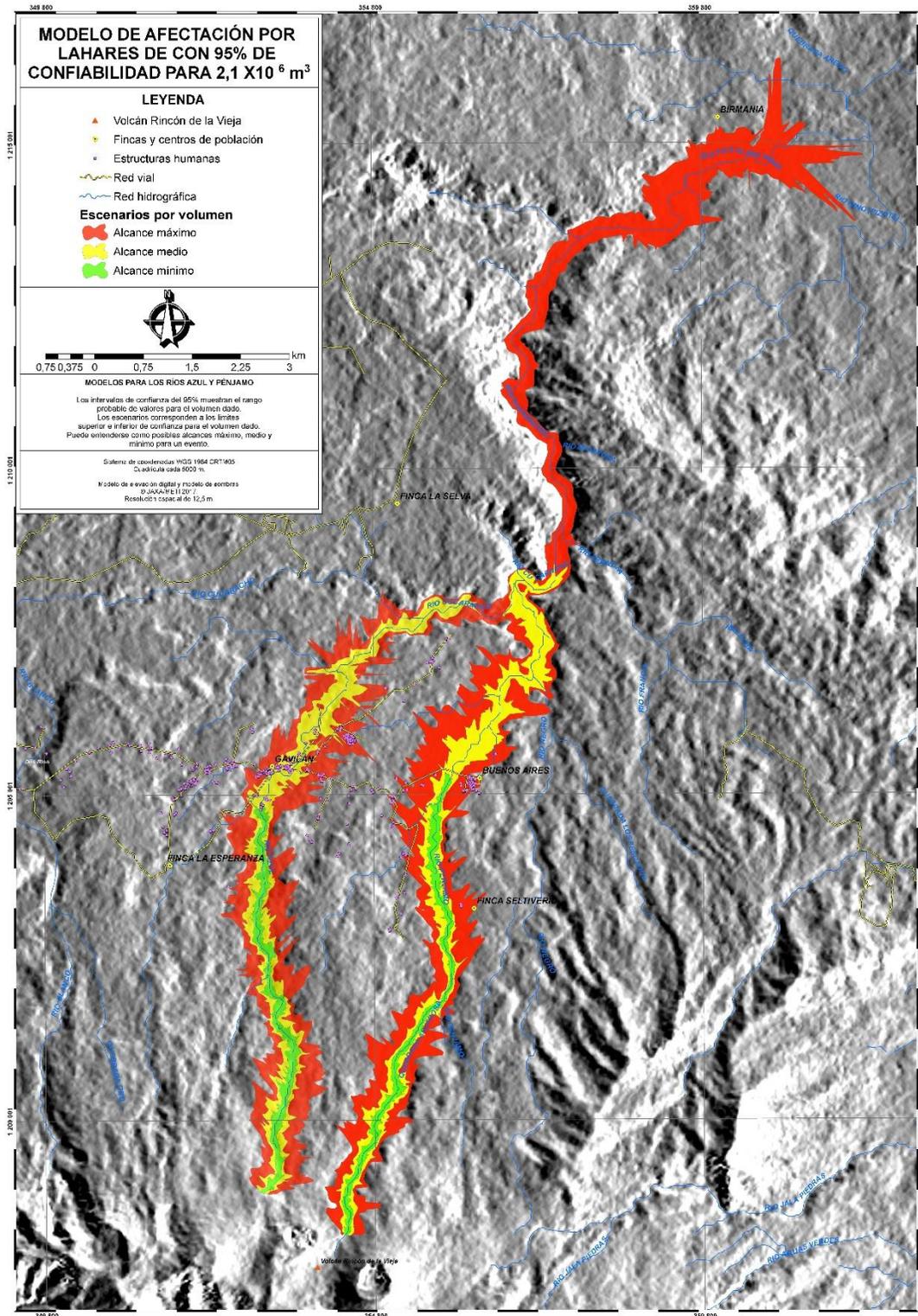


Fig. 6.45: Modelo de lahares con volumen de $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ con 95% de confiabilidad (Alpizar, 2018).

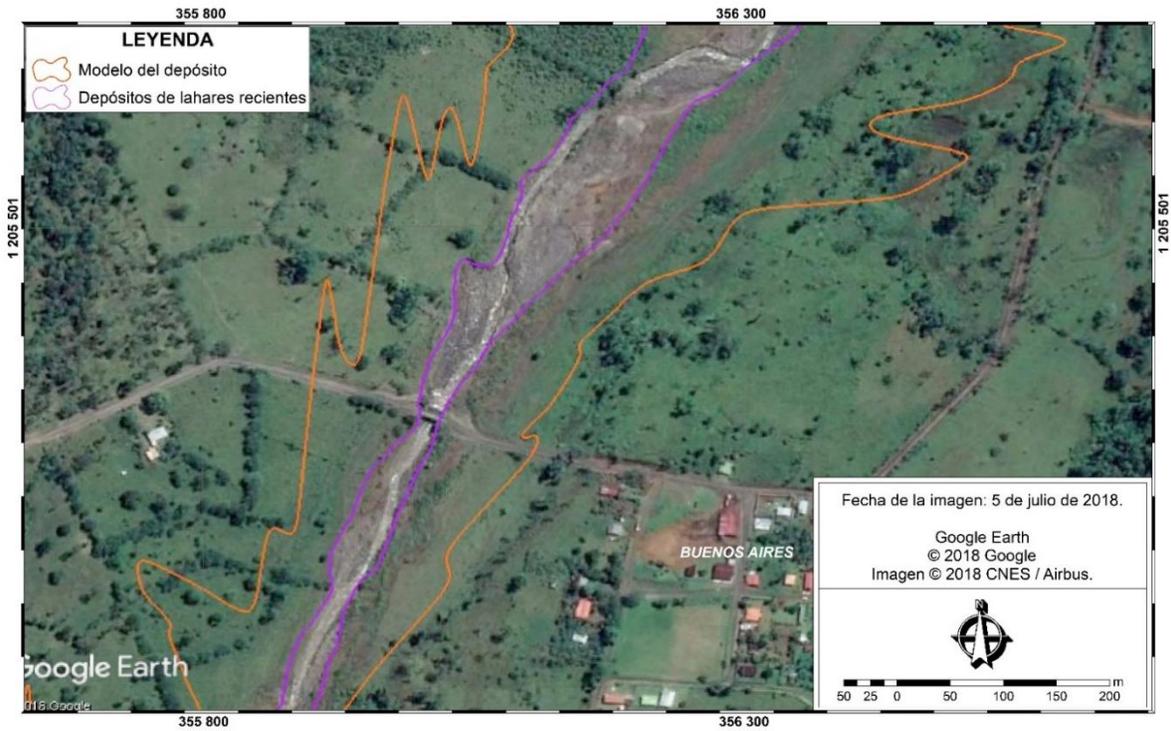


Fig. 6.46: Superposición de parte de un modelo realizado para $8 \times 10^5 \text{ m}^3$, sobre los depósitos de lahares recientes en las cercanías del puente sobre el río Pénjamo (Alpízar, 2018). Se observa como el poblado de Buenos Aires no se vería afecto por lahares de mayor volumen.

7. VIGILANCIA VOLCÁNICA

Vislumbrar con anticipación una erupción volcánica constituye un reto enorme para los científicos, puesto que los volcanes son sistemas complejos que involucran múltiples procesos físicos y geoquímicos. Aun así, se han alcanzado una serie de logros significativos a nivel nacional en el pronóstico de erupciones y de grandes deslizamientos en ambientes volcánicos, y un avance enorme a escala de los países desarrollados. Por lo tanto, se debe seguir con la vigilancia volcánica a partir de las observaciones directas e instrumentales, para buscar manifestaciones o patrones potenciales, que puedan ayudar a pronosticar la inminencia de una erupción importante.

Actualmente, se cuenta con herramientas para la detección en tiempo casi real de cambios en la micro-sismicidad volcánica, sensores de infrasonido, la deformación cortical del edificio volcánico, la temperatura en los flujos y la composición de los gases y de las aguas, tanto directamente en el volcán, como por medio de imágenes de sensores remotos (fotografías, videos, imágenes satelitales, espectrómetros ópticos ultravioleta, sensores infrarrojos, drones y sondas electroquímicas).

A continuación, se realizará un breve recuento histórico y se mostrarán el tipo de vigilancia volcánica que se realiza en la actualidad, así como las instituciones involucradas.

7.1 HISTORIA

Las primeras estaciones sismológicas se instalaron en el volcán Rincón de la Vieja en 1989. Se trató de instrumentos portátiles del ICE que operaron durante tres meses (Quesada, 1989). Seguidamente, luego de la actividad eruptiva que tuvo lugar entre 1991 y 1992, el Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA) instaló una estación sismológica de periodo corto (1 Hz), 5 km al SO del cráter activo (denominada RIN3), lo cual estableció el punto de partida de observaciones más sistemáticas; esta estación continúa operando y a partir del 2011 se instala una estación de banda ancha (RIRI), que más adelante se cambió a VRLE. Este mismo año, el OVSICORI-UNA instaló tres estaciones temporales: Nueva Zelanda (ZERI), Buenos Aires (BARI) y Parque Rincón de la Vieja (RIRI).

Paralelamente, desde el 2002, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), a través del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), incorporó la auscultación del volcán Rincón de la Vieja en sus objetivos de estudio debido al desarrollo de los proyectos geotérmicos de: Las Pailas, Nuevo Mundo y Borinquen. Por esa razón instaló, en ese mismo año, cuatro estaciones sísmicas, que posteriormente amplió a ocho estaciones en el 2004, todas de periodo corto. En el 2011, el OSIVAM incorporó un primer sensor de banda ancha, que instaló en el sector NNE del cráter activo (el sitio se denominó BUAI) y en marzo de 2014 incorporó un segundo sensor de ese tipo en un sitio a 1,8 km al sur del cráter activo (el sitio se denominó VORI). Esta red de sismómetros se mantiene en operación hasta la actualidad.

El estudio de la sismicidad del volcán Rincón de la Vieja es, hasta ahora, muy incipiente y comprende fundamentalmente las siguientes temáticas:

1. Reconocimiento, caracterización y descripción básica de eventos sísmicos como parte de la auscultación sísmica del volcán (Informes internos ICE, de sismología volcánica de la RSN y el OVSICORI). En el OSIVAM-ICE se implementó, particularmente, una herramienta que se basa en la estimación de la amplitud espectral máxima diaria (Taylor, 2014). Por su parte el OVSICORI-UNA efectúa un conteo diario desde 1993 hasta 1998, de las señales sismo-volcánicas a partir de una estación sismológica a 5 km del cráter.

2. Análisis básicos de la actividad volcano-tectónica, principalmente análisis de la evolución temporal y espacial de esta sismicidad (Informes internos ICE, de sismología volcánica de la RSN y el OVSICORI).

Por su parte, a Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y el Área de Auscultación y Amenaza Sismológica y Volcánica del ICE, realizan la actualización de los estudios de peligro volcánicos (presente estudio), junto con otros entes.

La CNE coordina las reuniones del Comité Asesor Técnico (CAT) de vulcanología.

El Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), a través de sus Áreas de Conservación, particularmente el personal del PNVT Turrialba, informan si existe alguna anomalía en el cráter del volcán y su actividad.

El Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA) junto con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), por su parte, emiten un comunicado diario en las primeras horas de la mañana, sobre el modo de dispersión de cenizas y gases, en el caso de darse eventos volcánicos importantes.

Finalmente, las investigaciones nacidas como temas de tesis y proyectos de investigación en los diversos recintos universitarios apoyan por mucho el conocimiento que se pueda tener sobre el volcán Rincón de la Vieja desde diversos puntos de vista en vigilancia, tectónica, geografía, geología y vulcanología.

7.2. MONITOREO ACTUAL

De las principales técnicas de vigilancia volcánica moderna, se tienen las siguientes:

- a) La sismología y el infrasonido,
- b) La geoquímica de fluidos (principalmente gases y complementariamente aguas termominerales)
- c) La geodesia y sus métodos complementarios (GPS, InSAR, inclinómetros, distanciómetros, nivelación de precisión),
- d) Los estudios geofísicos diversos (gravimetría, resistividad eléctrica, magnetometría, magnetotelúrica),

- e) Sensores remotos (fotografías aéreas, sensores infrarrojos, webcams, imágenes de satélite, drones)
- f) termometría (temperatura con pirómetro óptico, termocuplas, termómetros, imágenes térmicas)
- g) La observación visual en el campo.
- h) La petrografía y petrología de las cenizas.

Estas tecnologías de punta, unidas a la historia eruptiva del volcán, ayudan a establecer las alertas y los planes de contingencia. Sin embargo, son muy pocos los volcanes que cuentan con todos estos métodos de vigilancia en tiempo real.

Dentro del contexto de la investigación y la vigilancia de los volcanes, se requiere disponer de líneas base con suficientes datos geoquímicos, recolectados en forma sistemática y por lapsos de tiempo suficientemente largos, de modo que la información sea adecuada para estudiar y comprender mejor el comportamiento geodinámico de los volcanes. Las erupciones pequeñas, sobre todo en sistemas abiertos y dinámicos como el Rincón de la Vieja durante los siglos XX y lo que se lleva del XXI, desde el punto de vista vulcanológico, resultan más difíciles de pronosticar y más aún de predecir, sin embargo, un gran avance se ha logrado en el caso de los volcanes Poás y Turrialba.

Por otra parte, el estudio de cambios en la composición y en el nivel de emisión de materiales volcánicos y calor hacia la superficie es de crucial importancia para la adecuada vigilancia, ya que estos constituyen indicadores de variaciones en las condiciones de los sistemas magmático-hidrotermales presentes en los volcanes. Asimismo, estos estudios podrían ofrecer la oportunidad de percibir en un tiempo oportuno algún potencial peligro asociado con la actividad volcánica, lo cual permitiría una mejor capacidad de respuesta y preparación adecuada para minimizar el impacto sobre asentamientos humanos, infraestructura y comercio, entre otros.

En su mayoría, las técnicas de vigilancia volcánica comprenden diversos métodos y equipos (Alvarado et al., 2014; Alvarado, 2021), entre los que hay que señalar como principales los siguientes (Cuadro 7.1 y en la Fig. 7.1 y 7.2):

7.2.1 Sismología volcánica

Para analizar la información sísmica se cuenta con estaciones sismológicas y de infrasonido, que registran y envían señales permanentemente a los observatorios, así como equipos portátiles, instalados durante crisis sismovolcánicas. Durante las etapas que preceden a una erupción, suelen originarse numerosos tipos de temblores, producidos por la intrusión de magma que asciende en el conducto volcánico que alimenta el volcán, por el movimiento de gases o por la fracturación de las rocas. Estas continúan siendo una de las herramientas más valiosas para la vigilancia dado que permite tener una idea de los procesos que están ocurriendo dentro del volcán. La sismología es una especialidad de la geofísica, que se describe adelante.

En sismología volcánica, existen particularmente tres de las señales que se utilizan para llevarle el pulso y el comportamiento a los volcanes son: las señales volcanotectónicas

(VT), las señales de Largo Periodo (LP) y, por supuesto, las señales que producen las erupciones. Los eventos VT son sismos que suelen ocurrir dentro del edificio volcánico y están relacionados con movimiento de los sistemas de fallas y la creación de fracturas asociadas con el movimiento de magma o fluidos hidrotermales. Las señales LP están relacionadas con el movimiento de fluidos del sistema hidrotermal, pero sin general fracturas o movimiento de fallas. Por su parte, las erupciones son las señales asociadas con erupciones de tamaño variado, desde pequeñas exhalaciones hasta grandes erupciones, muchas veces con una señal explosiva clara. El tornillo es un evento volcánico de baja frecuencia, importante como una eventual alerta de movimiento de magma. Finalmente, se tiene el ruido volcánico o tremor, que puede ser armónico y espasmódico (Fig. 7.1).

El ICE desde que se evidenció el potencial geotérmico en la falda austral del Rincón de la Vieja, se interesó en instrumentar sismológicamente el volcán. Hoy día se cuenta con 8 estaciones sismológicas: 4 período corto y 1 de banda ancha, administradas por la RSN-ICE que se complementan con 3 del OVSICORI y un infrasonido.

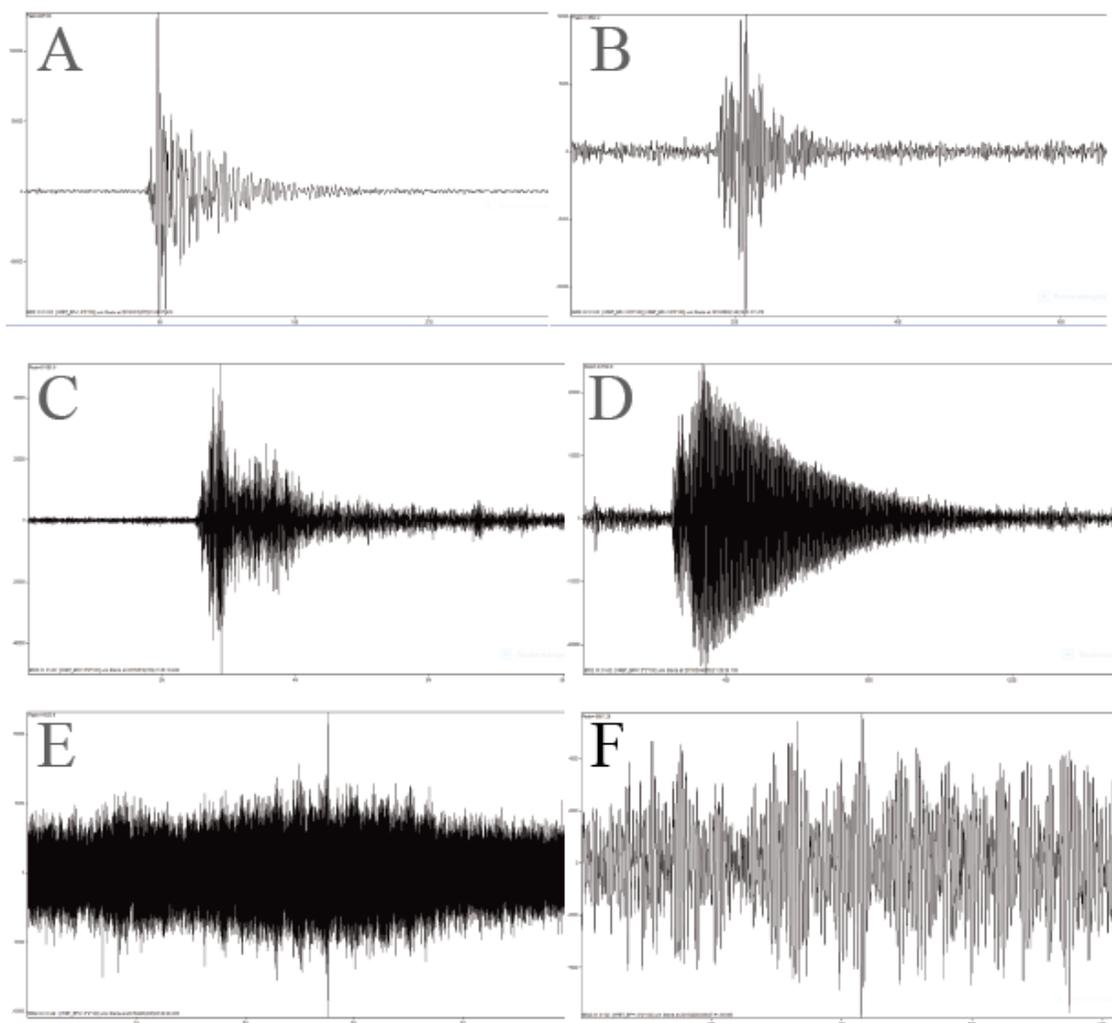


Fig. 7.1: Ejemplos de señales sísmicas del Rincón de la Vieja. A). Sismo volcanotectónico (VT o tipo A), B) Sismo de baja frecuencia o B, C) Explosión, D) Tornillo, E) Tremor armónico y F) Tremor espasmódico.

7.2.2 Geoquímica de aguas, gases, aerosoles y cenizas volcánicas

Los gases emitidos por un volcán varían en proporción y en volumen con la profundidad del magma. Medir la composición (en el campo y en laboratorio) y el flujo de estos, da información sobre la dinámica del magma. Además, estos gases reaccionan con el agua meteórica y las rocas, por lo que vigilar la composición de las aguas de los lagos cratéricos y de las fuentes termales, también aporta datos valiosos sobre la dinámica de si es el sistema hidrotermal o el magmático el que predomina en un determinado periodo de la historia del volcán.

Actualmente, en el Laboratorio de Geoquímica Volcánica (OVSICORI-UNA) y el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT, UNA), se realizan rutinariamente análisis químicos de:

- a) Composición y concentración de gases ácidos en fumarolas y condensados de fumarolas (H_2O , SO_2 , H_2S , CO_2 , HCl , HF) mediante técnicas de cromatografía de iones y técnicas clásicas de química húmeda como la titulación potenciométrica ácido-base.
- b) Composición y concentración de gases inertes en fumarolas (N_2 , H_2 , O_2 , He , Ar , CO , CH_4) mediante cromatografía de gases.
- c) Acidez (pH), conductividad eléctrica, salinidad, y concentraciones de iones mayoritarios y metales de origen magmático o provenientes de la interacción gas-agua-roca de condensados fumarólicos, lagos cratéricos, fuentes termales, quebradas, ríos, lluvia, agua de uso en el PNVI y lixiviados de cenizas. Estos parámetros fisicoquímicos se miden al utilizar técnicas potenciométricas, cromatografía de iones con detección de conductividad eléctrica suprimida y plasma con espectroscopía de masas (ICP-MS).
- d) Mercurio volcanogénico en suelos, agua, líquenes, bromelias, tilansias, cenizas, cabello y uñas humanas recolectados en las inmediaciones de los volcanes con fumarolas y solfataras.
- e) Mediciones discretas de la concentración de SO_2 en el aire ambiente, en los alrededores de los cráteres activos de los volcanes que presentan fuerte desgasificación, mediante el uso de filtros pasivos y muestreadores activos para medir el nivel de dispersión de la pluma volcánica y el potencial de impacto sobre el ambiente y el ser humano. Por ejemplo, el sistema MultiGAS cerca del campo fumarólico en la pared superior norte externa del cráter Principal detecta en las últimas 24 horas concentraciones estables de CO_2 que fluctúan entre 500 y 520 ppm y bajas concentraciones de H_2S , entre 0.5 y 0.8 ppm. Como rutina, se realiza un monitoreo de la concentración del dióxido de azufre en aire, y la determinación del pH y la concentración de fluoruro, cloruro, bromuro, fosfato y sulfato en agua de lluvia.

Varios estudios se han realizado para caracterizar los gases (Tassi et al., 2005; Aiuppa et al., 2014; Battaglia et al., 2019) y la geoquímica acuosa de las fuentes y pozas termales (Kempter, 1997; ICE, 1991; Kempter y Rowe, 2000; Zimmer, 2002; Zimmer et al., 2004; Tassi et al. 2005, 2009; Sáenz, 2020).

Los estudios evidenciaron cambios en la química de los gases volcánicos que salen del cráter Activo mediante medidas con el monitoreo utilizando Multigas, que podrían ser en un futuro una buena base para el pronóstico de erupciones (Battaglia et al., 2019). Se evidenció que el gas que sale en períodos de reposo o tranquilidad eruptiva se caracteriza por una muy baja concentración de especies de azufre (SO_2 y $\text{H}_2\text{S} < 2\text{ppmv}$) y relaciones $\text{H}_2\text{S}/\text{SO}_2$ relativamente altas (media 0.57), mientras que el gas durante las explosiones muestra relaciones de mezcla mucho más altas de SO_2 y CO_2 y una disminución sistemática de la relación $\text{H}_2\text{S}/\text{SO}_2$ (media 0.04). Tanto los gases durante las fases tranquilas como los sin-explosivos exhiben un alto nivel de CO_2/S en proporciones relativas a los gases magmáticos regionales, pero en cada gas explosivo analizado tiene una relación CO_2/S más baja que su correspondiente gas pre-explosivo (Battaglia et al., 2019).

El OVSICORI-UNA tiene actualmente 2 plataformas para monitoreo geoquímico continuo con sensores electroquímicos y telemetría en 2 nacientes de aguas termominerales (Sensoria y Blue River). Además, una plataforma para la investigación de gases nobles (helio). También se está investigando el flujo de volátiles magmáticos en nacientes y ríos alrededor del Rincón de la Vieja. Además, el OVSICORI-UNA instaló 2 plataformas NOVAC al occidente del volcán para la medición remota y continua del flujo de SO_2 . Muestreo directo de gases en 4 sitios de monitoreo (Blue River, Borinquen, Las Pailas, Las Pailas Frías), cada 3-6 meses. En este momento se tiene una estación semi-permanente de MultiGAS de prueba en las Pailas Frías, para la medición continua de CO_2 - CH_4 - H_2S . El fin es cambiarla a permanente con telemetría diaria en julio y 2 estaciones permanentes de DOAS para flujo de SO_2 , revisión diaria. Además, se ha monitoreado por más de 30 años la geoquímica de algunas de las nacientes y ríos, así como las pailas de barro, incluido el lago hiperácido en el cráter Principal. Isótopos estables (^{18}O , D) y radón en nacientes termominerales y nacientes para consumo humano y animal, así como lluvia ácida recolectados alrededor del Rincón de la Vieja fueron estudiados en los años 2018-2019, a través de un proyecto de tesis de la UNA (Sáenz, 2020). La mineralogía de algunas de las nacientes termominerales alrededor del Rincón se ha empezado a investigar utilizando herramientas de microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscopy*, SEM) en la Escuela de Física de la UNA.

En el 2022, el LAQAT-UNA ha iniciado con el proyecto de Vigilantes Volcánicos, en donde personas de la comunidad cercana a los volcanes serán capacitados sobre los peligros volcánicos y la forma realizar análisis rápidos de ceniza, agua y gases, para luego recolectar las muestras. El proyecto de “Vigilantes Volcánicos” está conformado por personas de la comunidad, representantes de hoteles y de restaurantes, quienes pueden realizar mediciones de ceniza y de gases, con materiales sencillos de utilizar. En la Fig. 7.2 se muestra una de las capacitaciones que se efectuó durante el 2021, para personeros de la Cruz Roja y de la comunidad de Poás y alrededores. Las charlas toman temas relevantes para la población, como lo son los peligros volcánicos, además, de una sección práctica para la

construcción de cenizómetros con material reciclable. Los cenizómetros son instrumentos contruidos para medir la cantidad de ceniza caída en un lugar y a la vez, recuperar la muestra para los análisis posteriores por parte del equipo científico.



Fig. 7.2: Charla sobre la construcción de los cenizómetros con material reciclable, 2021.

A futuro, se espera que los vigilantes volcánicos de cada región estén empoderados con la zona y con un historial de mediciones de ceniza y de SO_2 . Además, de mediciones en ríos donde se podría dar una afectación por la actividad volcánica, con mediciones de pH y de concentración de sulfatos y cloruros. En el video del enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=L3fFGxmjEc&t=1699s>, se puede observar un resumen de lo que se busca con las comunidades, como una manera de Ciencia Ciudadana.

7.2.3 Geodesia volcánica

Permite detectar los desplazamientos de la corteza del volcán e inferir los parámetros de la fuente de estos movimientos. Antes de una erupción, el magma sube hacia la superficie y genera presión en la corteza, que se traduce en una deformación de la superficie terrestre la cual se puede medir con técnicas geodésicas. Si se utiliza las observaciones geodésicas de varios puntos se infiere, con modelos geofísicos, el volumen, la posición y profundidad del magma y el potencial de la erupción. Para ellos se usan varias técnicas que difieren en su precisión, su resolución espacial y temporal. El sistema global de navegación por satélite

(GNSS por su sigla en inglés) usan los satélites de diferentes redes, por ejemplo, el sistema de los EE. UU. GPS (*Global Positioning Satellite*: GPS) para localizar con precisión milimétrica un punto sobre la superficie de la Tierra en las componentes E-W, N-S y vertical (3D). Cuando se mide este punto en diferentes épocas, se puede generar una serie de tiempo y determinar si existe o no un movimiento. La interferometría de radar de apertura sintética (conocida por su abreviación en inglés como InSAR) es una técnica que detecta cambio de distancia entre la superficie terrestre y el sensor instalado sobre un satélite. La precisión del InSAR es del orden del centímetro, aunque es una técnica que permite determinar una superficie de deformación que complementa el receptor geodésico GNSS (receptor multibanda que involucra GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo).

Los distanciómetros son equipos topográficos basados en ondas electromagnética que detectan cambios en la distancia de millonésimos de milímetro, mientras que los inclinómetros electrónicos son equipos sensibles a cualquier cambio en la pendiente de las laderas del volcán o su cráter. Más recientemente, se usan imágenes satelitales, así como imágenes basadas en vehículo aéreo no tripulado (drone o UAV: *Unmanned Aerial Vehicle*) para detectar cambios morfológicos debido a una acumulación de material volcánico como cenizas y coladas de lava, así como detectar la inestabilidad de los flancos del volcán.

El OVSICORI-UNA opera una red de GPS alrededor del Rincón para observar la deformación cortical.

7.2.4 Geofísica

La geofísica estudia la estructura y la dinámica del interior del volcán. Por ejemplo, permite medir la variación de parámetros físicos (gravedad, intensidad del campo eléctrico o magnético) debido al movimiento de fluidos (gas, agua, magma) en la profundidad de la corteza. Una roca fundida es menos densa que una roca sólida, así pues, un cuerpo magmático no genera un campo gravitacional tan alto como el resto del edificio volcánico, lo que se puede medir con un microgravímetro. Del mismo modo, el campo magnético y el eléctrico de un cuerpo ígneo son diferentes y suelen contrastar con su medio en función de las propiedades (densidad, grado de fracturación, presencia de fluidos o agua, temperatura, etcétera). La sismología, previamente mencionada, es una especialidad de la geofísica.

La mayoría de los estudios geofísicos de detalle se han realizado en las calderas de Alcántaro-Cañas Dulces, no en otros sectores del volcán (Molina, 2000; Molina et al., 2014).

7.3.5 Sensores remotos

Mediante cámaras visibles y termográficas infrarrojas, de medición remota y en tiempo cuasireal, se pueden tener imágenes visibles y de temperaturas. Permite mapear zonas con flujo difuso de calor y fluidos, así como los cambios en el área: migración de un campo de fumarolas, variaciones en un lago volcánico por fumarolas subacuáticas, así como deslizamientos en edificios volcánicos (fotogrametría). El OVSICORI-UNA y la RSN: UCR-ICE poseen, además, cámaras web para observar las plumas de vapor/gas y erupciones cada vez que las condiciones del clima lo permiten.

Cuadro 7.1: Tipos de vigilancia volcánica en el Rincón de la Vieja (ver Fig. 7.3).

Tipo de vigilancia	Tipo de instrumentación	Frecuencia del control	Institución
Sismológica	8 estaciones sismológicas: 3 OVSICORI, 4 período corto RSN-ICE y 1 RSN-ICE banda ancha, 1 infrasonido (OVSICORI)	Diaria	OVSICORI-UNA y RSN (UCR-ICE)
Geoquímica de gases	Estación semi-permanente de MultiGAS de prueba en las Pailas Frías para medición continua de CO ₂ -CH ₄ -H ₂ S. 2 estaciones permanentes de DOAS para flujo de SO ₂ . Muestreo directo de gases en 4 sitios de monitoreo (Blue River, Borinquen, Las Pailas, Las Pailas Frías).	Revisión diaria	OVSICORI
Geoquímica de aguas	3 nacientes termales con multipotenciómetro y muestreo de aguas, tanto al N del volcán como agua del lago cratérico	c/6 meses	OVSICORI/Laboratorio de Química de la Atmósfera, UNA
Geodesia	4 sensores permanentes GNSS por parte OVSICORI	Diaria	OVSICORI
Geoquímica de la atmósfera	2 muestreos SO ₂ y 2 agua de lluvia	Semestral	OVSICORI/Laboratorio de Química de la Atmósfera, UNA
Control visual	4 cámaras de vigilancia webcan (2 OVSICORI, 1 RSN)	Diaria	OVSICORI, RSN
Control visitas al campo	Dron y cámaras fotográficas, visitas a lugares afectados, toma de muestras <i>in situ</i> ; visita del ICE dos veces al año para ver el nivel del lago. Visita CNE cada vez que hay lahares importantes.	Variable	OVSICORI/ Laboratorio de Química de la Atmósfera, UNA CNE/RSN



Fig. 7.3: Ejemplo de algunos de los equipos y técnicas de vigilancia volcánica en el Rincón de la Vieja. A y B) Arriba, estación sismológica y transmisión de los datos. C y D) Muestreo de aguas y barros de lahares (izquierda) y del lago hiperácido (derecha), E y F) Equipo de estudiar lahares en la quebrada Zanjonuda.

8. ASPECTOS SOBRE LA GESTIÓN DEL RIESGO

La *gestión del riesgo*, según la Ley Nacional de Emergencia y Prevención del Riesgo N.º 8488 (artículo 4), se entiende como “*proceso mediante el cual se revierten positivamente las condiciones de vulnerabilidad de la población, los asentamientos humanos, la infraestructura, así como de las líneas vitales, las actividades productivas de bienes y servicios y el ambiente. Es un modelo sostenible y preventivo, al que se incorporan criterios efectivos de prevención y mitigación de desastres dentro de la planificación territorial, sectorial y socioeconómica, así como la preparación, atención y recuperación ante las emergencias*”.

Por ende, consiste en un enfoque sistemático y la práctica de manejar la incertidumbre para minimizar los posibles daños y pérdidas, incluidos la evaluación y el análisis de riesgo, así como la implementación de estrategias y acciones específicas para controlar, reducir y transferir los riesgos. Por lo tanto, la gestión del riesgo debe ser ampliamente practicada por los entes gubernamentales y privados, así como por la sociedad civil y grupos organizados con la finalidad de minimizar el riesgo a la hora de la toma de decisiones en los proyectos de inversión, bien social, planificación, así como en los procesos de continuidad de negocios. La gestión de riesgos es un tema central para el planeamiento territorial, así como en las líneas y obras vitales (ISDR, 2009). Así, este puede ser efectivamente reducido por medio de una gestión adecuada, que involucre una serie de medidas para reducir la vulnerabilidad (preparación, educación, información).

Durante los períodos en los cuales los volcanes están tranquilos o con poca actividad (que no es el caso del Rincón de la Vieja), la gestión del riesgo debe incluir la elaboración, evaluación y actualización de los mapas de peligro volcánico, la zonificación territorial, el mejoramiento de los sistemas de vigilancia y alerta temprana, la preparación y actualización de los planes de contingencia y de emergencia, así como simulacros de evacuación. En cambio, durante los períodos de inquietud volcánica o actividad eruptiva persistente o de importancia, se deben activar los protocolos de emergencia, estrechar la colaboración entre entidades públicas e instituciones científicas y el público en general. Finalmente, posterior al evento, se debe aprender de las lecciones, retornar a la normalidad y reconstruir la economía, la seguridad social y psicológica, así como establecer las áreas que no deben de habitarse (Sparks et al., 2013).

A continuación, se presentan algunos aspectos, consideraciones, acciones actuales y recomendaciones a corto plazo sobre la gestión del riesgo volcánico, que aplican entorno al manejo en el Rincón de la Vieja.

8.1 PERCEPCIÓN DEL RIESGO

En este capítulo se realiza una recopilación de información sobre percepción del riesgo volcánico de una parte de la población que reside en el sector norte del volcán. El trabajo se realizó en tres poblados del cantón de Upala. En el distrito de Dos Ríos se contó con la participación de los poblados de Dos Ríos y Gavilán, mientras que, en el distrito de Aguas Claras, se eligió a la población de Buenos Aires. El principal criterio considerado para la selección de las comunidades es que estas son las que se han visto más afectadas por las erupciones del volcán Rincón de la Vieja, debido a su posición geográfica con respecto a los principales ríos que drenan desde la cima del volcán.

En cuanto a la población, se trabajó con entrevistas guiadas dirigidas a dos grupos poblacionales, adultos con al menos 15 años de residir en la zona, o bien, que sean líderes comunales. Este criterio se estableció para considerar pobladores con suficiente tiempo de residir en la zona, como para recordar los últimos años de actividad del volcán. El grupo poblacional correspondiente a los niños de segundo ciclo se eligió para evaluar la percepción del riesgo en una nueva generación de personas, quienes en su mayoría han nacido en la zona.

En total, Alpízar (2018) llevó a cabo cinco talleres de recolección de información (tres en escuelas y dos con la comunidad) y se utilizaron los instrumentos de entrevista guiada. A través de estos formularios se recopila tanto información personal básica del entrevistado, como datos referentes a su percepción del riesgo volcánico e información que haya recibido previamente acerca del volcán.

8.1.1 Análisis de los resultados

A continuación, se analiza la información recopilada durante los talleres realizados por Alpízar (2018), en los cuales se realizaron en total 48 entrevistas a adultos (20 tuvieron que ser descartadas debido a que estas personas tenían menos de 15 años de vivir en la zona) y 78 a escolares; sin embargo, al aplicar los criterios de selección previamente indicados, únicamente se procesaron los datos de 28 de las entrevistas aplicadas a adultos y 56 de las que fueron realizadas a niños. Como aspecto destacable, cabe mencionar que la población estudiantil de segundo ciclo correspondiente a las escuelas de Dos Ríos, Gavilán y Buenos Aires fue entrevistada casi en su totalidad. En cuanto a la población adulta entrevistada, 20 personas (48 %) del total, tenían entre 1 y 11 años de residir en la zona, por lo que sus entrevistas no fueron consideradas para el análisis.

Los instrumentos analizados fueron diseñados para recopilar tres tipos de información a través de una serie de preguntas (doce para los adultos y diez para los niños). La información recolectada consiste en:

1. datos personales básicos (edad, formación académica, sexo, ocupación, tiempo de residir en la zona y razones que le motivan, entre otros);
2. estado de los conocimientos que la persona posee actualmente sobre el volcán Rincón de la Vieja y;
3. percepción del riesgo volcánico y lo que representa el volcán para las personas.

De los 28 entrevistados que cumplían los criterios de selección, 4 fueron hombres y 24 mujeres, de estos la totalidad tienen uno o más hijos. En cuanto a la escolaridad, destaca que 19 (68 %) de las personas entrevistadas poseen únicamente educación primaria, 5 (18 %) completaron la secundaria, 3 (11 %) tienen estudios universitarios y una persona no completó la primaria. Cuando se les preguntó si nacieron en la zona, tal y como se indica en el Cuadro 8.1, 13 personas (46 %) respondieron que sí, mientras que los 15 restantes indicaron haber llegado a la zona procedentes de otra región de Costa Rica, e incluso desde Nicaragua.

Cuadro 8.1: Número de personas que nacieron en la zona de estudio.

¿Usted nació en la zona?	Sí	No
	13 (46 %)	15 (54 %)

En cuanto a la motivación que tienen las personas para vivir en la zona, el 46 % respondió que es solo por motivos familiares y el 36 % señaló trabajo y familia como motivaciones (Cuadro 8.2). De las 13 personas que dicen haber nacido en el área, 12 indicaron que permanecen en esta por razones familiares, lo cual sugiere un arraigo importante. Destaca como el 82 % de los entrevistados, tanto nacidos como no nacidos en la zona, señala a la familia como motivación total o parcial para vivir ahí.

Referente al trabajo como justificación para permanecer viviendo en el sector, 11 % indicó que es su única motivación, mientras que el 36 % lo señaló como razón parcial (junto con la familia); es decir que, 47 % de los entrevistados consideran que el factor laboral es un justificante importante para habitar en el área.

Cuadro 8.2: Motivación para vivir en la zona de estudio.

¿Qué es lo que le motiva a vivir en la zona?	Trabajo	Familia	Ambos	Otros
	3 (11 %)	13 (46 %)	10 (36 %)	2 (7 %)

También se realizaron cinco preguntas para obtener información sobre el estado de conocimiento que las personas tienen sobre el volcán y tres para dar cuenta del conocimiento de los pobladores sobre la gestión comunitaria del riesgo. En primer lugar, se planteó la pregunta: ¿sabe qué es un volcán?, ante la cual 24 personas (86 %) respondieron que sí, mientras que 4 (14 %) dijeron no saber o no respondieron. Independientemente de que la definición de volcán que estos pobladores manejan sea correcta o incorrecta, la respuesta es significativa porque da cuenta de la consciencia sobre la existencia del volcán, su actividad y de cómo este es un elemento tan importante en su entorno, como para que se tenga una caracterización de este. En la misma línea, al preguntar a los entrevistados si conocen de alguna leyenda o historia relacionada con el volcán, el 57 % (16 personas) respondió que sí. Se realizaron además dos preguntas sobre la actividad eruptiva reciente y sobre la posibilidad de actividad en un futuro próximo (Cuadro 8.3). En ambos casos las respuestas fueron similares, pues la mayoría de los pobladores consultados dijo recordar la última erupción del

volcán, al mismo tiempo que considera que este hará erupción en algún momento del futuro cercano.

Cuadro 8.3: Respuestas a cuestionamientos sobre la actividad eruptiva.

	Sí	No	No respondió
¿Recuerda la última erupción del volcán Rincón de la Vieja?	25 (89 %)	3 (11 %)	0 (0 %)
¿Cree usted que el volcán hará erupción en algún momento?	26 (93 %)	1 (3,5 %)	1 (3,5 %)

En lo relativo a la gestión local del riesgo, 79 % de los entrevistados (22 personas), dijo conocer sobre la existencia del comité local de emergencias y haber recibido información sobre el volcán; mientras que el 82 % (23 entrevistados), afirmaron saber cómo actuar ante una eventual erupción volcánica. En el Cuadro 8.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las preguntas mencionadas.

Cuadro 8.4: Conocimientos sobre gestión local del riesgo volcánico y acciones de respuesta.

	Sí	No	No respondió
¿Sabe si existe un comité de emergencias en su comunidad?	22 (79 %)	6 (21 %)	0 (0 %)
¿Ha recibido algún tipo de información respecto al volcán?	22 (79 %)	6 (21 %)	0 (0 %)
¿Sabría qué hacer en caso de una erupción volcánica?	23 (82 %)	3 (11 %)	2 (7 %)

Pero ¿qué significado representa el volcán para la comunidad? Está claro que, al igual que sucede en la mayoría de las zonas volcánicas alrededor del mundo, el volcán constituye un elemento importante para el desarrollo turístico, agrícola y energético, pese a los peligros potenciales que representa. A este respecto, se realizó la consulta a los pobladores, sobre qué representa el volcán para la comunidad (algo positivo, negativo o ambos) obteniéndose los resultados del Cuadro 8.5.

Cuadro 8.5: Significado del volcán para la comunidad.

¿Qué representa el volcán para su comunidad?	Algo positivo	Algo negativo (Peligro)	Ambos	No respondió
	12 (43 %)	7 (25 %)	3 (11 %)	6 (21 %)

En este caso, cuando las respuestas fueron “belleza”, “turismo” o “trabajo”, por citar algunos ejemplos, se clasificaron como “Algo positivo” y destacó, como para el 25 % de los entrevistados, el volcán representa específica y únicamente “peligro”, lo cual se calificó como negativo en el Cuadro 8.5. Únicamente 3 (11 %) de las personas consultadas consideran al volcán tanto algo positivo, como una eventual fuente de peligro. De esta forma, sale a la luz como es necesario reforzar, tanto la consciencia de prevención de emergencias ante el peligro volcánico potencial, como la imagen positiva del volcán como fuente de recursos.

Por medio de conversaciones sostenidas durante los talleres, queda muy claro que, para los pobladores, el principal peligro volcánico que les amenaza son los lahares (llamados “lava” por los habitantes de la zona), y es común que realicen una asociación directa de la actividad del volcán con eventos como crecidas, cambios de color del agua, olor a azufre y mortandad de peces. Posiblemente esta creencia se sustenta en el hecho de que, en la década de 1990, varios de estos eventos afectaron seriamente el área de estudio.

Los pobladores también manifiestan, con gran preocupación, el temor a que el flanco N del cráter activo colapse. Si bien el colapso de flancos es un evento relativamente normal en los volcanes, pero muy poco frecuente, como ya se mencionó en el apartado 6.4.2, no existen estudios que permitan confirmar esta posibilidad para un corto o mediano plazo, de ahí la importancia de la prevención. Estos estudios son difíciles de realizar, dada la accesibilidad, peligrosidad al tener que hacerse en el borde del cráter Activo y por el tiempo de análisis que se requieren.

¿Y la población estudiantil, que percepción posee? De acuerdo con el personal docente de las escuelas de Buenos Aires, IDA el Gavilán y Dos Ríos, la totalidad de la población estudiantil de segundo ciclo participó en los talleres. Esto permitió obtener un total de 56 entrevistas, así como conversar ampliamente con los estudiantes.

En los talleres se contó con la participación de 26 niñas y 30 niños de entre 10 años y 12 años, la mayoría nacidos en la zona. La distribución por centros educativos fue: 22 estudiantes de la escuela Dos Ríos, 29 del centro educativo IDA el Gavilán y 5 de la escuela unidocente de Buenos Aires.

Para verificar el nivel de conocimientos que los estudiantes poseen actualmente sobre el volcán, su actividad y las acciones de respuesta ante una eventual erupción, se formularon seis preguntas. En primer lugar, se preguntó a los estudiantes si saben lo que es un volcán, ante lo cual 50 respondieron que sí, mientras que 6 dijeron no saber. Al igual que como sucede con las personas adultas, esto indica que los escolares son conscientes de que el volcán es un elemento importante en su entorno. Al preguntarse a los entrevistados ¿Por qué creen que hacen erupción los volcanes?, las respuestas más comunes fueron: 1. Porque se llena de lava o agua y; 2. Para liberar presión.

Estas respuestas sugieren que los estudiantes han recibido previamente algún tipo de información pero que se debe reforzar el tema, pues existen creencias en la zona, tanto entre los niños como los adultos, de que las lluvias fuertes producen erupciones porque el volcán se llena de agua.

Posteriormente, se consultó a los alumnos si tenían algún conocimiento específicamente sobre el volcán Rincón de la Vieja, ante lo cual, la respuesta de 37 de ellos (66 %) fue, que es un volcán activo. El 44 % restante (17 estudiantes), dijeron o saber nada, o bien, que es peligroso. Si bien, por su edad es poco probable que los escolares recuerden la última actividad eruptiva importante del volcán, el 64 % (36 alumnos), dijo haber escuchado historias sobre las erupciones pasadas. Asimismo, los 38 estudiantes (68 %) que indicaron

que en sus hogares se habla sobre el volcán, son parte de quienes manifiestan preocupación por una eventual erupción; esto sugiere que este sentimiento se extiende hasta sus hogares.

En cuanto al conocimiento sobre acciones de respuesta ante una eventual erupción volcánica, el 66 % de los escolares entrevistados dijeron saber lo que deben hacer, mientras que el 34 % no sabe o no respondió (Cuadro 8.6). Esto evidencia que los escolares requieren un refuerzo importante en el tema de respuesta, que eventualmente se puede incluso canalizar hasta sus hogares.

Cuadro 8.6: Acciones de respuesta ante una erupción volcánica.

	Sí	No	No respondió
¿Sabrías qué hacer en caso de una erupción volcánica?	37 (66 %)	17 (30 %)	2 (4 %)

Sobre el significado del volcán para los escolares, se plantearon dos preguntas relacionadas con la percepción del riesgo volcánico, una sobre la posibilidad de que se dé una erupción en un futuro cercano, y la otra, sobre la preocupación que esta posibilidad genera (Cuadro 8.7).

Cuadro 8.7: Preocupación de los escolares por la actividad volcánica.

	Si	No	Porqué sí (respuestas más comunes)
¿Crees que el volcán hará erupción pronto? ¿Por qué?	49 (87 %)	7 (13 %)	1- Porque está muy activo. 2- Por el choque de placas. 3- Porque está lleno de lava o agua. 4- Por presión, calor y gases.
¿Te preocupa que el volcán haga erupción? ¿Por qué?	49 (87 %)	7 (13 %)	1- Porque puede lastimar o matar. 2- Porque vivo junto al río. 3- Puede dañar puentes, casas o comunidad.

Pese a que ninguno de los niños entrevistados ha vivido una crisis eruptiva, existe en ellos una preocupación generalizada por la posibilidad de que ocurra una erupción, y si bien algunos manifiestan que es porque le temen al volcán, la mayoría justifica su preocupación con razones concretas, como una eventual afectación a la vida, la salud y la propiedad, o bien la posibilidad de que las comunidades queden aisladas. De forma positiva, aunque requiere un importante refuerzo, parte del 13 % de los estudiantes que declaró no estar preocupados por una eventual erupción, manifestó que es porque sabría cómo actuar durante esa situación porque ha participado en simulacros.

Al plantear la pregunta: ¿Qué representa el volcán para ti?, 16 (29 %) respondieron que es un elemento positivo, mientras que 29 (52 %) de los entrevistados indicaron que el volcán representa peligro y 11 niños no respondieron.

Tanto las respuestas a las entrevistas, como las conversaciones sostenidas con los niños dejaron claro que, la mayor parte de la población estudiantil analizada tiene una consciencia clara del peligro volcánico al que está expuesta la zona. Esto pone en evidencia la necesidad reforzar el conocimiento acerca de los peligros potenciales que podrían afectar las comunidades y las acciones de preparación y respuesta que se pueden llevar a cabo tanto en el ámbito escolar como familiar. Resulta igualmente importante, inculcar en los menores el sentido de convivencia con el volcán y contribuir a que sean conscientes de los beneficios de vivir en una zona volcánica. Esto podría incluso, evitar que a futuro parte de esta generación abandone la zona motivada por el temor a la actividad volcánica.

Finalmente, se preguntó a los estudiantes si las personas de su comunidad visitan el volcán, ante lo cual el 71 % de los escolares (40 menores) respondió que sí, e incluso mencionaron nombres concretos. Si bien está claro que servir como guías turísticos hasta la cima del volcán, constituye una fuente de ingreso importante para algunos pobladores, esto genera preocupación por dos razones:

1. El peligro inmediato al que se exponen locales y turistas, ya que incluso pequeñas erupciones freáticas, las cuales suceden con frecuencia, son capaces de arrojar bloques a varios cientos de metros de distancia, y en el caso del Rincón de la Vieja, los productos eruptivos se depositan en su mayoría en el sector norte del cráter (área de peligro proximal), que es por donde acceden los locales al sector del cráter activo y;
2. Los niños crecen, percibiendo la práctica de acceder al cráter activo de forma recreativa o lucrativa como algo normal, y algunos de los mayores, manifestaron incluso haberlo visitado, lo cual además de ilegal, es altamente peligroso por las razones previamente expresadas.

A partir de la información recopilada, Alpízar (2018) presentó una lista de los temas que a reforzar por los pobladores; estos son:

1. ¿Por qué hacen erupción los volcanes?
2. El volcán Rincón de la Vieja y su actividad.
3. Los beneficios de vivir cerca de un volcán.
4. Qué hacer antes, durante y después de una erupción.
5. ¿Cuáles son las zonas seguras en caso de una erupción?

8.1.2 Ficha familiar

Álpizar (2018) propuso elaborar una ficha familiar, la cual sería útil tanto ante una eventual actividad volcánica, como en cualquier otra situación de emergencia, en la cual las familias consignarán la información más importante que deberán conocer tanto los miembros del grupo familiar, como los miembros de equipos de primera respuesta que eventualmente puedan necesitarlo.

Entre los datos que se deberán anotar en la ficha se encuentran:

1. Apellidos del grupo familiar y nombre del jefe o jefa de hogar.
2. Datos básicos de todos los miembros de la familia: nombre, edad, condición física, grupo sanguíneo y si toma algún medicamento.
3. Datos de las mascotas (en caso de que la familia las tenga).
4. Información general sobre la vivienda y su ubicación.
5. Zonas de seguridad dentro y fuera de la vivienda.
6. Zonas de seguridad en la comunidad y puntos de encuentro de la familia en caso de emergencia.
7. Información sobre la preparación y ubicación del “kit” familiar de emergencia.
8. Contactos ajenos al grupo familiar en caso de emergencia.
9. Nombre y contacto de un miembro del comité local de emergencias.
10. Número de emergencias (9-1-1) en el caso de Costa Rica.

Estas fichas deberían de ser impresas en papel de calidad y colocadas de preferencia en un lugar de fácil acceso y que sea conocido por todos los miembros del grupo familiar, por ejemplo, detrás de la puerta principal de cada vivienda. Idealmente, la ficha familiar contará con el material de apoyo: panfletos informativos sobre el volcán, su actividad, las medidas a tomar antes, durante y después de una erupción y mapas simplificados, en los cuales se indican las zonas seguras en cada comunidad en caso de que ocurra un lahar.

9. LA VULNERABILIDAD COMO UNA BASE PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO EN EL FLANCO NÓRDICO

Para la evaluación de la vulnerabilidad, resulta necesario aplicar previamente instrumentos como entrevistas para conocer las características de la población, sin embargo, por el tiempo limitado y costos que esto requiere, la investigación se basará únicamente en variables relacionadas a la dimensión social, económica, organización institucional-comunal y percepción del riesgo. De acuerdo con las metodologías aplicadas por Thomas (2013), Rodríguez (2018), así como Campos y Barrantes (2020), donde establecen criterios ligados a estas variables para identificar vulnerabilidades ante afectación por actividad volcánica e inundaciones, se estableció 4 tipos de vulnerabilidad dentro del instrumento, las cuales se conforman de 27 variables para luego extrapolarlas a nivel comunitario.

El instrumento elaborado es una encuesta de tipo cerrada, donde se establece el nivel de vulnerabilidad de cada vivienda, de acuerdo con el número de variables que conforman cada tipo de variable. Para la selección de las variables se realizó de acuerdo con el criterio de cada una de estas posee una representatividad dentro de la vulnerabilidad, es decir, si se encuentra presente, se aumenta la vulnerabilidad en los hogares o dentro de las comunidades. Para la representación de los datos se realiza una interpolación de tipo IDW donde de acuerdo con el valor de vulnerabilidad en la vivienda, se unen los valores dentro del mismo rango de valoración cualitativa. En los cuadros 9.1 y 9.2 se observan el número de variables y su valor de acuerdo con el tipo de vulnerabilidad, principalmente basado en Rodríguez (2018) así como su rango.

Cuadro 9.1: Tipo y cantidad de variables incluidas en la encuesta.

Tipo de vulnerabilidad	de Cantidad de variables	Nivel de vulnerabilidad
Social	9	1-2 bajo 3-5 medio 6-8 alto 9 muy alto
Económica	5	1 bajo 2 medio 3-4 alto 5 muy alto
organización local	6	1 bajo 2-3 medio 4-5 alto 6 muy alto
percepción del peligro	7	1-2 bajo 3-4 medio 5-6 alto 7 muy alto

Luego se establece el peso en porcentaje de cada tipo de vulnerabilidad dentro de la vulnerabilidad social para las comunidades. Se da una explicación del valor, según la influencia que tiene cada una de las variables que conforman cada tipo de vulnerabilidad relacionadas con la respuesta y de gestión del riesgo de la población ante un escenario de afectación mayor por actividad volcánica.

Cuadro 9.2: Valor de cada tipo de vulnerabilidad, dentro de la vulnerabilidad comunitaria.

Tipo de vulnerabilidad	de Valor %	Explicación del valor
Social	40	Posee el mayor porcentaje de peso debido a que representa la capacidad intrínseca del ser humano en respuesta a un evento de peligro volcánico, es decir, si cuenta con alguna discapacidad la vulnerabilidad aumenta, así como también si se carece de servicios básicos.
Económica	30	La capacidad económica es fundamental ante el impacto posible de una erupción volcánica, sobre todo debido a que las actividades que generan las fuentes de empleo en las comunidades son altamente susceptibles a los distintos escenarios de afectación.
Organización local	20	La organización comunal y autoridades es fundamental para la gestión del riesgo, así como el conocimiento de la población local sobre planes de acción ante emergencias, rutas de evacuación y equipamiento disponible. De esta manera se gestiona el riesgo.
Percepción del peligro	10	Si bien es cierto el conocimiento histórico de los peligros volcánicos presentes en la comunidad tiene un impacto en las acciones de prevención, sin embargo, ante un escenario de afectación este no se podría prevenir.
General	100	Se incluyen los tipos de vulnerabilidad mencionadas.

Para obtener el nivel de vulnerabilidad comunitario, se estableció de acuerdo con la cantidad de variables que presenta cada vivienda relacionados a la capacidad de respuesta y adaptación, luego se generó un promedio a nivel de las comunidades. Se aplicó la siguiente fórmula, la cual fue adaptada a partir de diseño de un indicador de vulnerabilidad comunal ante eventos volcánicos, elaborado por Campos y Barrantes (2020).

El peso de la vulnerabilidad en las viviendas se determina aplicando la fórmula:

$$V_v = (\sum V_p \% \frac{C_v}{T_v}) / T_e$$

Donde:

V_v = Valor de la vulnerabilidad en la vivienda

V_p %= Peso porcentual del tipo de vulnerabilidad

C_v = Cantidad de variables presentes en tipo de vulnerabilidad

T_v = Total de variables posibles

T_e = Número de encuestas realizadas en la comunidad

Vulnerabilidad comunitaria

$$V_c = \sum V_v$$

Donde:

V_c = Vulnerabilidad comunitaria

V_v = Valor de la vulnerabilidad en la vivienda

Luego se establecen los rangos sobre el nivel de vulnerabilidad comunitaria con el fin de identificarlos de manera cualitativa (Cuadro 9.3).

Cuadro 9.3: Rangos de evaluación del nivel de vulnerabilidad comunitario.

Nivel de vulnerabilidad	Rangos
Bajo	0-0,36
Medio	0,37-50
Alto	0,51-0,70
Muy alto	0,71-1

A partir de la georreferencia de las viviendas, se logró contabilizar 309 viviendas dentro de las comunidades, para establecer el número de viviendas a encuestar, se asignó un nivel de confianza del 95 %, con un margen de error del 10 %, dando como muestra representativa un total de 76 viviendas.

La fórmula aplicada para establecer el tamaño de la muestra mínima representativa (basado en López y Fachelli, 2015) fue la siguiente:

$$n = \frac{Z^2 * pq * N}{(N - 1) * e^2 + Z^2 * pq}$$

Cuadro 9.4: Variables de la fórmula de muestra mínima para población finita a partir de la fórmula establecida por Mendenhall et al. (2003).

Variable	descripción	valor
Z	Nivel de confianza	1.96
N	tamaño de población (viviendas)	306
e	Error aceptado	0.10
p	Variabilidad positiva	0.5
q	Variabilidad negativa	0.5
n	tamaño de muestra	76

Luego de establecer el número viviendas a encuestar se realiza el muestreo aleatorio simple a través del programa ArcGis 10.8, donde cualquier vivienda tiene la misma probabilidad de ser encuestada. Posteriormente, se realiza las visitas a dichas viviendas elegidas y se le aplica el instrumento a una persona integrante del grupo familiar (mayor a 15 años).

9.1 Factores que condicionan el riesgo

Diversos factores contribuyen a aumentar o disminuir el riesgo. Para ello, por ejemplo, resulta necesario relacionar la vulnerabilidad social comunitaria con la peligrosidad debido a la presencia de los lahares (mayor nivel de peligrosidad), tomando como referencia un periodo de los últimos 30 años de erupciones presentadas por el volcán Rincón de la Vieja. Para la sistematización de los datos en las comunidades, estas fueron delimitadas de acuerdo con las zonas establecida dentro del Plan de Contingencia Comunal.

En lo que respecta a la exposición, se ha dado en la infraestructura vial por lahares principalmente, donde Alpízar (2018), menciona que los puentes sobre los ríos Pénjamo y Azul quedaron totalmente destruidos durante las erupciones de 1991. En efecto, durante la erupción de 1995 los poblados estuvieron parcialmente incomunicados, particularmente Agroindustrial Sur (Asentamiento del IDA), Asentamiento La Flor, Buenos Aires, Gavilán y La Vega. Más recientemente, los pobladores que han quedado temporalmente incomunicados han sido aquellos que deben cruzar el vado sobre la quebrada Azufrada.

Para determinar la peligrosidad, se estableció de acuerdo con el mapa de peligros volcánicos de Alpízar (2018), modificado en el presente trabajo, donde se tomó la frecuencia temporal en que se da la presencia de los lahares sobre la quebrada Azufrada y los ríos Azul, Pénjamo y Blanco. A continuación, se le asignado una valoración cualitativa a cada zona compuesta por las comunidades, de acuerdo con la frecuencia temporal de lahares (peligrosidad) y efectos sobre la infraestructura vial (exposición).

Para establecer el nivel de peligrosidad, se subdividió en tres zonas:

- 1: La zona no presenta lahares (Dos Ríos).
- 2: La zona presenta lahares poco frecuentes, uno o varios cada siglo (Zona Manzanares-Argelia-El Gavilán).
- 3: La zona presenta lahares frecuentes, uno o varios eventos cada década (Zona El Gavilán-Buenos Aires, zona asentamiento Agroindustrial Sur y zona de Buenos Aires).

Cuadro 9.5: Valoración cualitativa de la peligrosidad.

Nivel	Valoración
Alto	3
Medio	2
Bajo	1

Entonces, se desprende que: 1: La zona no presenta afectación en la infraestructura vial, posee rutas de evacuación disponible (zona de Dos Ríos). 2: La zona presenta afectación en la infraestructura vial, rutas de evacuación habilitadas (zona Manzanares-Argelia-El Gavilán y zona Buenos Aires). 3: La zona presenta afectación en la infraestructura vial (río Azul y Pénjamo), rutas de evacuación inhabilitadas (zona El Gavilán-Buenos Aires). 4: La zona presenta afectación en la infraestructura vial (paso por quebrada Azufrada), ruta inhabilitada siempre que se dan erupciones con presencia de lahares.

Cuadro 9.6: Valoración cualitativa de la exposición o vulnerabilidad social comunitaria.

Nivel	Valoración
Muy alto	4
Alto	3
Medio	2
Bajo	1

En último lugar, se establece una matriz de riesgo donde se realiza la interrelación entre el nivel de peligrosidad, exposición y la vulnerabilidad a nivel comunitaria, para lo cual se realiza una ponderación de dichos niveles. De esta manera, se obtiene un índice de riesgo asociado a lahares, que luego se representa a través de un mapa para el análisis espacial. Se aplica la siguiente fórmula para obtener el producto del riesgo, siguiendo la metodología de Llinares et al. (2004).

$$\text{Riesgo} = \text{peligrosidad} * \text{vulnerabilidad} * \text{exposición}$$

Cuadro 9.7: Matriz de riesgo (según la metodología de Rodríguez, 2018).

Justificación del índice	Índice de riesgo	Nivel de riesgo
Zona de peligrosidad 1, zona de exposición 1 y tipo nivel de vulnerabilidad 1, 2, 3 o 4 (1 x 1 x 1 o 4)	1-4	Bajo
Zona de peligrosidad 2, zona de exposición 2 y tipo nivel de vulnerabilidad 1 y 2 (2 x 2 x 1 o 2); zona de peligrosidad 2, zona de exposición 3 y tipo nivel de vulnerabilidad 1 (2x3x1); zona de peligrosidad 3, zona de exposición 2 y tipo nivel de vulnerabilidad 1 o 2 (3 x 2 x 1 o 2)	6-12	Medio
Zona de peligrosidad 3, zona de exposición 3 y tipo nivel de vulnerabilidad 1 y 2 (3 x 3x 1 o 2); Zona de peligrosidad 4, zona de exposición 2 y tipo nivel de vulnerabilidad 1, 2 o 3 (4x2x1 o 3)	16-24	Alto
Zona de peligrosidad 4, zona de exposición 3 y tipo nivel de vulnerabilidad 1, 2 o 3 (4 x 3 x 1 o 3); Zona de peligrosidad 4, zona de exposición 4 y tipo nivel de vulnerabilidad 4 (4 x 4 x 4)	36-64	Muy Alto

9.2 Usos del suelo

Se tuvo dificultad al momento de establecer las categorías de bosque debido a que no existe una clara diferencia entre la categoría denso y secundario (con base en los criterios analizadas de textura y forma). Sin embargo, se determinó la predominancia de bosques con 6939 ha (debido a que forman parte del parque nacional Rincón de la Vieja y los corredores biológicos Cacao y Rain Forest), por lo tanto, protegidos del Área de Conservación Guanacaste (Fig. 9. 1). En segundo lugar, el uso antropogénico que predomina es la cobertura de pastos, generalmente, conformado por sistemas silvopastoriles utilizados para la ganadería de leche en la zona con 2012.2 ha. Los cultivos permanentes y anuales suman un área total de 86.4 ha.

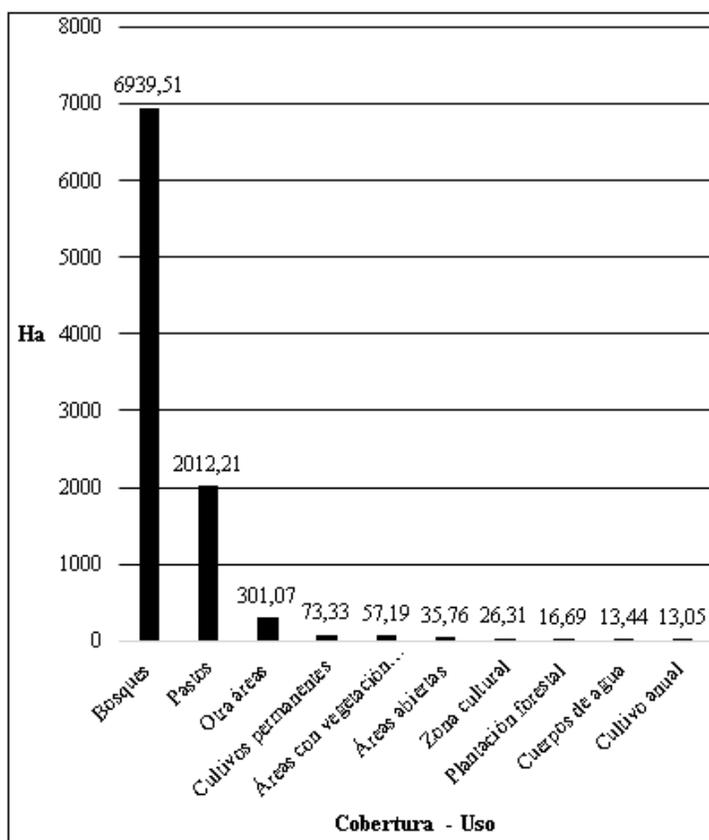


Fig. 9.1: Coberturas y uso del suelo (ha), comunidades de Argenial, Buenos Aires, El Gavilán y Manzares.

Bosque denso: Esta cobertura se define como una constitución de elementos arbóreos conformados por estratos de copas más o menos continuos con una altura en promedio superior a los 5 m, los cuales no han sido intervenidos por el ser humano (MAG, 2015). Esta cobertura es de 6939.5 ha, pertenecientes al parque nacional Rincón de la Vieja (Ley N° 5398 del 22 de abril de 1974) con una dirección SW, desarrollado en altas altitudes. Así como también, se encuentran localizados en los corredores biológico Cacao y Rain Forest, permitiendo la protección de los ecosistemas, así como también, sirviendo como una barrera para el impedimento de la expansión de las actividades pecuarias se desplace hacia las partes altas de la cordillera, así como la actividad turística (Fig. 9.2).

Bosque secundario: La cobertura de bosque secundario (menos denso), se define por parámetros como una comunidad vegetal de tipo arbórea o arbustiva, cuyos estratos de copas son menos continuos, donde sus estructuras originales han intervenidas por el ser humano (MAG, 2015). Este tipo de cobertura es menos extenso que el bosque denso, localizado en altitudes medias y bajas con una cercanía inmediata de las actividades pecuarias que generan una alta presión hacia este (Fig. 9.2).

Bosque de galería: Son bosques que se localizan en los márgenes de los cursos de agua, ya sean estas temporales o permanentes, es decir, su amplitud se ve limitada por dichos cuerpos de agua (MAG, 2015). En el área de estudio este tipo de cobertura se encuentra paralela al cauce de los ríos Pénjamo y Azul, así red hídrica de menor volumen de escurrimiento como quebradas. La cual se ha visto presionada por la tala de los árboles para la expansión de cultivos y pastos para la ganadería (Barrantes y Sandoval, 2011).

Pastos: Esta es una cobertura de la tierra dominada por gramíneas dedicadas al pastoreo, además pueden estar constituidos por formaciones arbóreas distribuidos de manera aleatoria o en patrones (MAG, 2015). En el caso del área en estudio representan el 23.1 % del área, bajo las categorías de pastos limpios (constituidos por pastos de piso) y pastos arbolados (bajo un sistema silvopastoril), los cuales son utilizados para el desarrollo de la ganadería de leche, siendo una de las principales actividades económicas dentro de las comunidades.

Cultivos: Se identificó 2 categorías de uso, en primer lugar, se desarrollan cultivos anuales, donde el ciclo vegetativo de estos tarda aproximadamente pocos meses. En las comunidades el único cultivo anual observado a través del proceso de fotointerpretación es el maíz, el cual se desarrolla para el autoconsumo o venta al por menor con un área de 13.05 ha. La segunda categoría son los cultivos permanentes, los cuales producen sin necesidad de volverlos a sembrar cuyo ciclo vegetativo es superior a un año (MAG, 2015). Los cultivos permanentes, presentes en las comunidades representan un área de 73.33 ha, corresponden a plantaciones de limón y naranja, que se vende a intermediarios y a la agroindustria Del Oro, localizada en el cantón de La Cruz. También se encuentran plantaciones de plátano y rambután a bajo sistemas de cultivo a pequeña escala.

Áreas abiertas: Son terrenos donde no existe vegetación o es muy escasa, los cuales se compone principalmente de suelos desnudos (MAG, 2015). Dentro del área de estudio estas se componen de afloramientos rocosos en la base del volcán Rincón de la Vieja, terrenos descubiertos para la quema de cultivos, explotaciones mineras de tajos y terrenos degradados por el paso de los lahares, principalmente en el cauce del río Pénjamo.

Zona cultura: La zona cultural está constituida por los centros poblados de las comunidades, en este caso Argelia, Buenos Aires, Dos Ríos, El Gavilán y Manzanares. Por otro lado, la actividad turística se ha desarrollado principalmente a través de complejos turísticos localizados en las comunidades de Buenos Aires y El Gavilán debido a los atractivos naturales presentes en los ríos El Gavilán y Pénjamo (una serie cascadas y pozas) y fuentes termales.

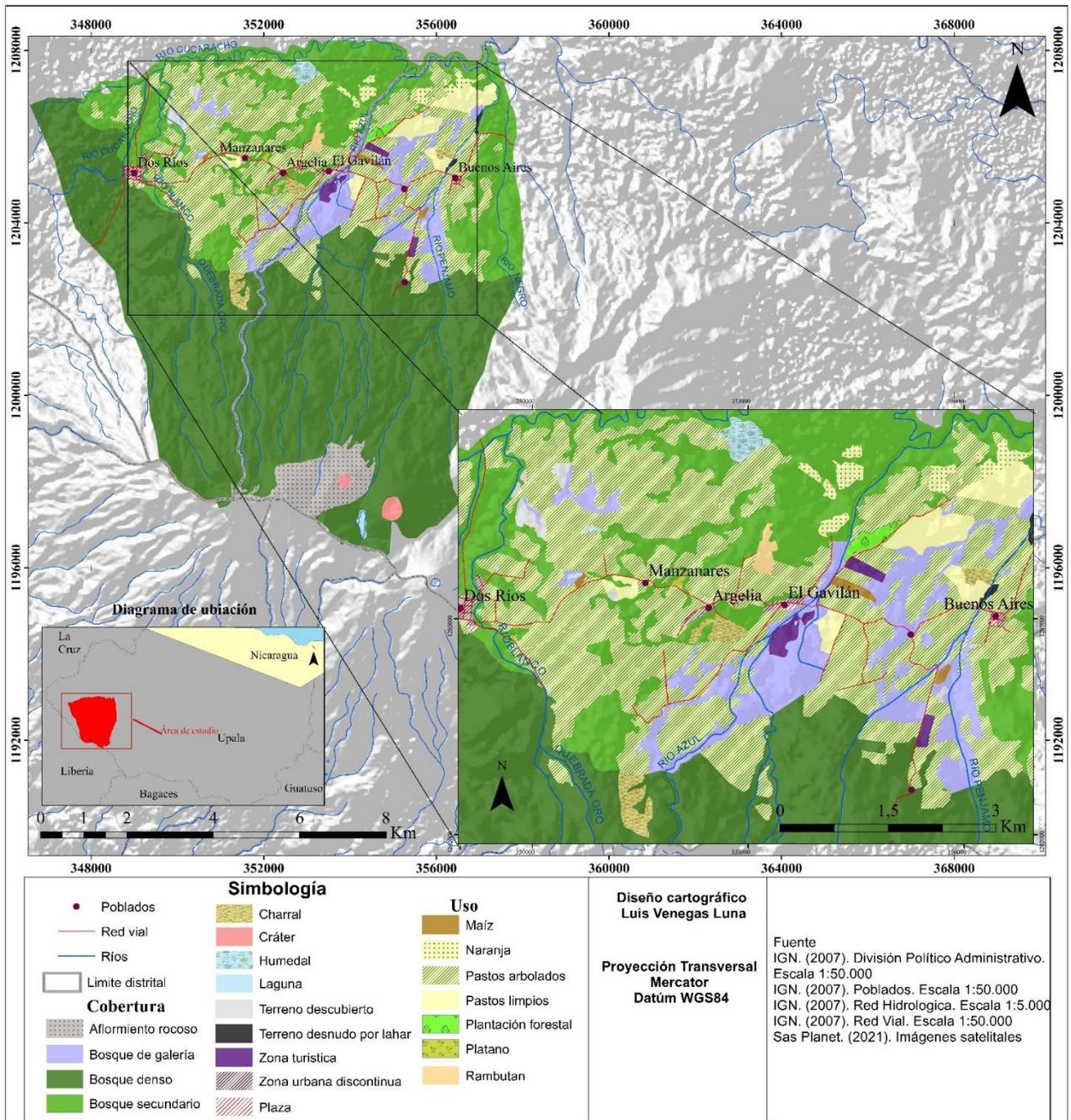


Fig. 9.2: Comunidades de Argelia, Buenos Aires, Dos Ríos, El Gavilán y Manzanares: Cobertura y uso del suelo, 2021.

9.2.1 Actividades productivas y su vulnerabilidad ante eventos volcánicos

De acuerdo con los resultados obtenidos, las comunidades cuentan con una predominancia del uso del suelo para la cobertura de bosques y territorios dedicados para las actividades agro-productivas, por medio del uso para pastos (arbolados principalmente y limpios) y en menor medida el uso para cultivos permanentes y zonas recreativas (complejos turísticos). Este análisis espacial, permite realizar una valoración de la vulnerabilidad de las actividades desarrolladas, en relación con posibles escenarios de afectación por parte de los peligros volcánicos (lahares y caída de ceniza) establecidos en los modelos determinísticos de Alpízar (2018) y Aguilar y Alvarado (2020).

Las actividades económicas están ligadas a la influencia de manera indirecta, en relación con el volcán Rincón de la Vieja, pues, las comunidades están asentadas sobre los órdenes de suelo andisoles y ultisoles (Centro de Investigaciones Agronómicas, 2013), los cuales se forman a partir de la meteorización de depósitos de cenizas y materiales volcánicos, permitiendo una alta fertilidad para los pastos y la siembra de diversos tipos de cultivo permanentes (INITTA, 2015).

En el caso del turismo desarrollado en las comunidades, su sistema turístico gira entorno a atractivos de tipo natural, como pozas y cascadas dentro de los cauces de los ríos Azul y Pénjamo, además de prácticas como avistamiento de aves y senderismo en el bosque tropical lluvioso, sin dejar de lado, la hermosa panorámica del atardecer, el volcán y la campiña (CATURVI, 2021). Tal como se ve evidenciado en el Plan de Contingencia Local, donde se establece que las zonas de El Gavilán-Buenos Aires y la zona de Agroindustrial Sur son los que aglomeran la oferta turística. En la zona de Agroindustrial Sur se localizan los centros turísticos: Sensoria y la atracción turística Dino Park y el centro turístico Bromelias; en la zona de El Gavilán-Buenos Aires se encuentran Blue River, Kiwanda Maggic, Rustico Rincón Viejo, Hospedaje la Casona, Cafetería Santa Fé, Hospedaje Los Nacientes, OSKI Rooms y Hungry shark (CNE, 2019).

En relación con el peligro por lahares y caída de ceniza en las comunidades, se toma un escenario a partir de la información sobre estudios previos en relación con los depósitos de los peligros y modelos previamente establecidos. En los mapas se puede observar la afectación generada en las comunidades, en primer lugar, la red vial está compuesta únicamente por una vía que comunica de W a E todas las comunidades. De acuerdo con las erupciones ocurridas en 1991, Soto et al. (2003a, b) mencionan que los lahares sobrepasaron los 8 m en el río Azul y los 20 m en el río Pénjamo y 75 m aproximadamente a ambos lados del río destruyendo ambos puentes. En el modelo de Alpízar (2018), modificado por Aguilar y Alvarado (2020), podría pensarse o manejarse que ambos puentes quedarían destruidos nuevamente, conllevando a la incomunicación en las rutas de evacuación, de las comunidades de El Gavilán, Asentamiento Agroindustrial Sur y Buenos Aires.

La afectación en las viviendas, las comunidades más afectadas serían El Gavilán (cercanas al cauce o álveo del río Azul) y Dos Ríos con una posible inundación producto de un lahar en el río Blanco (Alpízar, 2018), aunque con una probabilidad mucho más baja. Además, se puede evidenciar una posible afectación en el Salón comunal de El Gavilán, por

lo que se recomienda no utilizarlo como centro de albergue. Según la delimitación realizada en el mapa de uso de suelo (Fig. 9.3), la zona turística presenta su aglomeración en los sitios localizados o propensos a verse afectados por los lahares.

De acuerdo con Soto et al. (2003a), en 1995 el asentamiento Agroindustrial Sur se vio inhabilitado el paso sobre la quebrada Azufrada, así como se verían incomunicadas la aglomeración turística compuesta por Sensoria, Dino Park y centro turístico Bromelias. Ello generaría un impacto negativo en el sector laboral de las comunidades, por el no ingreso de turistas a la zona, así como también se vería afectado el centro turístico Blue River y Kiwanda Maggic, entre otros.

Estos efectos generarían un impacto socioeconómico importante si se toma en consideración que es una de las principales actividades económicas y que generan mayor oferta de empleo en las comunidades (CATURVI, 2021). Mientras que, las actividades agrícolas se verían afectadas a través de los productos de exportación como el caso de la naranja, la cual se exporta hacia la empresa agroindustrial del Oro, la venta de la producción de leche y sus derivados también, sobre todo tomando en consideración que muchos de los productores entregan sus productos en la ciudad de Liberia.

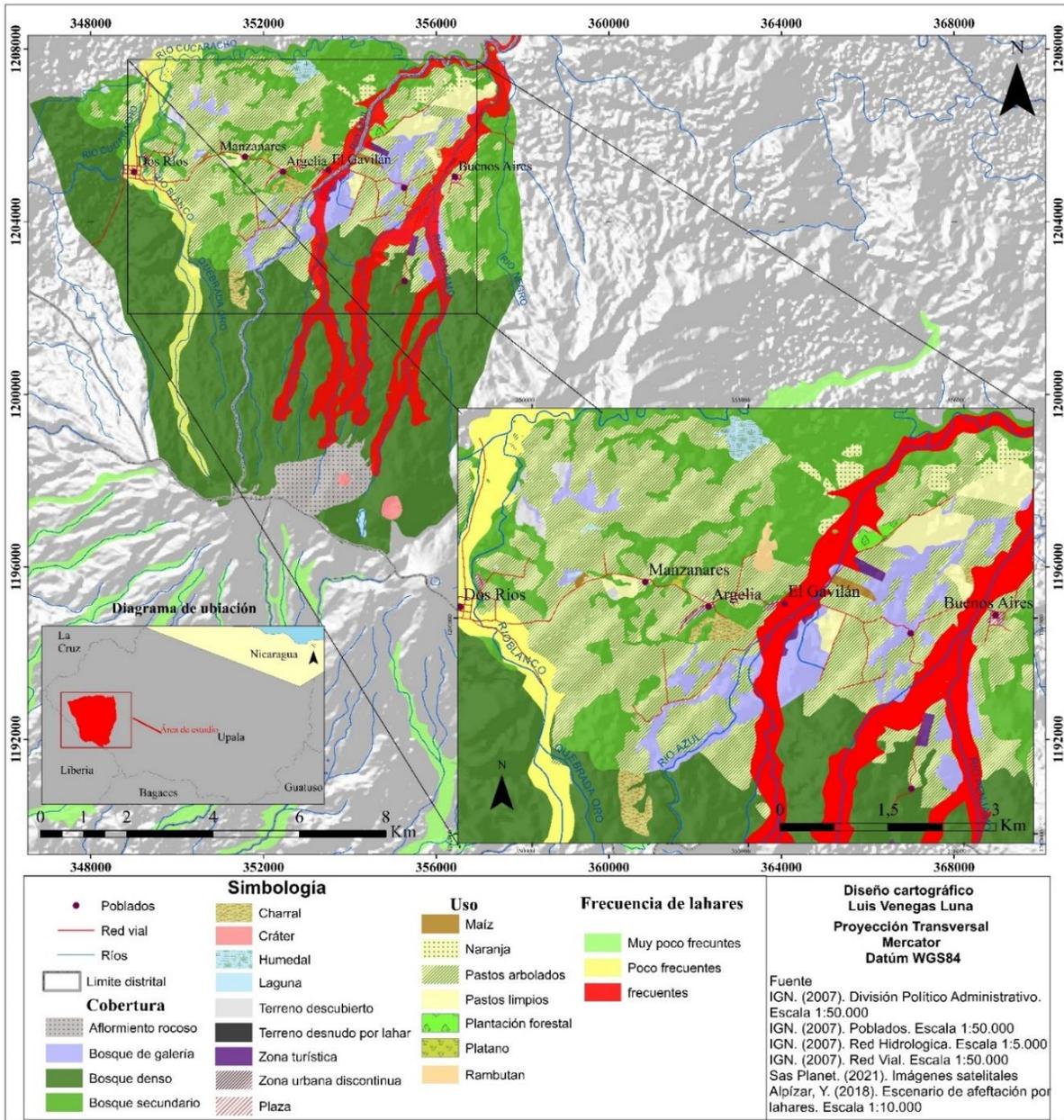


Fig. 9.3: Comunidades de Argelia, Buenos Aires, Dos Ríos, El Gavilán y Manzanares: Cobertura y uso de suelo 2021 y escenario de afectación por frecuencia de lahares.

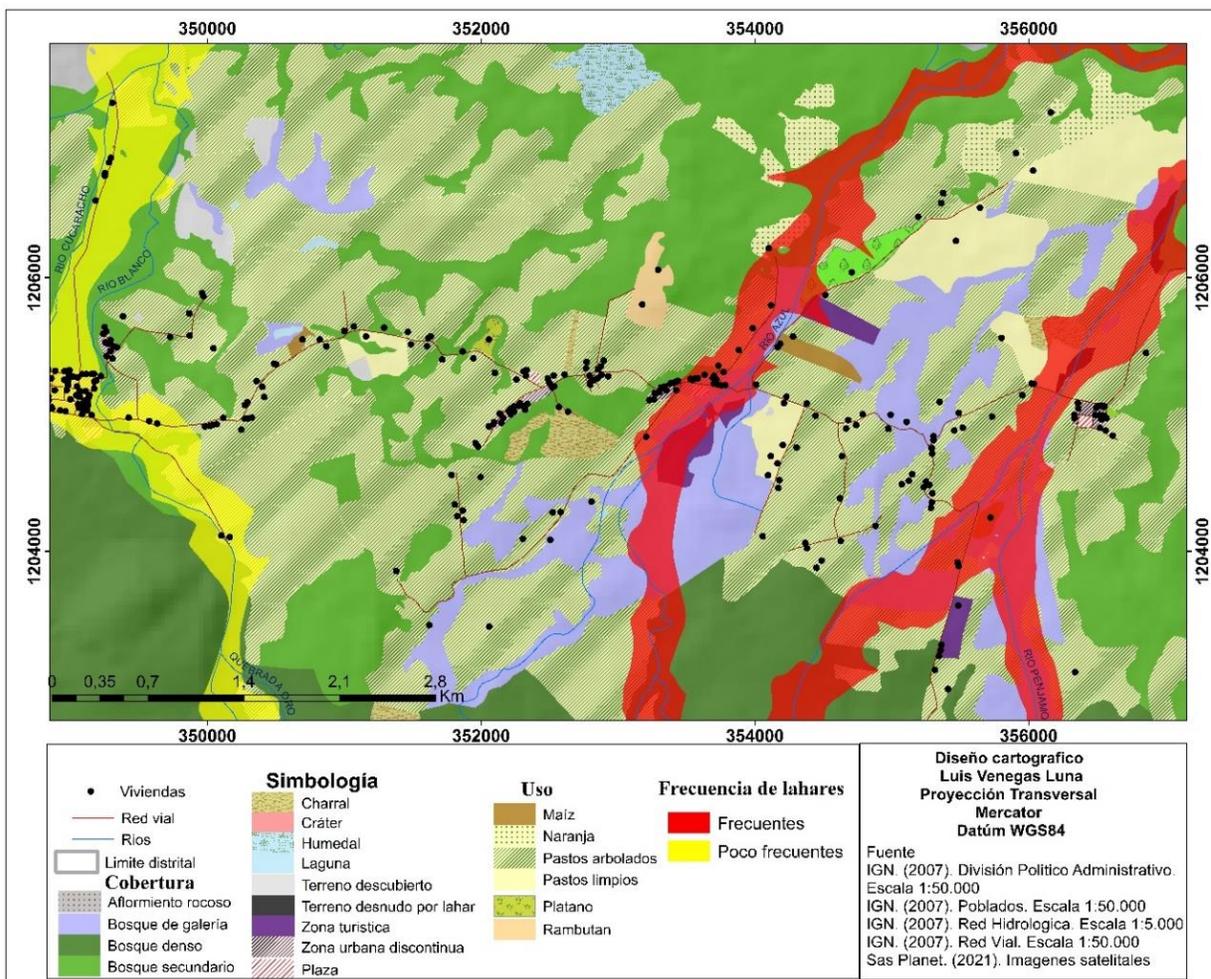


Fig. 9.4: Detalle de afectación por los lahares en los sectores productivos y de vivienda.

La amenaza principal con respecto a la caída de ceniza estaría en las comunidades, y en el sector agropecuario, afectando la ganadería de leche y los cultivos de frutas como la naranja (Fig. 9.5).

De acuerdo con el mapa de cobertura y uso del suelo y los modelos de peligros volcánicos, se pudo determinar que las actividades agro-productivas y ligadas al turismo son las que poseen una alta vulnerabilidad. En primer lugar, los sectores agro-productivos (cultivos y pastos) de las comunidades son los que tendrían un mayor impacto parte de la caída de ceniza. Mientras que ante el escenario de lahares los mayores efectos serían principalmente el sistema turístico, ya que las comunidades de Buenos Aires y El Gavilán son las que se encuentran en la zona de mayor nivel de peligro. Además, estos sectores aglomeran las actividades de servicios en la zona hotelera, una de las fuentes principales de empleo. La comunidad de Dos Ríos posee una alta vulnerabilidad de inundación de acuerdo con el modelo de lahares, por otro lado, las comunidades de Argelia y Manzanares serían las que presentan una menor vulnerabilidad de acuerdo con los peligros volcánicos analizados, debido a su lejanía de los ríos.

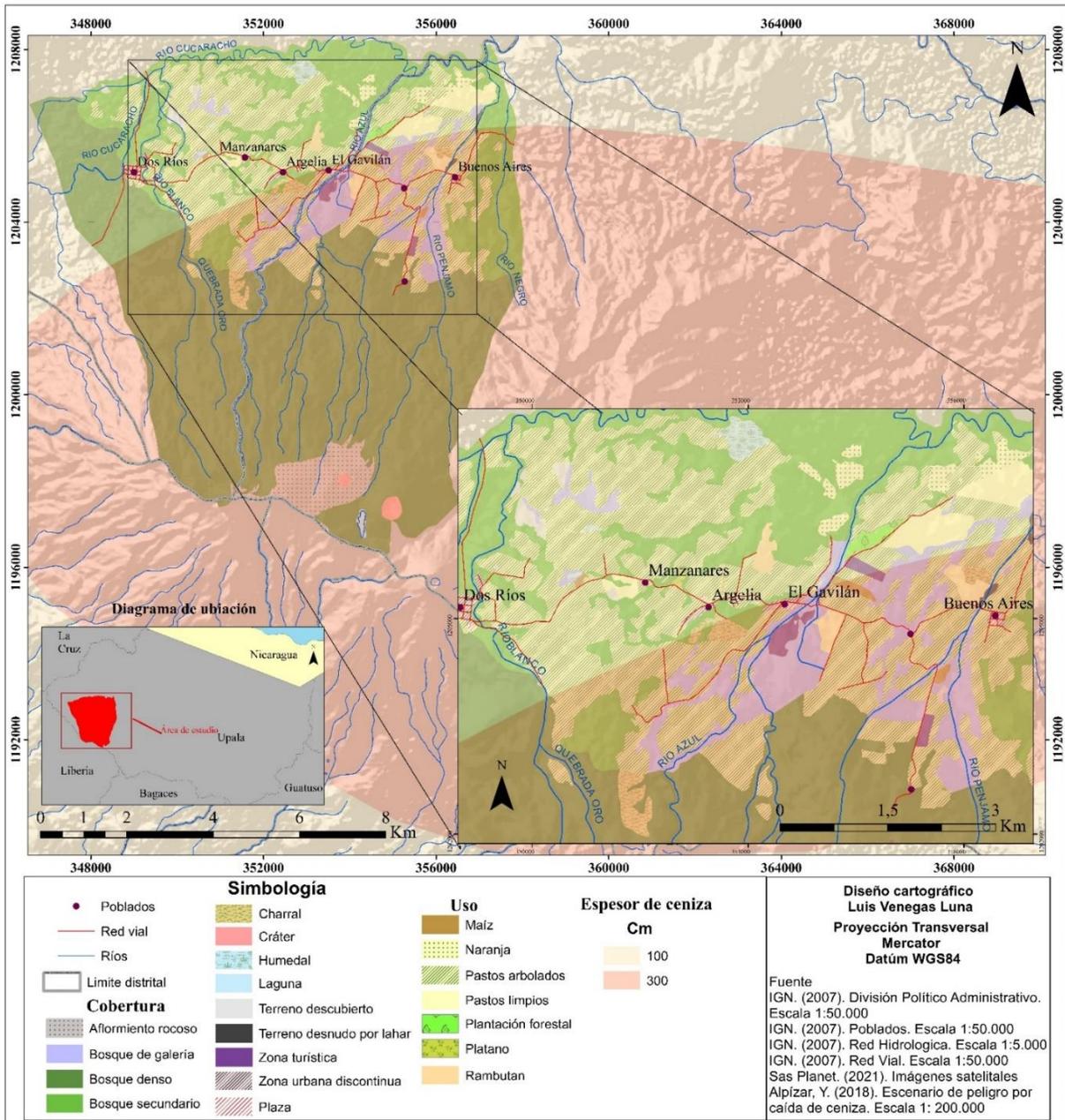


Fig. 9.5: Uso del suelo (2021) y escenario de peligro por caída de ceniza en las comunidades de Argelia, Buenos Aires, Dos Ríos, El Gavilán y Manzanares.

9.2.2 Vulnerabilidad de las viviendas

Durante la aplicación de las encuestas, según la muestra representativa de 76 viviendas a encuestar, sin embargo, únicamente se lograron aplicar 60, debido a las siguientes situaciones: en ciertas viviendas el integrante del grupo familiar no aceptó participar en la aplicación del instrumento y, en algunas viviendas, no se encontraba ningún miembro del grupo familiar al momento de realizar la visita (Fig. 9.6).

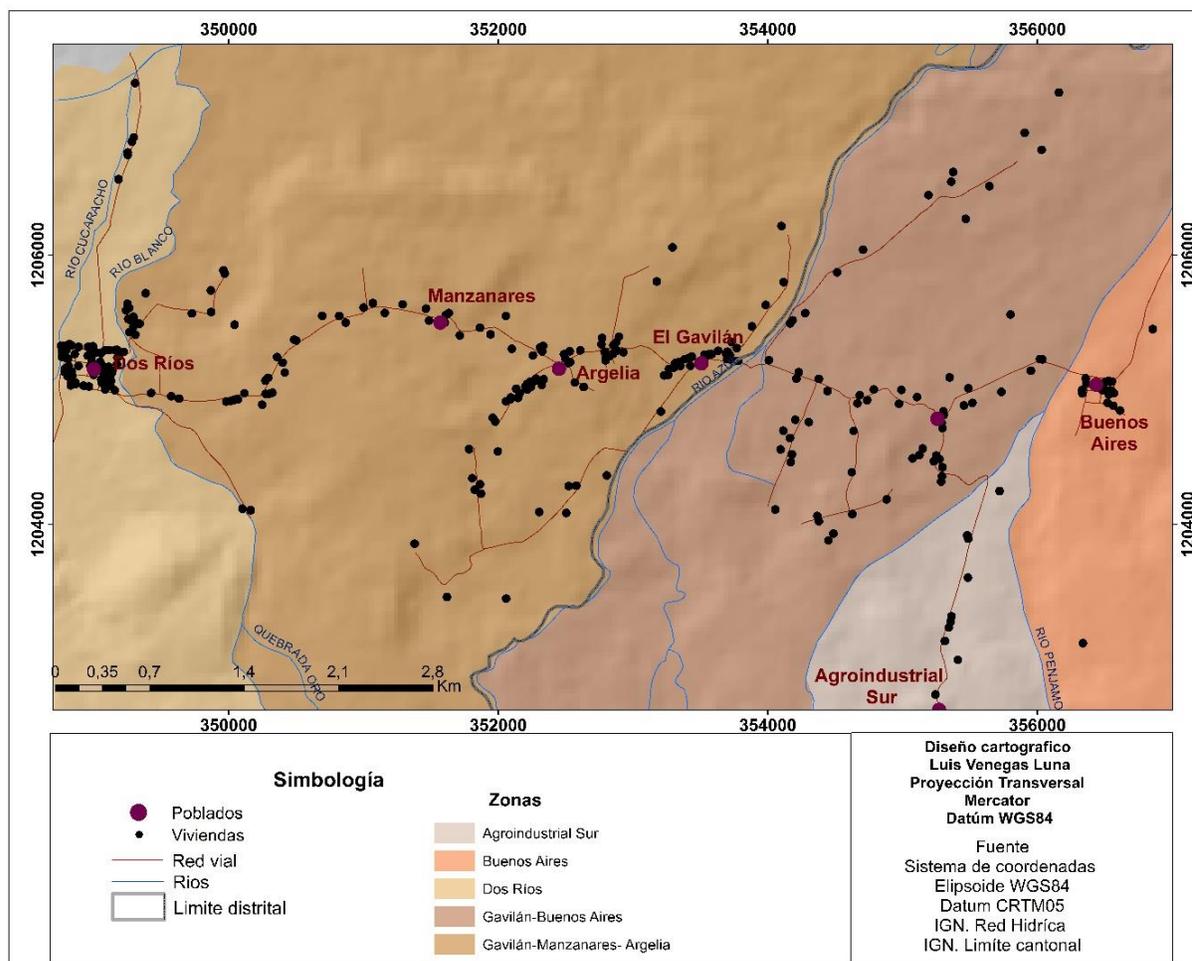


Fig. 9.6: Localización de cada una de las viviendas seleccionadas al azar para la encuesta.

En primer lugar, se evaluaron las variables intrínsecas de los miembros del grupo familiar, que son posibles factores asociados a la vulnerabilidad social ante un escenario de afectación por actividad volcánica. Se identificó, en términos generales, aquellas comunidades que tienen un nivel de vulnerabilidad social bajo a medio (Fig. 9.7), donde muchos de los hogares cuentan con suministro de los servicios básicos (agua potable y electricidad). Asimismo, cuentan con un medio para la comunicación (celular) ante cualquier evento volcánico y acatar las medidas emitidas por las autoridades competentes. Por otro lado, se encuentran pocos hogares con miembros del grupo familiar que presenten alguna

discapacidad para moverse y generalmente, se encuentra una alta tasa de alfabetización dentro de las comunidades. Sin embargo, en la zona de El Gavilán-Buenos Aires, las viviendas encuestadas poseen un nivel de vulnerabilidad social medio. Esto se debe a factores como: se encuentran mayor cantidad de adultos mayores (65 años o más), mayor cantidad de personas menores de 5 años, así como también, gran parte de los grupos familiares son conformados por 5 o más personas y se encuentran personas analfabetas (16 %). En la zona compuesta por las Comunidades de El Gavilán-Argelia y Manzanares, específicamente en la comunidad de El Gavilán los hogares tienen un nivel de vulnerabilidad social media y alta, debido a las mismas características que se mencionaron para la zona El Gavilán-Buenos Aires, para lo cual se trató de mapear la distribución espacial de los niveles de vulnerabilidad social a nivel de viviendas dentro de las comunidades (Fig. 9.8).

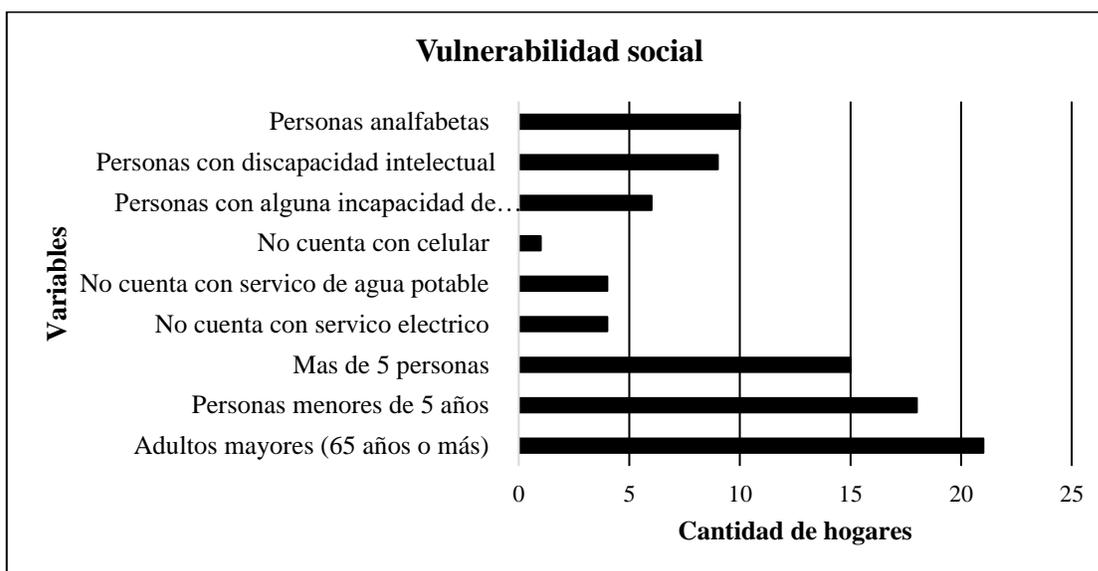


Fig. 9.7: Vulnerabilidad social de las viviendas.

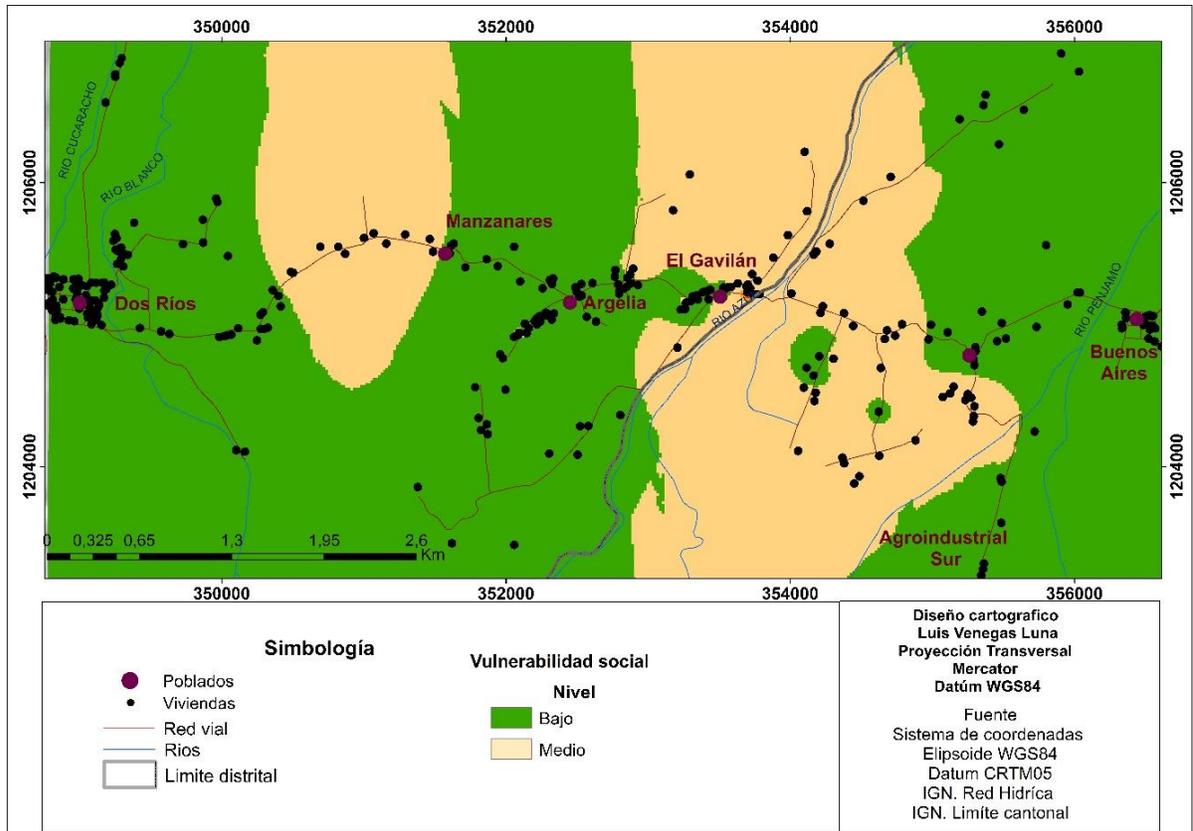


Fig. 9.8: Nivel de vulnerabilidad económica en las viviendas de las comunidades.

En la vulnerabilidad económica se evaluaron aquellas variables asociadas a los ingresos y las actividades económicas desarrolladas por los miembros del grupo familiar encuestado, relacionadas con base en la respuesta ante un escenario de afectación y su resiliencia económica. En las comunidades predomina un nivel de vulnerabilidad económica alto, donde las variables que determinan dicho nivel (Fig. 9.9). Entre ellos se tiene, el trabajo o actividad productiva que desarrollan los miembros del grupo familiar se vería afectado ante un escenario de afectación mucho mayor, lo cual se debe a que la mayoría de las viviendas encuestadas los miembros que laboran están relacionados al sector de servicios y actividades agropecuarias. Si bien es cierto, en el grupo familiar algún miembro labora, estos no cuentan con el salario mínimo establecido por la ley, lo cual puede estar correlacionado con la variable de que una gran cantidad de los miembros del grupo familiar, en las viviendas encuestadas, carecen de la posibilidad de ahorrar (Fig. 9.10).

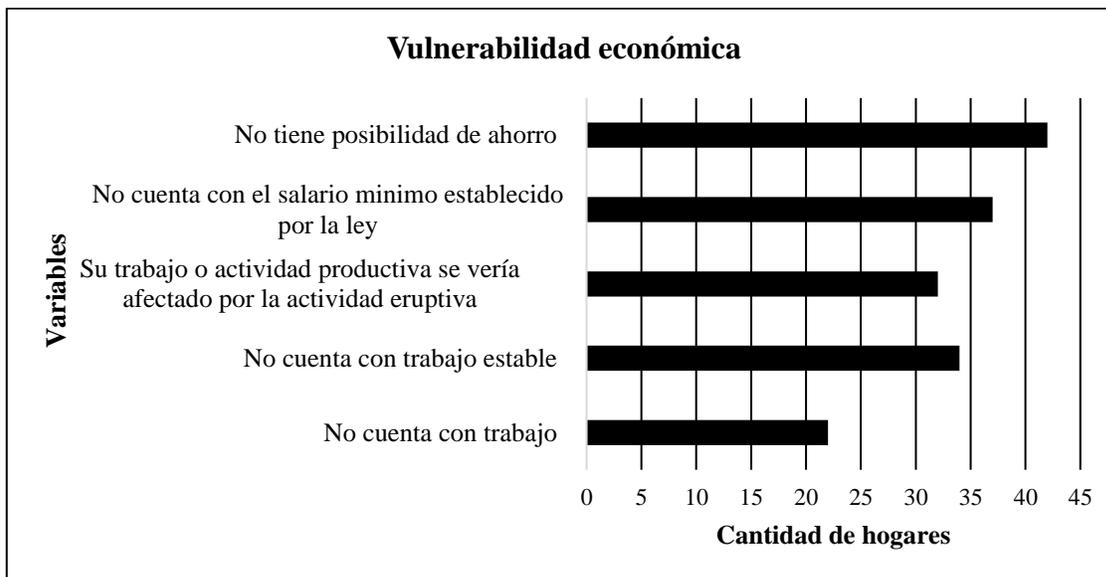


Fig. 9.9: Vulnerabilidad económica de las viviendas.

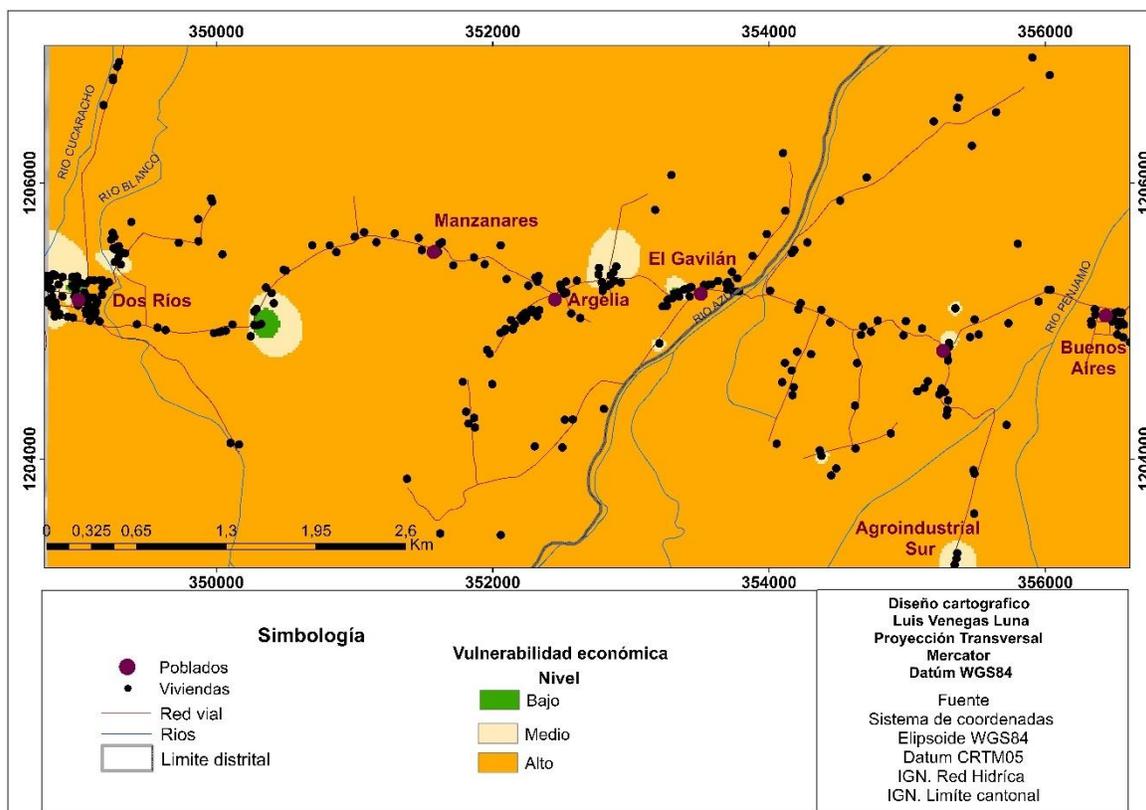


Fig. 9.10: Nivel de vulnerabilidad económica en las viviendas de las comunidades

La vulnerabilidad relacionada a la organización local-institucional se cataloga con nivel alto a muy alto, ya que, si bien es cierto, hay un comité comunal de emergencias encargado de planear estrategias para la disminución del riesgo. Gran cantidad de los hogares encuestados desconoce de su formación o los planes que estos han elaborado en conjunto con demás organismos, como el Comité Municipal de Emergencias y la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Las variables que inciden en dichos niveles de vulnerabilidad son las siguientes (Fig. 9.11): en las viviendas, los miembros de los grupos familiares desconocen de los planes de emergencia (contingencia), al desconocer que existe un comité comunal de emergencias consideran que se necesita de dicha organización. Asimismo, hacen falta aún más programas de capacitación sobre el peligro volcánico y el riesgo asociado que representa vivir en dichas comunidades. También, no se tiene conocimiento de los albergues o sitios de reunión segura ante un escenario de afectación mayor a los ocurridos hasta la actualidad y gran cantidad de las viviendas encuestadas no tienen un plan de evacuación a nivel de vivienda (Fig. 9.12).

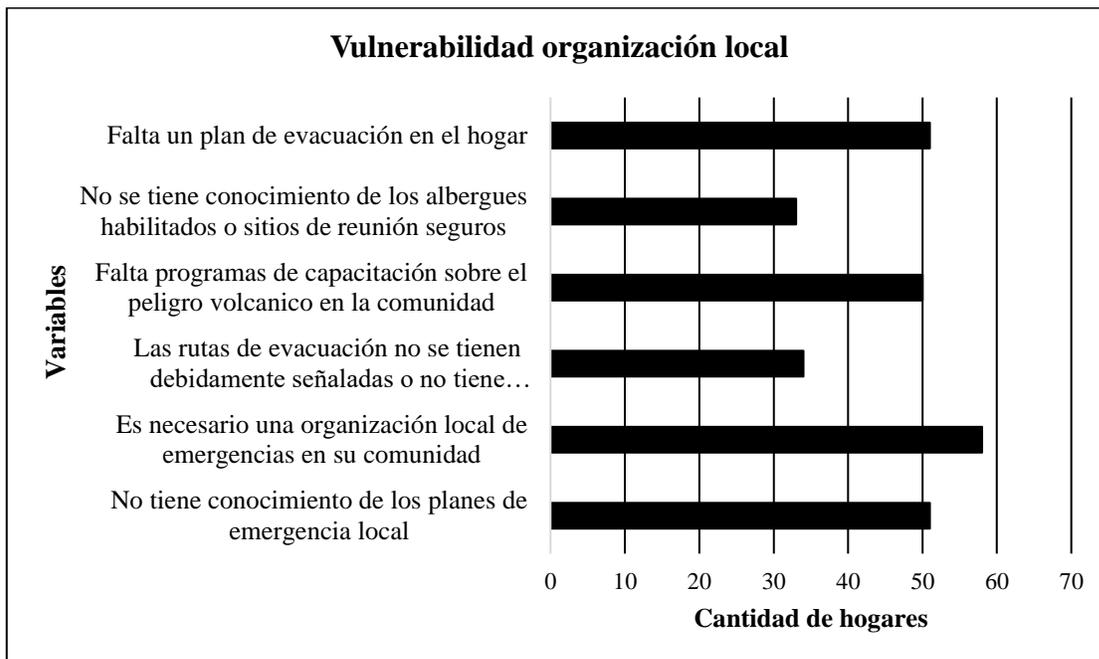


Fig. 9.11: Vulnerabilidad asociada a la organización local.

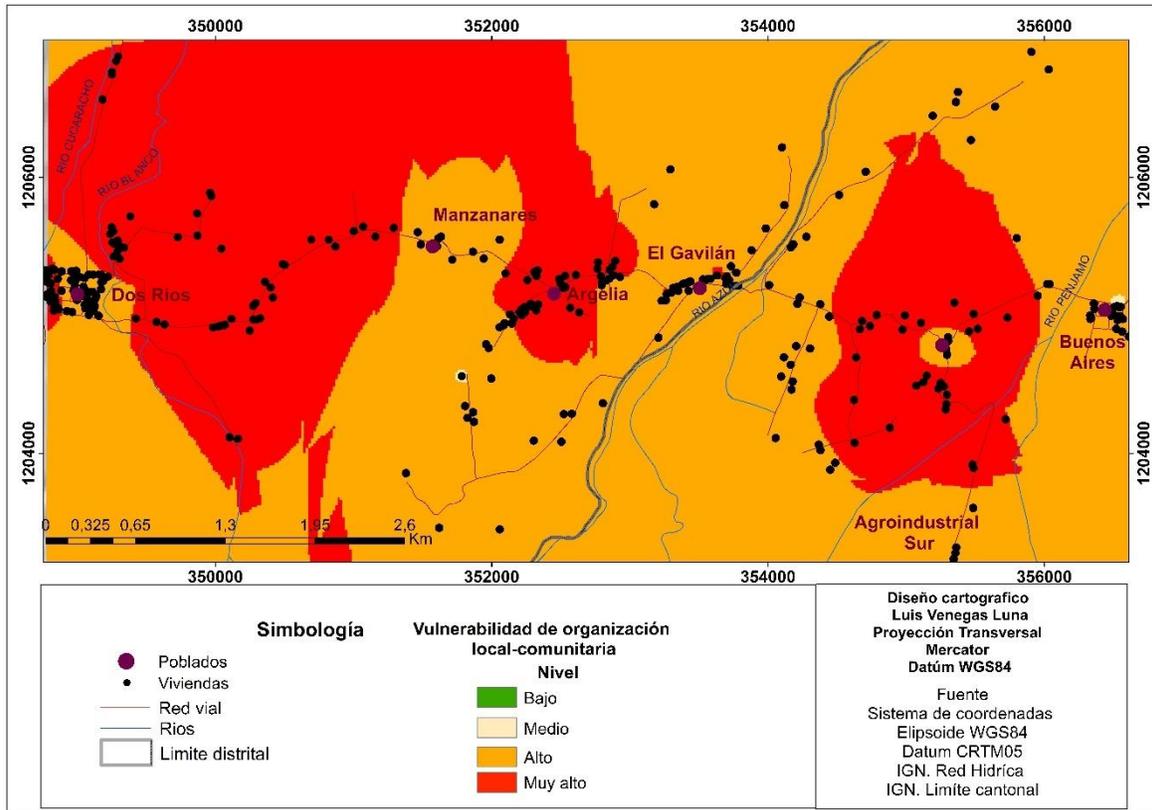


Fig. 9.12: Nivel de vulnerabilidad de organización local-comunitaria.

El último criterio que se decidió evaluar con respecto a la vulnerabilidad a nivel de viviendas es la percepción del riesgo, donde se puede observar una distribución aleatoria alrededor del territorio de las comunidades. En primer, en la zona de Agroyndustrial Sur (asentamiento) se encuentra un nivel alto de vulnerabilidad sobre la percepción del riesgo, debido a que han sufrido afectación directa por la actividad volcánica, ya sea por la interrupción de las rutas de evacuación por la quebrada Azufrada o caída de ceniza que afectó sus cultivos y viviendas. Pero también, las erupciones volcánicas producidas por el volcán Rincón de la Vieja lo perciben como algo cotidiano, lo que puede aumentar su riesgo ante una afectación mayor. En la comunidad de Manzanares el nivel de vulnerabilidad es bajo y medio, ya que no se ha presentado afectación directa por la actividad volcánica, así como también, en la comunidad de Dos Ríos el nivel es medio ya que no han sufrido afectación por parte de los peligros volcánicos. Sin embargo, no confían en las instrucciones del Comité Comunal de Emergencias lo que conduce a que aumente su percepción del riesgo, tal y como se desprende de los gráficos y mapas (Fig. 9.13 y 9.14).

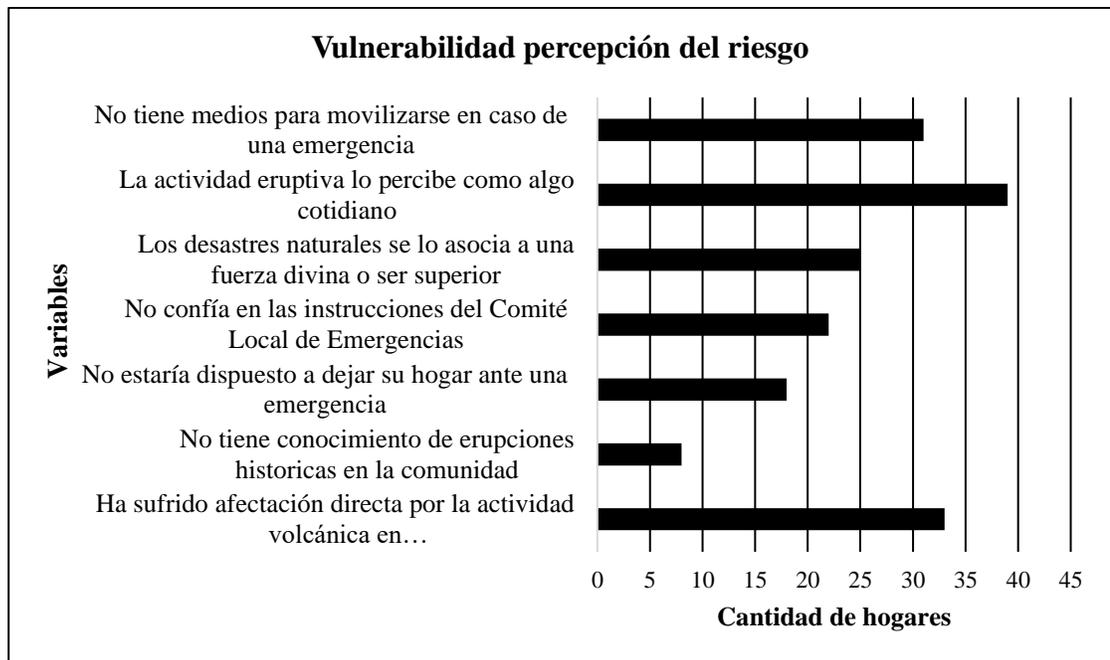


Fig. 9.13: Vulnerabilidad con respecto a la percepción de riesgo en las viviendas

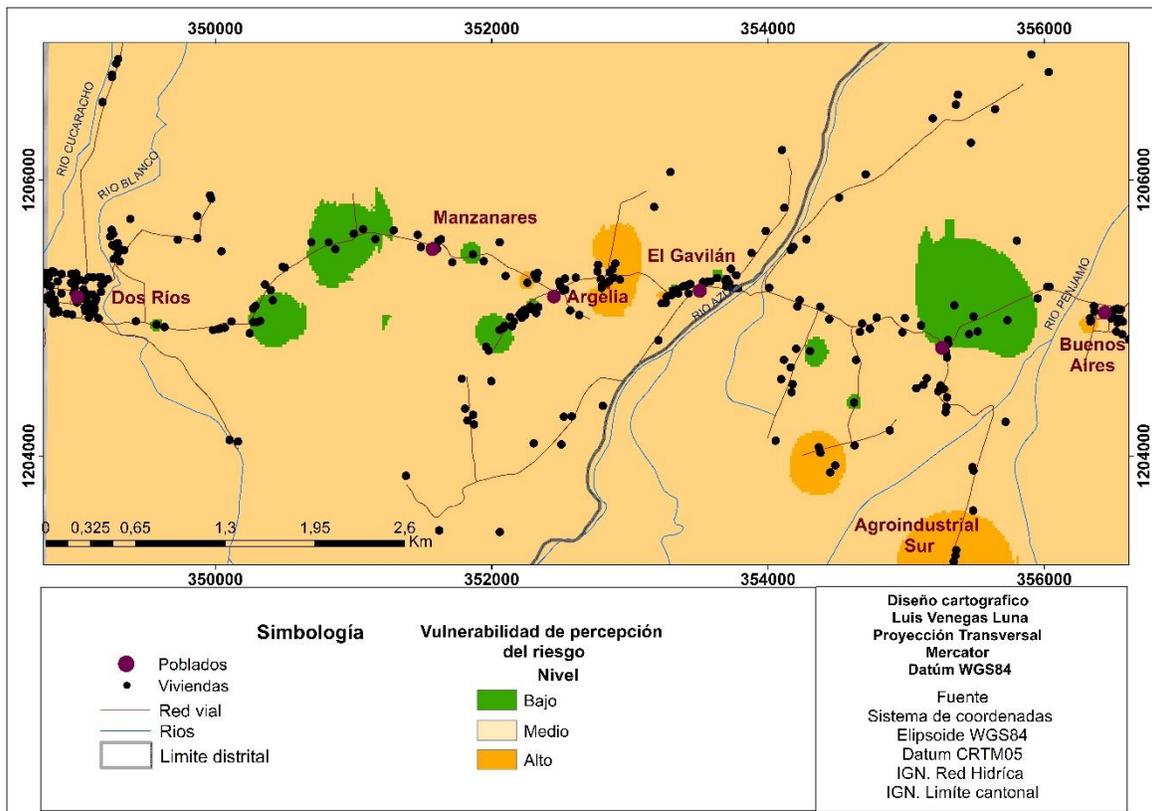


Fig. 9.14: Vulnerabilidad de percepción de riesgo en las viviendas.

9.2.4 Vulnerabilidad comunitaria

Con el fin de establecer la vulnerabilidad a nivel comunitaria se ponderará cada tipo de vulnerabilidad de acuerdo con el peso establecido, tal y como se muestra en el Cuadro 9.2, varias páginas atrás. Según el nivel de vulnerabilidad social comunitario obtenido, la zona compuesta por El Gavilán-Buenos Aires posee un nivel alto, la zona de Buenos Aires y la zona compuesta por El Gavilán-Argelia-Manzanares y la zona de Dos Ríos posee un nivel medio, mientras la zona de Agroindustrial Sur (asentamiento) posee un nivel bajo. En términos generales, el territorio posee una vulnerabilidad comunitaria social media.

El nivel de vulnerabilidad social obtenido se debe ligar, en primer lugar, a aquellas actividades productivas que se desarrollan, que sean altamente susceptibles a verse afectadas ante un escenario de afectación por actividad volcánica (sector turístico y agropecuario), las cuales abarcan la mayor oferta laboral para la población local. Si bien es cierto, las comunidades cuentan con un Comité Comunal de Emergencias, la mayoría de población encuestada en los hogares desconocen de su existencia.

Por otro lado, aunque existe rotulación preventiva desde inicios del 2020 en los ríos por donde escurren los lahares, los cuales muestran el peligro volcánico y rutas de evacuación. Sin embargo, gran parte de los hogares encuestados a finales del 2021 desconocían en ese entonces de dicha rotulación. Un programa permanente reuniones informativas y refrescamiento con las comunidades sobre el riesgo de los peligros volcánicos resulta siempre necesario. En general, hay un alto nivel de desinformación ya que desconocen el plan de contingencia, lo cual se correlaciona con que no identifican los posibles sitios de reunión seguros o albergues que se habilitarían en caso de una emergencia por peligro volcánico. Con el tiempo, esto se vino a solventar, en parte, cuando se pusieron rótulos informativos adicionales con fotografías y textos bilingües en los ríos y quebradas frecuentemente afectadas por los lahares (Fig. 9.15).

La zona de El Gavilán- Buenos Aires es la que posee el nivel de vulnerabilidad social alto, principalmente por las características de los grupos familiares encuestados. Se encuentran una alta cantidad de adultos mayores, también en gran parte de los hogares hay personas menores de 5 años, así como también, el grupo familiar son conformados por 5 o más personas y personas analfabetas. Parte de las actividades productivas en las que laboran en dicha zona son potencialmente susceptibles a verse afectadas, por un evento mayor de actividad volcánica, en donde se concentran los complejos turísticos. Además, de algunos cultivos permanentes como cítricos, que son exportados hacia otros sitios del cantón. La zona de Agroindustrial Sur presenta un nivel de vulnerabilidad social baja, principalmente debido a la escasa población, con hogares integrados por menos de 4 personas, donde no se encuentran personas menores de 4 años, además conocen muy bien la zona de riesgo en la que viven y se tiene conocimiento de los posibles albergues que se habilitarían, entre otros.



Fig. 9.15: Ejemplos de rotulación de advertencia sobre el peligro volcánico y rótulos con información de interés geológico y de los peligros en el flanco caribeño del Rincón de la Vieja. Los rótulos están en inglés y en español. Rótulos similares se instalaron en el PN Rincón de la Vieja en el sector Pacífico.

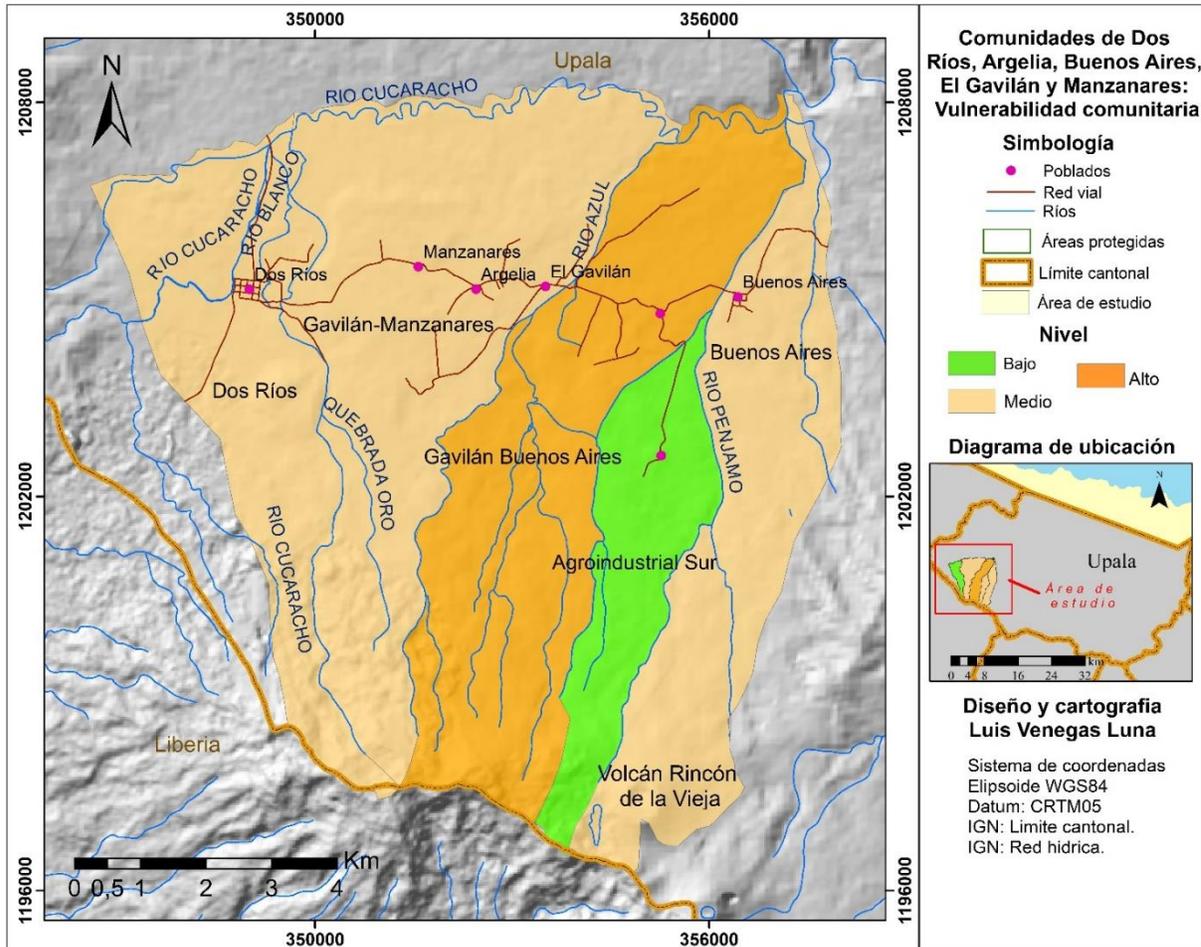


Fig. 9.16: Nivel de vulnerabilidad social en las comunidades ubicadas en el flanco caribeño del volcán Rincón de la Vieja.

Guimarães et al. (2021) enfatizan que deben promoverse una serie de acciones para reducir la vulnerabilidad e incrementar la resiliencia, tales como crear accesibilidad a infraestructura vital y la existencia redundancia, llevar a cabo estudios de peligrosidad y riesgo, implementar sistemas de alerta temprana, así como desarrollar planes de emergencia y el promover actividades educativas. Justamente, todo lo anterior, incluyendo una mejora en las vías de comunicación, aunado a la actualización de los estudios de amenaza volcánica, y una activa promoción de la educación mediante conferencias, capacitación a guías turísticos y guardaparques, rotulación informativa y preventiva, se han venido realizando de modo frecuente e intenso en los alrededores del volcán Rincón de la Vieja, particularmente por parte de la CNE, UNA e ICE, por lo menos desde hace un lustro.

9.3 Una aproximación al riesgo volcánico en el sector norte

9.3.1 Exposición y peligrosidad ante lahares

Las comunidades poseen distintos niveles, tanto de exposición como de peligrosidad, de acuerdo con la afectación de lahares, donde los principales daños han ocurrido en la infraestructura vial (puentes) y el servicio de agua potable, al generarse un impacto social en la población, principalmente por la interrupción de las rutas de evacuación.

A nivel de zonas (establecidas en el plan de contingencia local), en primer lugar, la zona de Agroindustrial Sur se encuentra con un nivel de exposición alto, al igual que el nivel de peligrosidad es muy alto, en comparación con otros sectores. Esto se debe a que cuando se presenta actividad eruptiva con presencia de lahares, la comunidad no tiene vías de evacuación, ya que no existe un puente sobre la quebrada azufrada (se encuentran únicamente las bases). De ahí que es de suma importancia que la Municipalidad de Upala reactive la construcción de dicha infraestructura para reducir la exposición de dicho asentamiento.

La zona compuesta por la comunidad de El Gavilán-Buenos Aires tiene un nivel de exposición y de peligrosidad alto debido a que se presentan lahares muy frecuentes, sobre el río Azul y Pénjamo, como ocurrió durante las erupciones en 1991, cuando ambos puentes fueron destruidos por los lahares, posterior a lo cual fueron reconstruidos. Sin embargo, ambos se ciernen sobre los cimientos antiguos. En el caso del río Pénjamo, hasta el año 2016 existía un puente artesanal construido con troncos, que fue reemplazado por un puente de tipo *Bailey* de un carril, que permanece ahí hasta el presente. En este sentido, ante un escenario de afectación con las características similares a la de 1991, el área podría quedar incomunicada, sin vías de evacuación disponible.

Como es común alrededor del mundo, la expansión de los asentamientos humanos se da en las cercanías de los ríos, motivada por el acceso al agua y el hecho de que en estas zonas el terreno generalmente es llano y fértil. El área de estudio no es la excepción y es preocupante que varias viviendas se ubican en los márgenes de ríos como el Azul, por cuyo cauce han descendido lahares de volumen considerable durante las últimas décadas.

Los poblados de Gavilán y Buenos Aires se comunican por tierra con Dos Ríos y la ruta nacional N.º 917 a través del puente sobre el río Azul, el cual también fue destruido en 1991. Actualmente, en su lugar también se encuentra un puente *bailey* mono carril cuya antigüedad se desconoce, pero su estado refleja que tiene varios años de uso. Este puente, al igual que el del río Pénjamo, se asienta sobre los cimientos del anterior, por lo que también corre el riesgo de ser destruido por lahares. La zona de Buenos Aires y la zona constituida por El Gavilán-Argelia-Manzanares tiene un nivel exposición medio-alto y un nivel de peligrosidad medio-alto, que, aunque si bien es cierto se han visto afectadas por lahares, tendrían una ruta de evacuación habilitada.

En el caso de la zona de Buenos Aires hacia la ruta hacia la comunidad de Aguas Claras y la zona de El Gavilán-Argelia-Manzanares hacia la comunidad de Dos Ríos donde, sin embargo, se han presentado lahares sobre el río Blanco, aunque poco frecuentes y no hay registro de afectación en la infraestructura vial. La comunidad de Buenos Aires, si bien se

localiza cerca del río Pénjamo, presenta una ubicación topográficamente elevada con respecto a este cauce, gracias a lo cual, es poco probable que se vaya a ver afectada por la inundación que ocasionaría un lahar. No obstante, se debe exceptuar de esta consideración, aquellas viviendas y edificaciones que se ubiquen en las márgenes del río o en zonas bajas cercanas al cauce, como sucedió durante 1991 cuando el puente fue destruido por un flujo.

En cuanto a centros educativos, los niños y jóvenes del área de estudio tienen a su disposición tres escuelas y un colegio: las escuelas Buenos Aires, IDA Gavilán, Dos Ríos y el Liceo de Dos Ríos. Al analizar la ubicación de estos centros educativos con respecto a las zonas que eventualmente se podrían ver afectadas por lahares de al menos $1 \times 10^6 \text{ m}^3$, que descendieran por los cauces de los ríos Blanco y Cucaracho, se determinó que ambos centros educativos se encuentran dentro de la zona de mayor afectación por lahares. No obstante, considerando la actividad eruptiva histórica del volcán Rincón de la Vieja y el hecho de que los nacimientos de ambos cauces se localizan a más de 3 km de distancia del foco eruptivo, la probabilidad de que ocurran lahares de gran volumen que afecten a la comunidad de Dos Ríos, es baja, mas no nula. De hecho, la comunidad de Dos Ríos tiene un nivel bajo, tanto en exposición como en peligrosidad, tomando en consideración que las rutas de evacuación no se verían afectadas ante escenarios por lahares. Los escenarios ante los cuales pueden formarse lahares que afecten directamente la comunidad de Dos Ríos, son: 1. un periodo eruptivo con caída de ceniza constante hacia el oeste del cráter activo acompañado de precipitaciones sostenidas y; 2. el colapso de la pared norte del cráter activo.

En el asentamiento Gavilán, tal y como se puede observar en los mapas de peligro volcánico, gran parte de las edificaciones, incluyendo la escuela primaria y el salón comunal, se encuentran dentro de la zona que podría verse afectada por lahares. Debe considerarse que, en esta zona la topografía presenta cambios de pendiente considerables, y que existen varios drenajes de pequeño tamaño que forman parte de la cuenca del río Azul, los cuales, eventualmente podrían servir para canalizar lahares. La escuela IDA Gavilán se localiza a pocos metros de uno de estos drenajes y dentro de la zona que eventualmente se vería afectada por lahares que alcancen $1\ 000\ 000 \text{ m}^3$.

Dentro de todo este marco se debe de tener presente la prohibición de no construir dentro del cauce de dominio público (álveo), respetando las áreas protección establecidas para manantiales, quebradas y ríos de acuerdo con la legislación establecida (ley forestal y ley de aguas) o la zonificación del ASP (Área Silvestre Protegida). Las zonas aledañas a los cauces que nacen en la cima del volcán deben ser de restricción absoluta, amparado en la definición de área de protección según el artículo 33 de la ley Forestal N.º 7575, la cual establece como dominio del estado 15 m desde ambas márgenes en zona rural o 50 m si el terreno es quebrado con una inclinación mayor a 45° . Además, estos cauces poseen el potencial de descenso de flujos torrenciales de escombros rocosos, arcillas y troncos (lahares), cuando se dan lluvias extraordinarias en la cima que erosionan los depósitos de ceniza. Se debe de tener presente, que, en algunos sectores, debido a las pendientes en suelos volcánicos, se pueden presentar deslizamientos.

9.3.2 Riesgo asociado a la afectación de lahares a nivel comunitario

El nivel de riesgo comunitario obtenido a partir del peligro asociado a la afectación por lahares se logra identificar la predominancia del nivel medio. Para el análisis espacial se debe correlacionar, con los niveles de vulnerabilidad comunitario asociado a variables socioeconómicas, organización local y percepción del riesgo, donde destaca la zona compuesta entre El Gavilán-Buenos Aires con un nivel de riesgo alto (Fig. 9.17). Esto se debe a que, de acuerdo con los datos obtenidos en las viviendas encuestadas en dicha localidad, predominan niveles altos y medios, en relación con las variables socioeconómicas y de organización local. Además, de tener un nivel de peligrosidad y exposición alto, debido a la presencia de lahares frecuentes por los ríos que la atraviesan y su aislamiento por destrucción sobre los puentes del río Azul y Pénjamo.

Según el mapa de coberturas y usos del suelo, en dicha zona de mayor riesgo se aglomera gran parte de los complejos turísticos presentes en las comunidades de estudio como Blue River, Kiwanda Maggic y locales como Rustico Rincón Viejo, Hospedaje la Casona, Cafetería Santa Fe, hospedaje Los Nacientes y OSKI Rooms, Hungry shark. Además, se localizan fincas de cultivo de naranja y dedicadas a la ganadería de leche, de esta manera la zona presenta características no solo sociales, si no también, económicas que son altamente vulnerables ante un escenario de afectación por lahares, tanto en efectos directos como indirectos.

La zona compuesta por el asentamiento Agroindustrial Sur, si bien es cierto, es la que posee un nivel exposición muy alto y de peligrosidad alto, sin embargo, al ser poco poblado las características de los hogares hacen que, el nivel de vulnerabilidad sea bajo y con esto el nivel de riesgo es medio. Sin embargo, se debe de tener en consideración que en esta zona se localizan los centros turísticos Sensoria, atracción turística Dino Park y Bromelias, los cuales son fuentes de empleo para la población local. La zona de Dos Ríos es la única zona que presenta un nivel de riesgo bajo, debido a la nula afectación de lahares de acuerdo con el registro histórico en los últimos 30 años, por lo cual, se establece como una de las zonas donde se puede utilizar su salón comunal como albergue para la población localizada en la zona de Manzanares-Argelia-El Gavilán ante un escenario de afectación por lahares (Fig. 9.17).

De acuerdo con el nivel de riesgo establecido y al tomar como referencia los últimos 30 años de afectación por actividad volcánica (lapso muy corto, pero es el disponible), hacia el flanco nórdico del volcán Rincón de la Vieja, se logra establecer que el peligro de mayor frecuencia de afectación sobre las comunidades en estudio es el transitar de lahares. De acuerdo con el mapa de nivel de riesgo comunitario ante escenarios de afectación por lahares (Fig. 9.17) y el mapa de cobertura y uso de suelo (Fig. 9.3), se emiten una serie de recomendaciones sobre la planificación territorial y la gestión del riesgo hacia las comunidades en estudio. De acuerdo con los mapas mencionados se establecen tres áreas en las comunidades en estudio, con base en el nivel de riesgo basado en las coberturas y usos del suelo presentes (actividades agro-productivas y turísticas). Todo ello facilita las recomendaciones sobre la planificación territorial y la gestión del riesgo, para establecer las áreas o zonas de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente (Fig. 9.18).

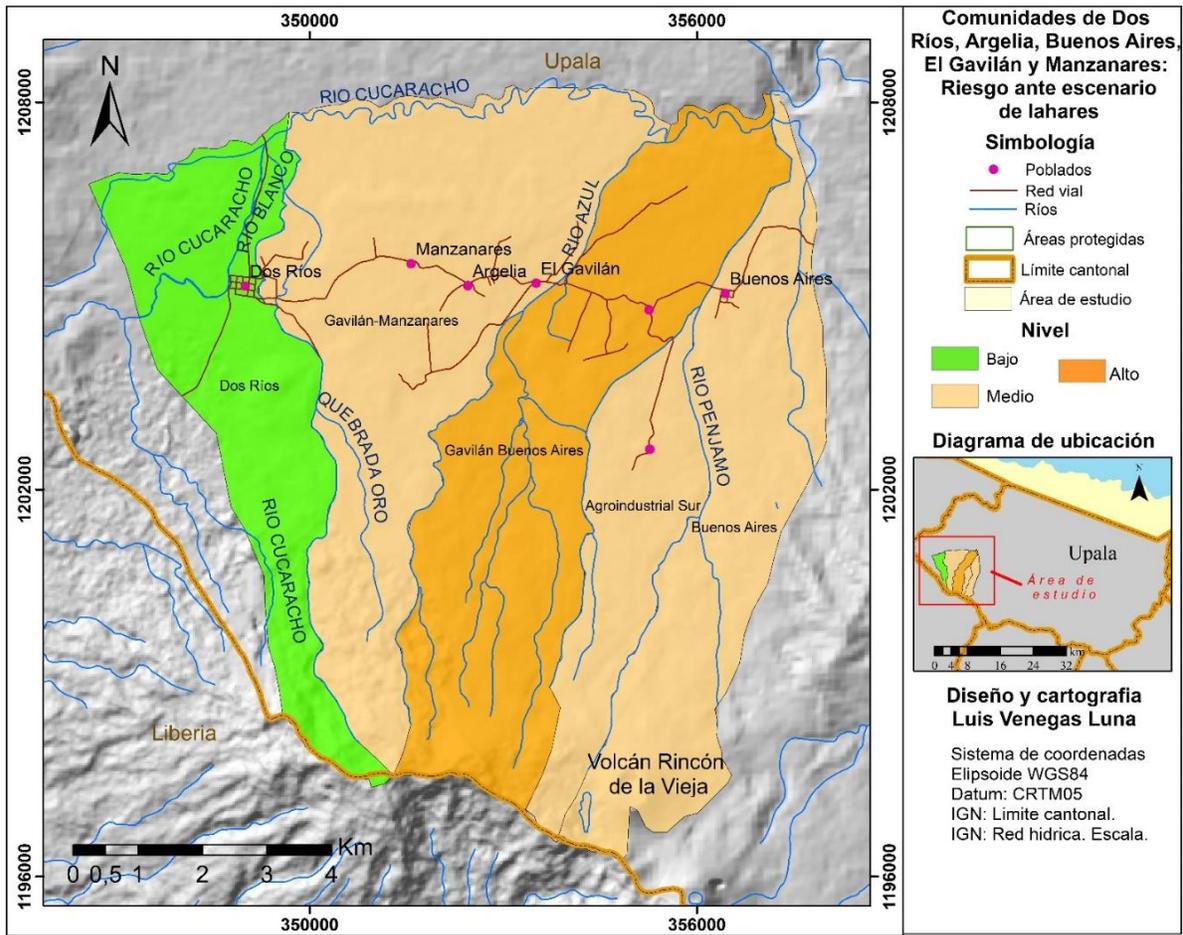


Fig. 9.17: Nivel de peligro comunitario asociado ante escenario de afectación por lahares.

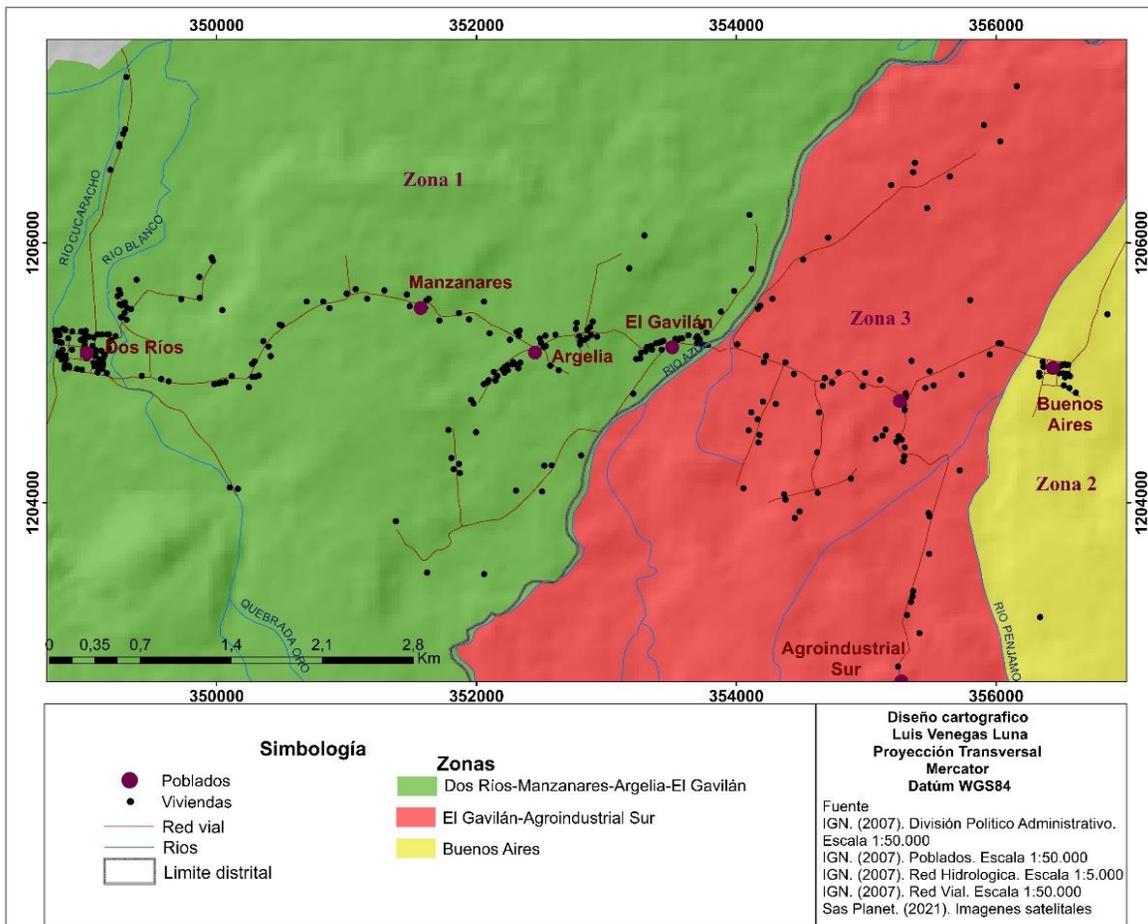


Fig. 9.18: Detalle de zonas establecidas de acuerdo con el nivel de riesgo ante lahares en función de la cobertura y usos del suelo.

9.3.3 Zonificación del riesgo del sector actualmente poblado en el flanco norte

Zona 1 (Comunidades de Dos Ríos, Manzanares, Argelia y El Gavilán): Esta zona se encuentra con un nivel de riesgo bajo-medio (Fig. 9.18), donde eventualmente se podría presentar una inundación por lahar en la comunidad de Dos Ríos, por lo que las comunidades de Manzanares, Argelia y El Gavilán podrían quedar incomunicadas por la afectación en el puente sobre el río Blanco. Sin embargo, estos se dan al menos uno cada siglo. Los usos del suelo que predomina son los pastos arbolados, donde se desarrolla la ganadería a través de sistemas silvopastoriles. Se recomienda no desarrollar este tipo de actividad intensiva con grandes cantidades de reses debido a que se podría presentar afectación por caída de ceniza. Ante un escenario de afectación eruptiva con presencia de lahares sobre el río Blanco, se deben tomar medidas de evacuación hacia la comunidad de Dos Ríos. En cuanto a la expansión urbana, no se recomienda el establecimiento de nuevas áreas para el otorgamiento de parcelas o lotes fuera de los límites de las comunidades.

Zona 2 (Comunidad de Buenos Aires): Esta zona se encuentra con un nivel de riesgo medio (Fig. 9.18), en la cual se podría presentar caída de ceniza; además, posee una alta exposición

pues, de acuerdo con el registro de actividad eruptiva de los últimos 30 años, el puente sobre el río Pénjamo ha sido destruido, donde, la presencia de lahares sobre dicho río se da de manera frecuente con eventos cada década. Dado que se identificó únicamente la presencia de pastos arbolados, es decir, en esta zona únicamente se desarrolla la actividad ganadera. La producción de leche y sus derivados se traslada por la vía que comunica con Dos Ríos, por lo cual ante una afectación en los puentes generaría que los productos no logran colocar sus productos en el mercado. Además, otro posible impacto sería la caída abundante de ceniza, aunque este escenario tiene una probabilidad baja en el corto plazo. En cuanto a la evacuación de la población, se debe considerar que la ruta de lastre que comunica con la comunidad de Aguas Claras se encuentra en mediano estado, por lo cual, se requiere de automóviles altos o de tipo 4x4 para poder desplazarse con cierta urgencia. Se recomienda que el gobierno local de mantenimiento frecuente sobre dicha ruta. En relación con la expansión urbana, se recomienda limitarla a los cuadrantes de la comunidad, así como también, no construir infraestructura estratégica.

Zona 3 (Comunidades de El Gavilán y Buenos Aires): Esta zona se encuentra con un nivel de riesgo medio-alto (Fig. 9.18), en la cual se podría presentar caída de ceniza, además de poseer una alta exposición pues, de acuerdo con el registro de actividad eruptiva de los últimos 30 años el puente sobre el río Azul y Pénjamo ha sido destruidos. La presencia de lahares sobre dicho río se da de manera frecuente con eventos cada década. Se logró identificar que esta zona aglomera actividades del sector de servicios, que se subdividen en centros turísticos y locales dedicados ofrecer servicios de alojamiento y alimentación. También se tiene la presencia de cultivos anuales y permanentes, pastos limpios y arbolados, utilizados en la actividad ganadera, cuya producción es colocada en el mercado externo de las comunidades en estudio. Sin embargo, el principal impacto se daría en el sector turístico, pues, es fuente de empleo para gran parte de la población local. Para la evacuación, se debe considerar algún centro turístico como el hotel Blue River para adaptarlo como un albergue, ya que no se encuentra alguna otra infraestructura con dimensiones apropiadas. Además, no se debe acercar la población ni los turistas al cauce de los ríos cuando se presenta actividad eruptiva, por ejemplo, cuando se encuentra la cima nublada. La zona presenta un gran potencial natural que puede ser aprovechado para la actividad turística, sin embargo, debe de planearse con estrategias de seguridad tanto para turistas como para los guías (a los cuales se les brinde capacitaciones sobre primeros auxilios y sobre el peligro volcánico que presenta la zona). Además, si se encuentra en ciertas cascadas sobre el río Pénjamo y Azul, se recomienda tener un vigía con un radio de comunicación, el cual tenga vista sobre la cima del cráter activo.

Dentro de todo lo dicho, se debe de considerar, entonces, el **riesgo extenso o extensivo**, que corresponde con eventos o desastres de baja gravedad o intensidad y alta recurrencia o frecuencia (persistentes), principalmente, aunque no exclusivamente, asociados con peligros muy localizados, los cuales tienen gran impacto en las personas (USAID, 2019). En el caso del Rincón de la Vieja podría corresponder con erupciones menores que puedan afectar los puentes en el flanco caribeño y el negocio del turismo. Los factores de riesgo subyacentes, como la actividad monoespecífica del turismo, también pueden afectar severamente la economía.

Sin embargo, dentro del sistema actual, por lo general el costo de las pérdidas por eventos pequeños y recurrentes generalmente no se contabilizan. Estas suelen ser absorbidas por las personas afectadas, atribuyéndolas a la pobreza en el proceso. Mientras que Costa Rica no se preocupe o no cuente con las herramientas desarrolladas para calcular su costo, es poco probable que pueda justificar planificación, prevención e inversiones significativas en la gestión del riesgo en el presupuesto nacional. La determinación de las pérdidas de eventos frecuentes por sí solo no es suficiente para reducir el riesgo; también se debe identificar y abordar los factores que hacen que las personas sean vulnerables y estén expuestas a ciertos peligros en primera instancia.

El **riesgo intensivo** o **riesgo de desastre intensivo** se utiliza para describir el riesgo asociado a eventos o desastres de alta gravedad o intensidad, de frecuencia media a baja, principalmente asociados con peligros mayores; suele ser característico de las zonas densamente pobladas (urbanas), que no solo están expuestas a amenazas importantes, sino que también presentan altos niveles de vulnerabilidad, muchas veces relacionada con la pobreza (UNDRR, 2009, 2015, 2017; USAID, 2019).

Para la identificación de registros del denominado riesgo intensivo y riesgo extensivo, se utilizó el umbral de pérdidas para América Latina definido de la Oficina de las Naciones Unidas para la reducción del riesgo de desastres (UNISDR, 2015): las *manifestaciones intensivas del riesgo* corresponden a aquellos registros con 25 o más pérdidas de vidas o 300 o más viviendas destruidas, o ambas. Las *manifestaciones extensivas del riesgo* corresponden a aquellos registros con valores menores a los umbrales citados.

Este tipo de riesgo solo se visualiza si se repitiera una erupción como aconteció en el año 300 de nuestra era, con una columna de cenizas y pómez muy elevada, con la caída de cenizas principalmente hacia el flanco WSW y la generación de flujos piroclásticos y lahares hacia el flanco norte o Caribe (Cuadro 9.8), o bien, que un grupo grande de turistas sean tomados desprevenidos en un radio de 2-3 km del cráter, y lleguen a ser alcanzados por flujos piroclásticos y lahares.

Dentro del contexto de la UNDRR existen diferentes factores subyacentes que caracterizan el riesgo, dos de ellos presentes en los flancos del Rincón de la Vieja, a saber:
a) Desarrollo urbano mal planificado y gestionado y b) Medios de vida rurales vulnerables.

Pero precisamente porque el riesgo se construye a través de impulsores relacionados con el desarrollo, en teoría podría ser manejable y evitable con inversiones adecuadas en su reducción, así pues, la evidencia sugiere que las ciudades con mejores recursos y mejor gobernadas, pueden mitigar mejor su riesgo (UNDRR, 2009, 2015, 2017).

Cuadro 9.8: Efectos potenciales de un nuevo evento eruptivo importante o actividad persistente, que van a generar amenazas múltiples (complejas) y secuenciales, que deben evaluarse y analizarse en el marco de un riesgo intensivo y extensivo.

Amenaza	Efectos directos potenciales	Efectos indirectos potenciales	Instituciones involucradas
Caída de ceniza	Efectos en la salud de las personas, cultivos dañados, cierre técnico de fincas ganaderas y de cultivos (particularmente naranjales), cierre del PN Rincón de la Vieja, afectación en el suministro de electricidad y de agua. Destrucción del bosque. Depreciación del terreno. Cierres del tránsito aéreo en el aeropuerto de Liberia. Destinar fondos previstos para otras actividades para atender la emergencia.	Afectación del turismo por cierre del tránsito aéreo y cancelación de reservaciones. Aumento de la visitación hospitalaria. Quiebra de empresas e incremento del desempleo. Pérdida en la calidad de vida. Ausentismo al trabajo y la educación.	SINAC, ICE, MEP, ITC, municipalidades, educación primaria y secundaria, empresas públicas y privadas.
Caída balística	Turismo ilegal.	Exposición a los rescatistas.	SINAC, OVSICORI, RSN, ICE, RSN
Lahares	Destrucción de puentes, carreteras con posibles muertes. Destinar fondos previstos para otras actividades a atender la emergencia.	Aumento de la brecha socioeconómica y del desempleo.	MOPT, CONAVI, LANNAME, CNE, ICE, Municipalidades.
Flujos y oleadas piroclásticas	Destrucción y muerte. Destrucción de bosques y depreciación del terreno.	Exposición a los rescatistas.	SINAC, ICE, SENASA, MEP, ITC, municipalidades, empresas públicas y privadas.
Gases y lluvia ácida	Efectos en la salud de las personas, cultivos dañados. Destrucción de bosques. Corrosión de infraestructura.	Aumento de la brecha socioeconómica y del desempleo.	SINAC, ICE, SENASA, MEP, ITC, empresas públicas y privadas.
Deslizamientos	Represamientos temporales de ríos, afectación del bosque y cultivos.		SINAC, ICE, municipalidades, empresas públicas y privadas.

Otro aspecto para considerar es que el valor de las actividades socioeconómicas e industriales, en áreas propensas a amenazas por caída de ceniza y lahares en los diversos ríos que nacen en los flancos del Rincón de la Vieja han crecido (ante el aumento de viviendas, caminos, obras de canalización, cultivos y otros), lo que genera un aumento en el riesgo intensivo.

Esto significa que, si bien los seguros u otras opciones de instrumentos de transferencia de riesgos deben ser parte de la estrategia de gestión financiera de riesgos de un gobierno, solo son parte de la solución. Pero las poblaciones en condición de pobreza extrema están excluidas del mercado de los seguros y solo puede recibir protección si el Estado tiene políticas y recursos asignados para el efecto (USAID, 2019).

9.3.4 Evaluación del estado de conocimiento volcánico: base para una mejor evaluación de la peligrosidad y la vigilancia volcánica

El riesgo que representa un volcán está directamente relacionado con la población y la infraestructura, ya que ambos pueden verse afectados. Pero a su vez, la peligrosidad depende de la frecuencia, alcance y tipo de eventos. Por lo anterior, cada volcán requiere de una evaluación del estado de conocimiento de las investigaciones y de su monitoreo, con el fin de planear estrategias para mejoras en ambos.

Un primer estudio cuantitativo relativo de este tipo fue realizado durante la década del 2000 para comparar el estado de conocimiento vulcanológico (mapas y estudios geológicos, geomorfológicos, perforaciones, dataciones radiométricas, tefroestratigrafía, petrografía, geoquímica y mapas de peligros volcánicos) de los volcanes de América Central. Allí, el volcán Rincón de la Vieja se ubicó con un nivel de conocimiento bastante bueno con un puntaje compartido con tan solo otros dos volcanes, de una lista de 70 centros eruptivos analizados. Sin embargo, se aclara que pese a tener un nivel de conocimiento aceptable, posee un índice de peligrosidad volcánica elevada de grado 11, de un máximo de 17 puntos (basado en Yokoyama et al., 1984), al tanto que la población bajo peligro (moderado hasta bajo) cerca del volcán se estimó en ese entonces era de 2000 personas y los sistemas de vigilancia eran apenas los básicos (Alvarado et al., 2007).

Luego, a mediados del 2019, varios vulcanólogos y geólogos del OVSICORI, RSN y CNE, se reunieron para aplicar la metodología de “Gap análisis” (*sensu* Ewert, 2007), cuyo objetivo era el evaluar de manera sistemática el potencial del riesgo de los volcanes de Costa Rica con el fin de priorizar e identificar las necesidades de monitoreo, investigación y mitigación. El análisis consistió en atribuir un puntaje a cada volcán al considerar su potencial de peligro (tipo eruptivo, intensidad de las erupciones pasadas, recurrencia, productos emitidos y presencia de actividad a la fecha), así como la vulnerabilidad alrededor (número de habitantes en un radio determinado o sobre depósitos recientes, presencia de infraestructuras importantes para el país, actividades turísticas, tráfico aéreo, etc.). La definición de los parámetros, así como el puntaje atribuido corresponde a lo definido por la metodología establecida por Ewert (2007).

Los resultados fueron presentados en forma tabulada y resumida en un informe interno (Alvarado et al., 2020). Así, dentro de dicho estudio se cuantificó el riesgo relativo

que representa el volcán, lo que permite establecer un orden entre todos los volcanes evaluados. Se comparó esta situación con la red de monitoreo vigente a finales del 2019 y el orden definido permitió establecer prioridades de estudios y de inversiones para cada uno. En esta metodología, la amenaza volcánica es la suma del puntaje de todos los peligros volcánicos (actividad histórica y registros geológicos) más el estado de actividad (sismicidad, deformación, desgasificación). La vulnerabilidad es la suma del puntaje de todas las vulnerabilidades estimadas basado en la citada metodología, mientras que el riesgo es el producto de la amenaza por la vulnerabilidad. La amenaza aérea, por su parte, es un subresultado que se calcula así: $(VEI_{max} + VEI3 + VEI4 + \text{recurrencia}) \times (\text{aeropuertos})$. Finalmente, el nivel de actividad es un sub-resultado de la actividad sísmica + deformación + manifestación de desgasificación. En dicho trabajo se estiman unas 154 000 personas en un radio de 30 km del cráter del volcán y una afluencia de unos 1000 turistas diarios al PN Rincón de la Vieja. Del análisis se desprende que el Rincón de la Vieja se ubica dentro de los volcanes de alto riesgo a nivel nacional (Alvarado et al., 2020), no tanto por erupciones muy grandes, sino por su frecuencia (erupciones y lahares asociados), así como sus efectos en la economía agropecuaria y turística (Fig. 9.19).

Nieto-Torres et al. (2021) y Guimarães et al. (2021) establecieron una nueva metodología de posicionamiento del peligro y riesgo volcánico, aplicado a Latinoamérica, basado una serie de parámetros para estimar e integrar el peligro volcánico, la exposición y la vulnerabilidad como factores que incrementan el riesgo y la resiliencia que lo reduce. Allí analizan 123 volcanes en Latinoamérica (Cuadro 9.9). Dentro de ellas, los volcanes Irazú y Rincón de la Vieja se posicionan dentro de los 10 más peligrosos, mientras que en términos de exposición el Irazú está dentro de los 15 más altos. Pero si se analiza en términos de vulnerabilidad (ausencia de información, carencia de infraestructura crítica, vulnerabilidad social, etc.), los volcanes costarricenses analizados se ubican dentro un rango muy similar y con una vulnerabilidad dentro de las más bajas a nivel Latinoamericano, superados tan solo por varios volcanes ubicados en lugares deshabitados. De modo similar, la mayoría de estos volcanes (con excepción del Miravalles) se encuentran dentro de los 12 más resilientes a nivel Latinoamericano, al contar con sistemas de vigilancia en tiempo real, estrategias de educación, ejercicios de simulación, planes de emergencia y contingencia. Si se analiza el riesgo como el producto de $P \times E \times V$, al tener nuestros volcanes una vulnerabilidad baja, entonces el riesgo da bastante bajo, tan solo el Irazú se ubica dentro de los 40 volcanes más peligrosos. Pero si se incluye la resiliencia, que baja el riesgo notoriamente, el Arenal, Irazú y Poás están dentro de los 6 volcanes a nivel Latinoamericano con el posicionamiento mayor en las estrategias de reducción del riesgo y todos los volcanes costarricenses analizados dieron un riesgo bastante bajo (Cuadro 9.9).

Tal y como se dijo varias páginas atrás, Guimarães et al. (2021) enfatizan que, dentro de las medidas para reducir la vulnerabilidad e incrementar la resiliencia, se deben promover accesibilidad a infraestructura vital y redundancia, llevar a cabo estudios de peligrosidad y riesgo, implementar sistemas de alerta temprana (SAT), desarrollar planes de emergencia y promover actividades educativas. Todo lo anterior, en especial la actualización de los estudios de amenaza volcánica, educación (conferencias, capacitación a guías turísticos y guardaparques, rotulación informativa y preventiva) se han estado realizando de modo frecuente e intenso en el PN Rincón de la Vieja y particularmente en las comunidades de Gavilán y alrededores, por parte de la CNE, UNA e ICE desde hace un lustro. Estas

actividades, muchas de ellas no contempladas en el trabajo de Guimarães et al. (2021), sin duda darían valores aún más favorables en la evaluación de la vulnerabilidad y la resiliencia y, por ende, en la ponderación del riesgo.

Sin embargo, falta contar con un SAT para lahares y promover mejor los planes de emergencia y simulacros.

Cuadro 9.9: Ponderación de la peligrosidad, grado de exposición, vulnerabilidad, resiliencia y riesgo volcánico según el análisis realizado por Guimarães et al. (2021) para 123 volcanes Latinoamericanos.

Volcán	Peligrosidad (P)	Exposición (E)	Vulnerabilidad (V)	Resiliencia (R)	P x E x V	Riesgo: P x E x V/R
Rincón de la Vieja	10	76	110	11	81	108
Miravalles	113	57	101	83	103	93
Arenal	32	23	103	1	51	104
Poás	82	39	109	5	94	113
Irazú	4	15	107	6	33	88
Turrialba	23	61	102	10	64	99

Por su parte, para Tierz (2020), considera se debe de analizar la información de la que se dispone para determinar la viabilidad y limitantes en los estudios de peligro volcánico. Se establecen algunas definiciones en las bases de datos para analizar la viabilidad de los resultados del peligro volcánico, dentro de ellas:

Escasez de datos: Se refiere a la falta general de datos para cualquier volcán o grupo de volcanes, independientemente de la razón detrás de esta escasez.

En el Rincón de la Vieja se tiene una buena base de información geológica, vulcanológica y de los peligros volcánicos, incluyendo un número adecuado de dataciones de radiocarbono para una mejor evaluación de la edad de los eventos eruptivos y de megadeslizamientos, así como los períodos de recurrencia. Sin embargo, pocos estudios de han realizado en la tefrostratigrafía de la cima del volcán o sobre la geocronología de la formación de los conos eruptivos cuspidales. También, otro aspecto del que se carece es una evaluación geotécnica con información de campo y geofísica de la estabilidad del flanco sur del volcán, aunque dichos estudios son muy costosos.

Trazabilidad de datos: Consiste en la calidad de cualquier tipo de datos para un volcán o grupo determinado de volcanes de ser descubiertos a través de la identificación, descripción, medición, muestreo, etc.

La mayoría de la información presentada en el presente informe posee su localización y la fuente, así que desde ese punto de vista se puede considerar que se tiene una buena trazabilidad de los datos primarios.

Accesibilidad y disponibilidad de datos: Se refiere a la calidad de cualquier tipo de datos para un volcán o grupo determinado de volcanes de poder ser accedido (y reutilizado) como datos abiertos.

En ese caso, el presente informe presenta nuevos datos radiométricos y una sinopsis del vulcanismo y del peligro volcánico, acompañado de un nutrido complemento de referencias bibliográficas. Además, la mayoría de la información acá analizada está accesible y disponible en la CNE, OVSICORI, RSN, municipalidades, además de otras entidades universitarias y bibliotecas. En el caso de no estar fácilmente accesible, justo la idea del presente informe es dejar constancia de dicha información para un público amplio. Además, se reintrepretaron datos previos y se contextualizaron a la luz de los paradigmas actuales.

Si se desea obtener más información, se recomienda consultar los siguientes sitios:

<http://www.cne.go.cr>

https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/tipo_amenazas/vulcanismo.aspx

<http://www.ovsicori.una.ac.cr/>

<https://www.facebook.com/OVSICORI>

https://twitter.com/OVSICORI_UNA/

<http://www.observatorioambiental.una.ac.cr/>

<http://www.rsn.ucr.ac.cr/>

<http://www.facebook.com/RSN.CR>

<https://twitter.com/RSNcostarica>

<https://www.facebook.com/LAQATOficial>

<https://www.quimica.una.ac.cr/index.php/inicio-laqat>

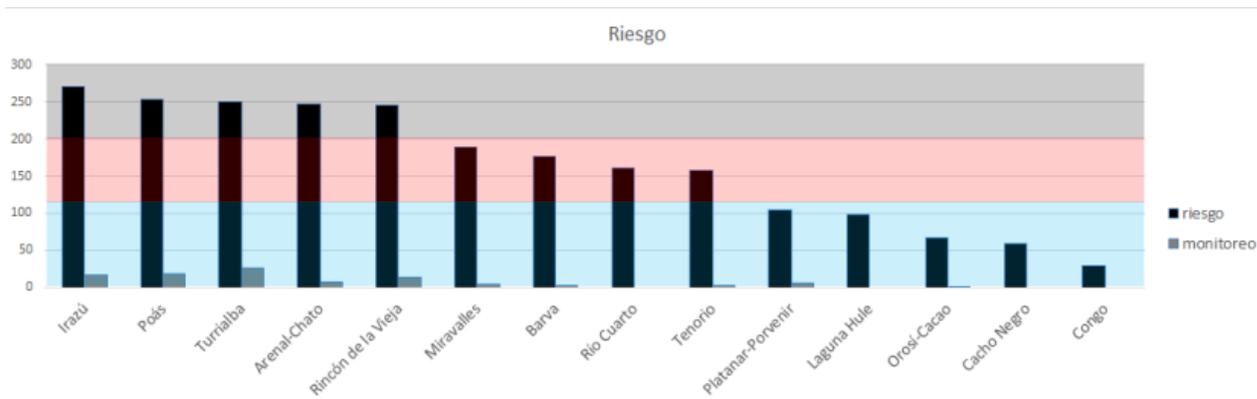
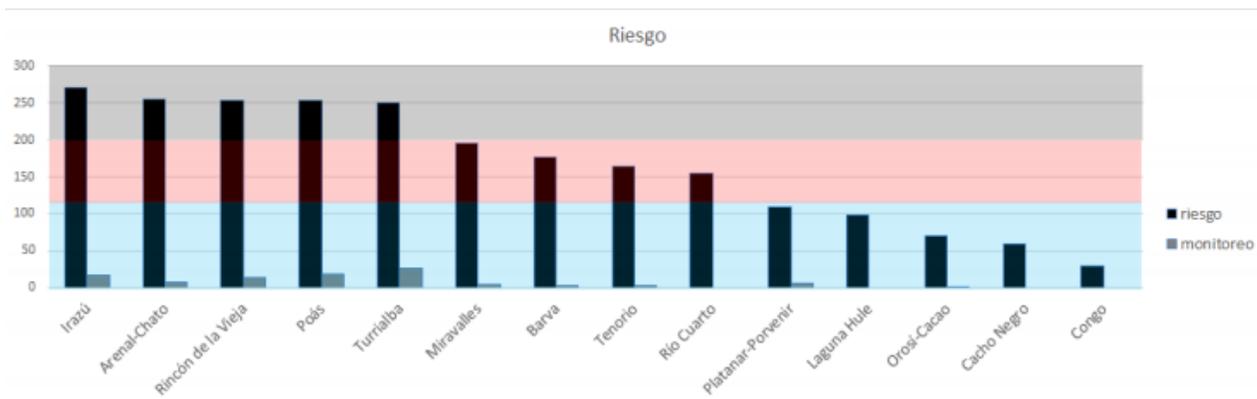
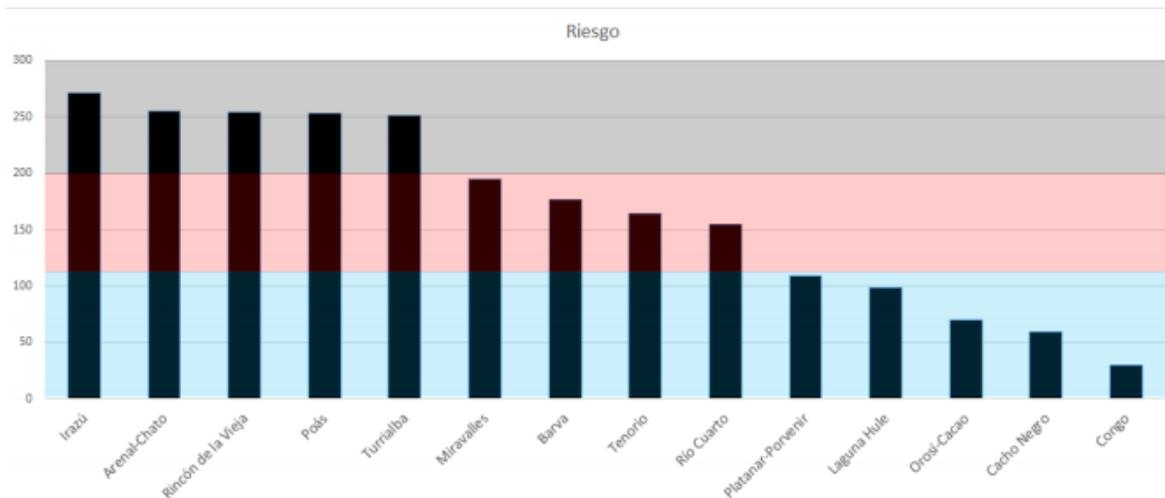


Fig. 9.19: Resultado de la evaluación de la ponderación del riesgo denominado Gap análisis (Alvarado et al., 2020): a) Arriba el nivel de riesgo de los volcanes de Costa Rica, b) intermedio, nivel de riesgo de los volcanes de Costa Rica con el número total de equipos de monitoreo (OVSICORI + RSN) y, c) Nivel de actividad de los volcanes de Costa Rica, donde se da menos puntaje a los volcanes lejos del GAM.

Sin embargo, uno de los problemas que se resaltan a nivel nacional es que existen bases de datos e informes importantes y valiosos, e incluso muy costosos, para crear o fundamentar estudios que ayuden a disminuir la vulnerabilidad ante los desastres, pero estos se encuentran diseminados, aislados, duplicados, no validados y hasta utilizados de forma exclusiva por instituciones u organizaciones. Muchas veces se invierte un alto costo en generar información, aunque solo una parte se utiliza. La creación de un centro nacional de información es una necesidad real, no solo para encaminar los esfuerzos de integración y para lograr un mejor aprovechamiento de la información geoespacial y las importantes inversiones en recursos, sino que es necesario para el fomento de la investigación, innovación y desarrollo, además de darle continuidad a los proyectos. Ello motivaría a generar información geológica e hidrometeorológica (entre otras amenazas) oportuna y con escalas apropiadas. No se trata solo de un SIG o de un conjunto de datos o capas de estos, se debe de pensar en una infraestructura de información, con base en protocolos de uso y adquisición de equipos dentro de un plan nacional y de esfuerzo sostenido, que integre tecnologías de manera coherente y en función de necesidades concretas del país y las instituciones. De preferencia debería de estar en la academia o que se nutra de la investigación de académicos bajo un enfoque transdisciplinario (Adamson y Castillo, 2012; Gómez, 2012; Pujol, 2012).

Dado que, la vulnerabilidad de la infraestructura de las líneas vitales existe y es distinta y específica en cada caso (red vial, energía, telecomunicaciones, acueductos, oleoductos, etc.), donde además hay interdependencia e interacción, lo recomendable es que cada institución realice una evaluación propia en los aspectos físico, funcional e institucional. Como aspectos relevantes de la evaluación de la vulnerabilidad física y del personal, se deben identificar las obras o componentes vulnerables y los niveles de riesgo que presentan en caso de ocurrencia de eventos, para establecer las prioridades de atención. Se puede enmarcar dentro de un *plan de continuidad del negocio* y dentro de un *análisis de riesgos institucionales* contemplado dentro del Sistema Específico de Valoración del Riesgo Institucional (SEVRI), dado que, actualmente lo requiere la ley. Ello es fundamental para evaluar la vulnerabilidad funcional del sistema y así identificar debilidades tales como la dependencia y la falta de redundancia. La vulnerabilidad institucional suele estar asociada con la falta o ausencia de políticas, estrategias y planes de acción en caso de eventos adversos. El éxito de la atención de emergencias en una infraestructura, sistema o institución se basa en la existencia de planes de acción y contingencia, que se apliquen eficaz y eficientemente cuando se presenten los eventos. Para ello, se deben de realizar capacitaciones del recurso humano y simulacros con cierta frecuencia, donde se deben tomar en cuenta los requisitos de seguridad y salud ocupacional (Vargas, 2012).

Otro de los problemas es que los daños en infraestructura y servicios son superficialmente calculados, aunque raras veces son apropiadamente cuantificados, esto se asocia con los pocos recursos -e incluso interés-, dedicados al levantamiento de información durante eventos adversos menores o pos-emergencias. No existe un protocolo para instrumentalizar el seguimiento y la sistematización de la información estadística relacionada con eventos menores, emergencias y desastres, lo que llega a afectar, en cierto modo, la capacidad de prevención ante desastres y la relación de costo/beneficio al no contar con la información (Gómez, 2012). Los eventos volcánicos, aunque representan un porcentaje muy bajo de las pérdidas y los desastres a nivel nacional (quizás menos del 1 % de la afectación social y económica), no dejan de contar con información muy incompleta e irregular, al punto

que ni siquiera el número de muertes es oficial (Aguilar y Alvarado, 2014; Abarca y Alvarado, 2017).

9.3.5 Protección de la Infraestructura y los Servicios: Sostenibilidad-Seguros

Costa Rica ha tenido avances en la delimitación de criterios con los cuales disponer medidas para la protección de la infraestructura. Esto se reconoce en esfuerzos anteriores a la formulación de la Política, con normas como los códigos constructivos que ha permitido la reducción de las pérdidas y, con ello, el riesgo de desastres. No obstante, en el contexto reciente, las acciones del Estado, incluido el aporte de organismos como los colegios profesionales, tales como el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos y el Colegio de Geólogos, tienen a la base un claro enfoque de gestión de riesgo y la intencionalidad de reducir la vulnerabilidad de la infraestructura pública. Los lineamientos de las metodologías para proyectos de inversión pública creados por MIDEPLAN y los “Lineamientos generales para la incorporación de las medidas de resiliencia en infraestructura pública” emitidos bajo el Decreto N.º 42465- MOPT-MINAE-MIVAH, son muestra de nuevos esfuerzos que se realizan al respecto. Las instituciones a cargo de servicios públicos de interés crítico ya incluyen dentro del ciclo de vida de los proyectos de infraestructura la evaluación del riesgo (CNE, 2021).

Dentro de este marco, resulta interesante el mencionar que en el caso del Instituto Nacional de Seguros (INS), el seguro de incendio Comercial e Industrial tiene la siguiente cobertura:

Cobertura D: Convulsiones de la Naturaleza.

Quedan comprendidas dentro del alcance de esta cobertura, los daños derivados de:

- 1. Temblor y terremoto y el incendio derivado de los mismos.*
- 2. Erupción volcánica, maremoto, fuego subterráneo y el incendio derivado de los mismos.*

Pero se excluye (incorporado en las exclusiones) lo siguiente:

3) Pérdidas derivadas de la acumulación de arena o ceniza volcánica producto de la caída continua de estos elementos.

Otro seguro del INS para casas de habitación, apartamentos y condominios, se llama Hogar Comprensivo y cubre todo lo relativo a daños producidos por erupciones volcánicas en la siguiente cobertura D, muy similar a la anterior.

Como se desprende de lo anterior, solo la caída de cenizas no está cubierta por los seguros del INS, pero sí abarca todos los demás peligros volcánicos.

La protección de la infraestructura tiene vínculo con los conceptos de protección financiera, al reconocer que la evaluación del riesgo implica incluir las medidas de protección al flujo financiero de los proyectos, supone formas de diseño y construcción apropiados y la

aplicación de instrumentos financieros de protección tanto en la ejecución como en la operación. Esos avances en el tema de la protección de la infraestructura no soslayan la delimitación de retos presentes para la sostenibilidad (CNE, 2021):

a) Convertir la evaluación del riesgo en una rutina de cualquier proyecto, lo que implica el fortalecimiento de capacidades para la evaluación en las instituciones, con énfasis en aquellas que tienen a cargo obras de infraestructura relacionadas con servicios críticos.

b) En la perspectiva financiera, debe generarse una cultura de aseguramiento en el sector público; el sector financiero debe aportar criterios para la estimación de la infraestructura asegurable y una oferta de seguro a las instituciones públicas.

De cara al enfoque estratégico de la Política Nacional, no se debe perder la perspectiva de que, inherente a la protección de la infraestructura, se tiene la noción de que lo que en realidad se está protegiendo son aquellos servicios públicos a los que está destinada la infraestructura y que esto es relevante, tanto para todas las fases del ciclo de vida de los proyectos, así como para asegurar la continuidad de los mismos, lo cual contribuye a acelerar la recuperación económica y social de los territorios que son afectados por desastres. La perspectiva de lograr mejor comprensión y una mayor sensibilidad sobre riesgo por parte de ciudadanos y políticos requiere convertir el suministro de información en un proceso social de conocimiento del riesgo y ello supone una transformación de la producción social de información. Igualmente, es importante tener presente que en la ciencia de la Vulcanología son necesarios enfoques pluralistas, multidisciplinarios y metodologías orientadas a colectivos no tradicionales (CNE, 2021).

9.3.6 Comunicación de la información sobre la actividad volcánica

Resulta meritorio aclarar que los volcanes son entes que, aunque se les suele agrupar según comportamientos eruptivos, cada uno posee su propia particularidad, donde muchas veces, los procesos eruptivos son no lineales, sino aleatorios y dependen de muchas variables (procesos estocásticos), incluyendo la condición de frontera inicial (Marzocchi y Bebbington, 2012). Del mismo modo, la Vulcanología, como una ciencia muy nueva, todavía posee mucha incertidumbre en la interpretación de la información (la llamada incertidumbre conceptual o epistémica, e incertidumbres aleatorias de los modelos) y que los expertos no están exentos de ideas preconcebidas y de la escuela académica en la que se formaron, así como de sus experiencias (Papale, 2017; Donovan, 2019).

Dentro de este marco, los vulcanólogos son requeridos para hacer predicciones e interpretaciones, por lo general a partir de información geológica, geoquímica, geofísica y geodésica incompleta y dispersa, lo que le imprime un grado de incertidumbre, proveniente tanto de la recolección de los datos (error en la base de datos por sí mismos), como de la interpretación, las cuales se suman debido a la no completitud inherente del paquete de datos geológicos y la interpretación humana. Se entiende por *incertidumbre epistémica*, aquel concepto que incluye el conocimiento, sistemas de información y la probabilidad, aunque que suelen no ser completos y los procesos del subsuelo no suelen ser del todo conocidos por el científico, mientras que la *incertidumbre aleatoria* posee una variabilidad estocástica, es decir, al azar y que puede ser objeto de un análisis estadístico, donde las variables y sus

magnitudes varían con el tiempo (Papale, 2017; Marzocchi y Bebbington, 2012; Fearnley et al., 2018a; Donovan, 2019).

También se le agregan otras incertidumbres más difíciles de medir o cuantificar como las *incertidumbres académicas*, como aquellas ligadas a las ambigüedades en el lenguaje, cómo van a reaccionar los colegas, si va a existir consenso o no, o aquellos precavidos o los que buscan publicidad o protagonismo, las *incertidumbres sociales*, es decir, cómo va a reaccionar los pobladores, los empresarios, los turistas, la prensa y las redes sociales, como las *incertidumbres políticas*, relacionada con la oposición o a favor, las implicaciones socioeconómicas, todas ellas van a depender de las experiencias previas, credibilidad en el sistema político y de atención de las emergencia, así como en los observatorios (Donovan, 2019).

Toda esta información, bajo rigurosidad científica, es la clave para la realización de las evaluaciones del peligro y su riesgo asociado, una mejor toma de las decisiones y así como tener presente la incertidumbre conceptual o epistémica. Puesto que existe una no linealidad entre el riesgo volcánico y su gestión, por lo anterior, solo cuando se discuten las necesidades de las poblaciones de la mano de la actividad volcánica potencial, se puede avanzar en forma conjunta (Fearnley et al., 2018b).

Durante una crisis volcánica, siempre van a existir expectativas de muchas partes interesadas (sector privado, medios de comunicación, público en general) que necesitan ser manejadas adecuadamente. Son comunes también las críticas, que son relativas a la confianza que se tiene en el gobierno (incluyendo si se está en período electoral o no), así como los entes encargados de la vigilancia y la atención de la emergencia. Las incertidumbres previamente esbozadas influyen en la interpretación de la información y la toma de decisiones, incluyendo los pronósticos. A ello se le debe agregar la capacidad de la comunicación (a veces con ambigüedades y tecnicismos en el lenguaje) y el cambio de visión del *riesgo aceptado o asumido y riesgo aceptable o percibido* entre los científicos, los pobladores, los empresarios, los religiosos y los políticos (Papale, 2017; Donovan, 2019; Fearnley et al., 2018a). Un riesgo aceptable es aquel que normalmente se permite, dentro de una lógica y al tomar medidas nivel de pérdidas, por parte del individuo, el público, la comunidad, la sociedad o el gobierno considera que se puede asumir, por lo general en retorno de ciertos beneficios a corto y mediano plazo, al considerar, además, las condiciones sociales, económicas, políticas, culturales, técnicas y de ambiente existentes. Un riesgo aceptado es el que se acepta, aun sabiendo que existe y puede ser alto (Newhall y Hoblitt, 2002; Mora y Keipi, 2006; Mora, 2009).

Toda actividad posee un cierto grado de riesgo, aunque en la mayoría de los casos se asume un cierto grado de umbral. Con ello, se da la oportunidad de fuentes de trabajo, desarrollo, educación, incremento en la economía, ya sea a una población o el país en general. Para llegar a eso, se tiene que plantear ¿qué tipo y grado de riesgo se acepta (riesgo aceptado)? y si ¿este riesgo asumido es aceptable?, donde muchas veces el riesgo puede ser aceptado (aunque técnicamente no sea aceptable) bajo ciertas condiciones de presión socioeconómica o de acervo cultural. Por ejemplo, los pobladores que viven en los flancos del Rincón de la Vieja llevan más de medio siglo de convivir con el volcán sin que hasta el momento se halla presentado una pérdida humana. Dichos pobladores e incluso los inversionistas han aceptado

el riesgo de vivir. La flexibilidad del umbral del riesgo aceptado suele variar de época en época, según los recursos de los que dispone y también con la recurrencia de los eventos adversos, o bien, varía en función de la memoria histórica, si la persona o gobierno tuvo o no la experiencia de vivir una emergencia o crisis volcánica. Si se tuvo la experiencia, la brecha de separación es menor que si no se tuvo.

Por lo anterior, dos aspectos relevantes son la transparencia en la comunicación y comunicar la incertidumbre. La adecuada comunicación de la incertidumbre ayuda a que no se considere el cerrar un parque o sector como una falsa alarma, sino como una medida de precaución para el público y el personal (Donovan et al., 2018; Donovan, 2019; Fearnley et al., 2018a, b).

Nuestro conocimiento limitado de los procesos detrás de una erupción volcánica y su aleatoriedad genera la necesidad de cuantificar las incertidumbres sobre las dinámicas del volcán y de mejorar la política de la toma de decisiones durante una crisis volcánica. Sin embargo, numerosos ejercicios con expertos revelaron que el intento de reducir la incertidumbre creó nuevas incertidumbres, a menudo imposibles de cuantificar, siendo generada por la naturaleza del pensamiento humano durante situaciones de estrés. El proceso general es sujeto a la personalidad del investigador o grupo de investigadores y a sus ideas basadas en la experiencia. Esta manera de pensar interfiere con la complejidad intrínseca de los procesos volcánicos y con el hecho que cada escenario tiene una probabilidad de ocurrencia (Donovan, 2019; Fearnley et al., 2018b).

Se debe de tener presente que la comunicación científica puede tener, según las circunstancias, alcances diferentes a la comunicación del riesgo. El geocientífico analiza, plantea el peligro y los pronósticos, mientras que la CNE y Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) toman las decisiones técnicas finales, eso sí, junto con los profesionales del Comité Asesor Técnico (CAT) de Vulcanología e incluso invitados, cuando así lo amerite.

Además, las alertas representan el estado del volcán (tranquilo, sobre la línea base o al escalar su actividad hasta llegar a una posible erupción eminente), pero difícilmente un pronóstico a corto plazo no adolece de las incertidumbres, donde las decisiones que se tomen (o no se tomen) tienen sus implicaciones para la salud, seguridad, costos y efectos socioeconómicos (Papale, 2017). Es claro que los científicos juegan un rol fundamental en las recomendaciones y su socialización por parte de los medios, debido a que la ciencia será interpretada y evaluada por los pobladores que no son científicos (Donovan, 2019).

Todo lo anterior se trata de subsanar mediante varios mecanismos, uno de ellos es el Comité Asesor Técnico (CAT) de Vulcanología y Sismología, conformado por funcionarios de la CNE, OVSICORI y RSN, al cual se le suelen unir expertos de otras instituciones o facultades académicas, con el fin de tener un consenso en la interpretación. Allí se trata de aplicar un racionalismo crítico a las interpretaciones, para tomar decisiones dentro del marco del contexto socioeconómico y cultural de un riesgo aceptable, donde la vida y la seguridad de los bienes y servicios es la prioridad.

En cualquier caso, para mitigar el riesgo volcánico en una región determinada, Ortiz (1996) opina que hay que responderse con claridad las siguientes preguntas en cada volcán y evaluar las respuestas:

¿Quiénes realizan la investigación? La UNA (OVSICORI y LAQAT) y la RSN, entre otras instituciones y entidades, apoyadas en la CNE. También se tienen los estudiantes de grado y posgrado, tanto nacionales como extranjeros, así como varios por cuenta propia.

¿Quiénes realizan la vigilancia y comunican las alertas y recomendaciones? El OVSICORI, la RSN, apoyadas en la CNE (ver el capítulo de Vigilancia Volcánica). Sin embargo, muchas veces la comunidad y los turistas pueden reportar ciertas anomalías que pueden disparar alertas sobre cambios en la actividad volcánica.

¿Quiénes realizan la prevención y la preparación? Cada persona es responsable de la prevención y su preparación. A una escala más macro, la CNE, las municipalidades, SINAC (programa de educación ambiental y gestión comunitaria), los Comités Comunales y Municipales de Emergencias.

¿Quiénes realizan las actuaciones en caso de crisis volcánica? Las personas y comunidades deben de tener planes por sí mismos. Los observatorios vulcanológicos, por su parte, le dan seguimiento a la crisis y aportan las recomendaciones, mientras que la CNE, los comités municipales de emergencias y el SINAC realizan las acciones que tienen que ver con la población, infraestructura y manejo de las áreas protegidas.

¿Quiénes conocen los planes de emergencia? Comités Municipales de Emergencias, SINAC y la población.

¿Quiénes los evalúan? El OVSICORI, la RSN y la CNE (CAT de Vulcanología).

¿Quiénes los actualizan? El SINAC y la CNE.

¿Quiénes los ponen en práctica y cada cuánto? El SINAC y la CNE, idealmente una vez cada 5 años. Sin embargo, los comités Municipales y Comunales están en la obligación de promover estas actividades.

¿Quiénes y cómo los financian? El SINAC y la CNE.

9.3.7 ¿Qué se ha hecho, se está haciendo y se puede realizar para una mejor gestión del riesgo?

Para la gestión del riesgo, en el presente caso de índole volcánica, resulta importante previo a la próxima actividad eruptiva, contemplar los siguientes aspectos, entre los más relevantes: a) Conocer la historia eruptiva y las escalas de tiempo manejadas (recurrencia y tipos de peligro), b) Evaluar la amenaza, la exposición y vulnerabilidad y sus escenarios (efectos sobre infraestructura, personas, economía), c) Hacer el seguimiento continuo (vigilancia o monitoreo volcánico), d) Diagnosticar sobre el estado de actividad del volcán y, e) Socializar y comunicar, y f) Preparar y emitir rutas de evacuación, lugares en donde no se debe construir, lineamientos estructurales y uso de la tierra (Donovan, 2019). Todos estos aspectos se han contemplado ampliamente desde hace varias décadas y parte de ellos se trataron en los capítulos anteriores.

Todo ello es la base para la preparación ante una crisis volcánica, dentro de la cual se requiere evaluar con antelación qué de los puntos siguientes se tienen y conocen, por el personal y entidades involucradas (Ortiz, 1996; Donovan, 2019):

- a) Mapas de peligro volcánico,
- b) Mapa y rutas de evacuación,
- c) ¿qué tan grande y hacia donde puede afectar la erupción?
- d) recomendaciones concretas hacia la población,
- e) Sistema de Alerta Temprana (SAT),
- f) ¿se requieren estructuras de mitigación?
- g) Educación y comunicación,
- h) Simulacros.

De ellos se desprende que, en el caso del Rincón de la Vieja, se cumple parcialmente con los puntos a, b, c, d y g.

Dentro de la Política Nacional de Gestión del Riesgo para el 2016-2030 está contemplada la meta de que la contribución con el desarrollo y el bienestar de la población costarricense se logre de manera segura y sostenible, haciendo evidente los factores de riesgo inherentes y realizando la gestión prospectiva, para fortalecer las capacidades de los diversos sectores de la sociedad, para la construcción de una cultura preventiva que reduzca la vulnerabilidad, evite las pérdidas y favorezca la recuperación efectiva ante los posibles eventos de desastres (CNE, 2015).

La CNE posee varios ejes con sus objetivos y resultados esperados, así como el indicador del resultado para el adecuado manejo de la gestión del riesgo según su reciente plan del 2021-2025 titulado “Elementos estratégicos de la Política Nacional de Gestión del Riesgo” (CNE, 2021). Claramente, las continuas charlas y distribución de información que se está realizando al SINAC, particularmente al personal del PNV Rincón de la Vieja, a las Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes (ASADAS), a los entes encargados del turismo y a las municipalidades incide tanto en el eje segundo, en correspondencia con la participación de diferentes organizaciones, como la educación y gestión e innovación del conocimiento (eje tercero), al verter el conocimiento y

resultados en la ciudadanía, para crear una mejor conciencia actualizada (Fig. 9.20; Cuadro 9.9).

El Cuadro 9.10 identifica algunos de los pilares fundamentales de la gestión del riesgo y su modo de medición, mientras que el Cuadro 9.11 incluye lo que se ha hecho y lo que falta por hacer o podría hacerse en el volcán Rincón de la Vieja. Todo ello puede constituir una guía para la toma de decisiones y fortalecer el plan general de manejo del PN Rincón de la Vieja y la gestión del riesgo en la región entre el 2023 y el 2030, dentro de un marco de desarrollo sostenible y con una mejor planificación territorial, direccionado hacia una innovación en el tipo de educación que recibe la población sobre su entorno ambiental y una innovación en la cultura de prevención.



Fig. 9.20: Pilares y ejes transversales de la política nacional de gestión del riesgo para el 2016-2030 (CNE, 2015, 2016, 2021).

Dentro del eje 3 del Plan Nacional de Gestión del Riesgo (PNGR) 2021-2025 (CNE, 2021), se encuentra el rubro “*Educación, gestión del conocimiento e innovación*”. Con el programa de rotulación informativa que se comenzó a implementar a inicios del 2021, se cumple a plenitud con este eje, puesto que no solo se han instalado rótulos con información en el Rincón de la Vieja, acerca de su grado de actividad, erupciones pasadas, datos morfométricos (altura, altitud, área, volumen, dimensiones de sus cráteres) y tipos de peligros volcánicos, sino que se han impartido charlas sobre su finalidad, enfocadas, además, a aportar el conocimiento sobre el vulcanismo y sus peligros; además, se ha incluido el geoturismo, de la mano con nuevos emprendimientos y el fomentar la reactivación económica pos-pandemia. Aunado a ello, en este informe se incluye investigación y modelización, que también forma parte de la generación del conocimiento e innovación, contempladas dentro del PNGR. Todo ello se podría resumir en una geo-alfabetización.

Por su parte, el presente informe puede ayudar a desarrollar una mejor planificación territorial y actualización de los planes reguladores urbanos, así como facilitar acercamientos con las municipalidades, lo cual estaría contemplado dentro del eje 5: “*Planificación, Mecanismos e Instrumentos Normativos para la Reducción del Riesgo*”.

Aunque resulta claro que el uso de la información, sin lugar a dudas, contribuye a reducir la incertidumbre a partir de la toma de decisiones, no resulta fácil, dado que hay que estar constantemente actualizándola, particularmente debido a los cambios en el uso de la tierra, así como la movilidad y crecimiento de población, al tanto que se sabe que el Rincón puede llegar a tener una erupción más grande que las históricas en algún momento durante los próximos dos siglos, aunque la pregunta es ¿cuándo va a ocurrir?. Aunque acá se presentan datos sobre esa posible recurrencia, la naturaleza no es totalmente predecible.

Lo preferible es que todos estos conocimientos de los peligros, historia volcánica, planes de emergencia, rutas de evacuación y recomendaciones, sean impartidos y dados a conocer a todos los niveles (centros educativos, organizaciones comunales, asociaciones de desarrollo, ASADAS, municipios y otros), promoviendo una mayor participación y toma de decisiones en la gestión del riesgo, adecuadas a cada entorno y a la realidad socioeconómica y cultural (Fig. 9.20). Resulta importante aprovechar la tecnología para compartir información y educar (aplicaciones, redes sociales, páginas Web, códigos QR, encuestas en línea, entre otras), lo cual lo hace más atractivo y fácil de acceder para una población cada vez más tecnificada.

Cuadro 9.10: Elementos estratégicos de la Política Nacional de Gestión del Riesgo y su modo de medición (CNE, 2021).

EJES	OBJETIVO ESTRATÉGICO	RESULTADO ESPERADO	INDICADOR DE RESULTADO
Generación de resiliencia e inclusión social	Incorporar la variable en el desarrollo social, para incidir en los factores de riesgo en la población vulnerable y reducir el número de personas que son afectadas con medidas tendientes a generar resiliencia.	Reducir los factores de riesgo para las personas, en condición previa de vulnerabilidad y exclusión social, afectadas por desastres.	Número de personas anualmente afectadas por eventos de desastre.
Participación y desconcentración para la gestión del riesgo	Promover la incidencia de los actores sociales y económicos en la gestión del riesgo, con particular énfasis en las comunidades vulnerables y en la actividad privada para la vigilancia y análisis de los factores de riesgo, la planificación segura del desarrollo local, la respuesta y la recuperación.	Los actores sociales y económicos, en todos los ámbitos del territorio y los sectores de actividad nacional, consolidan prácticas y compromisos de gestión del riesgo.	Número de organizaciones sociales, públicas y privadas con participación en prácticas y compromisos relacionados con la gestión del riesgo
Educación, gestión del conocimiento e innovación	Promover el desarrollo del conocimiento, la innovación y la educación sobre las causas y las alternativas de gestión del riesgo, mediante el fomento de la investigación, la difusión del conocimiento, las buenas prácticas y la aplicación apropiada de métodos y recursos tecnológicos de enseñanza–aprendizaje que estimule decisiones, conciencia y actitudes resilientes, y transformación en las pautas culturales de la población costarricense.	La ciudadanía costarricense tendrá un mejor acceso a la información, conocimiento, percepción y conciencia de las causas del riesgo y una actitud resiliente en torno a los desastres.	Número de personas con conocimientos, capacidades desarrolladas y nuevas actitudes en referencia al riesgo de desastre.
Inversión financiera sostenible, infraestructura y servicios.	Disponer el diseño y aplicación de una estrategia económica y financiera de reducción de riesgos de largo plazo que haga posible el análisis y la gestión prospectiva del riesgo en la inversión en obra pública y en los servicios del Estado, tales como pérdidas en líneas vitales, la continuidad y la pronta recuperación de los servicios públicos.	Se han reducido los daños y pérdidas en infraestructura y los servicios públicos del país.	Porcentaje de infraestructura y servicios del Estado protegidos, con menores daños y pérdidas.
Planificación, mecanismos e instrumentos normativos para la reducción del riesgo	Incorporar la gestión del riesgo como una responsabilidad de los distintos sectores, que reduzcan las pérdidas, fomenten la seguridad humana y contribuyan a la reactivación económica y social en caso de desastre.	Se han reducido las pérdidas económicas directas e indirectas asociadas a la actividad productiva nacional.	Número de sectores productivos que reducen las pérdidas y los daños, asociadas a eventos de desastre.

Cuadro 9.11: Pilares fundamentales de la gestión del riesgo aplicado al volcán Rincón de la Vieja.

Tipo de pilar (iniciativas a desarrollar)	Actividades que lo definen	Lo realizado	Lo que se puede realizar
Identificación del riesgo (Corto plazo)	Conocimiento, percepción y evaluación de las amenazas, vulnerabilidad y su distribución espacial y temporal, incluyendo su intensidad, incertidumbre conceptual.	Se han realizado diversos estudios de peligro volcánico. El estudio actual es un ejemplo adicional de actualización, que se va a distribuir ampliamente. Se ha instrumentado, según su accesibilidad y comunicación, el volcán para vigilancia volcánica. La ONG bajo el proyecto Fundación “Ayuda en Acción” en Costa Rica, Upala, colaboró activamente con estudiantes para realizar investigaciones fundamentales.	Tener un mejor control geocronológico de los eventos eruptivos pasados, particularmente cerca de su cima. Con el presente informe se llena en gran parte este vacío. Respetar el álveo de los ríos y quebradas. Se debe respetar las áreas protección establecidas para manantiales, quebradas y ríos de acuerdo con la legislación establecida (ley forestal y ley de aguas) o la zonificación del ASP (Área Silvestre Protegida) y las zonas aledañas a los cauces que nacen en la cima del volcán deben ser de restricción absoluta, según el artículo 33 de la ley Forestal N.º 7575.
Comunicación del riesgo (Corto plazo)	Comunicarlo a la población y tomadores de decisiones, sector productivo (público y privado), academia.	Se han realizado varias de charlas y talleres informativos a las comunidades, centros educativos, organizaciones comunales, PN Rincón de la Vieja, academia. La población posee acceso a la información mediante redes sociales y otros medios electrónicos y físicos. Se ha rotulado los sectores peligrosos y con información vulcanológica.	Se debe de continuar con la gealfabetización mediante la transmisión de la información (charlas, talleres) y rotulación informativa-educativa-preventiva, tanto de los peligros, como de la importancia geoturística y visitación responsable.
Reducción del riesgo (Mediano plazo)	Acciones y medidas preventivas, de mitigación (incluyendo estructurales) y adaptación, para disminuir los efectos. Instrumentos normativos para la reducción del riesgo.	Rotulación informativa y preventiva, talleres y charlas sobre la peligrosidad. Se está trabajando en los planes de contingencia. Fomentar la educación y gestión del conocimiento. La ONG bajo el proyecto Fundación “Ayuda en Acción” en Costa Rica, Upala, colaboró activamente con los CCE.	Un mejor ordenamiento territorial al tomar en cuenta los peligros geológicos y, eventualmente, una restricción hacia el desarrollo urbanístico y turístico en un radio de 5 km. Continuar con generación de resiliencia. La ONG, bajo el proyecto Fundación “Ayuda en Acción” en Costa Rica, Upala, continuará colaborando activamente con los CCE durante el 2022-2024.
Financiamiento del riesgo (Mediano plazo)	Acciones e instrumentos para la inversión financiera sostenible, minimizar el impacto socioeconómico, incluyendo, retención y transferencia de fondos, seguros y créditos, etc.	No se ha realizado. Se realizó el trámite para activar la construcción del puente sobre la quebrada Azufrada.	Evaluar si amerita establecer nuevos instrumentos dentro de la relación costo/beneficio en el lapso de recurrencia eruptiva. Se espera que en 2023 se tenga terminado el puente sobre la quebrada Azufrada.
Gestión de emergencias y desastres (Corto y mediano plazo)	Medidas para enfrentar las crisis con planes y protocolos, vigilancia, alertas, simulacros, etc.	Se tienen protocolos para el volcán Rincón de la Vieja, aunque no se han realizado simulacros, pero si se han presentado crisis menores que han servido de práctica. Se cuenta con una estructura de Comités Municipales alrededor del volcán con planes de emergencia, instrumentos, recursos materiales y humanos capacitados para la atención de emergencias.	Realizar simulacros cuando lo amerite y actualizar el protocolo de Contingencia del PN Rincón de la Vieja. Se espero que se puedan realizar durante el 2023-2024, aunque sí se han tenido acciones positivas cuando se han presentado erupciones importantes.



Fig. 9.21: Charlas de capacitación (arriba) y del Comité Comunal de Emergencias (abajo).

9.3.8 ¿Resulta necesaria La regulación del uso del suelo en el volcán Rincón de la Vieja?

Ortiz (1996) comenta que a nivel mundial claro está que un método para reducir el riesgo a muy bajo costo sería el prohibir el acceso a determinadas zonas, aunque agrega que las decisiones administrativas que esto conlleva suelen ser contradictorias, por su incidencia opuesta en los ámbitos de la ordenación territorial, turismo, industria, comercio y agricultura, entre otros. En efecto, se tiene así, que los volcanes son una fuente económica de turismo directo e indirecto, motor de la economía de muchos países, incluyendo el nuestro (6.3 % del PIB, Benavides, 2020). El mantener un atractivo turístico sin igual ante una probabilidad eruptiva muy baja –no nula- sería un caso de riesgo aceptable, donde existe una relación de beneficio versus riesgo inclinado del lado de las ganancias hacia un sector grande de la población. Lo mismo se da en otros deportes extremos o de aventura o más aún, en la vida cotidiana al manejar, caminar por una ciudad o abordar un avión o ferry.

Otro aspecto por considerar es que se están desarrollando muchos hoteles y cabinas, así como centros turísticos diversos en sus faldas, cada vez acercándose más a los límites del PN Rincón de la Vieja. Así pues, surge la pregunta ¿se estará incrementando la vulnerabilidad y la posibilidad de que, ante un evento eruptivo imprevisto, puedan salir turistas heridos o incluso muertos? La respuesta es sí, aunque es más compleja que una simple respuesta de un monosílabo o encasillar en blanco y negro. Por un lado, se tienen los ingresos económicos que se perciben en el sector turístico y agropecuario, aunque si se toman ciertas previsiones mínimas, se puede reducir la vulnerabilidad. Por el momento, eso sí, el acceso al cráter del Rincón y vecindades no debe de realizarse por turistas, tan solo por los científicos que estudian el volcán.

Al considerar lo anterior, uno de los objetivos primordiales del presente estudio fue la producción de mapas de peligros actualizados y, consecuentemente, la formulación de directrices generales para el futuro manejo y planificación territorial, en infraestructura y desarrollo turístico. Por ejemplo, en este trabajo se estableció que las áreas con 2 y 5 km de radio porque son aquellas determinadas como las de alto y moderado peligro por caída balística, flujos piroclásticos, caída de ceniza, y lluvia ácida y gases frecuentes. Estos mapas y recomendaciones forman parte de los instrumentos normativos para la reducción del riesgo.

Se podría sugerir el establecer tres zonas importantes con ciertas recomendaciones del uso del suelo y restricción. Resulta importante considerar que, tanto la zona A1, como parte de la zona A2, se encuentran dentro del área del parque nacional Rincón de la Vieja, por lo que además se deben acatar las directrices establecidas por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación. Se recomienda ampliamente evaluar la ubicación de la escuela IDA Gavilán, ubicada dentro de esta zona (Cuadro 9.12).

Por otro lado, los cauces de los ríos representan una amenaza real y frecuente ante la bajada de los lahares. No solo debe de respetarse el no construir cerca del cauce de los ríos y quebradas (álveo), sino también, tener previsiones y hasta sistemas de alerta en el caso de turistas que visiten el sinnúmero de cascadas que hay en la región nórdica del volcán. Se recuerda la prohibición de no construir dentro del cauce de dominio público, respetando las áreas protección establecidas para manantiales, quebradas y ríos de acuerdo con la legislación establecida (ley forestal y ley de aguas) o la zonificación del ASP (Área Silvestre Protegida).

Las zonas aledañas a los cauces que nacen en la cima del volcán deben ser de restricción absoluta, amparado en la definición de área de protección según el artículo 33 de la ley Forestal N.º 7575, la cual establece como dominio del estado 15 m desde ambos márgenes en zona rural o 50 m si el terreno es quebrado con una inclinación mayor a 45°. Además, estos cauces poseen el potencial de descenso de flujos torrenciales de escombros rocosos, arcillas y troncos (lahares), cuando se dan lluvias extraordinarias en la cima que erosionan los depósitos de ceniza. Se debe de respetar y velar por ello por la no construcción en el álveo de los ríos y quebradas.

Referente a la vulnerabilidad física, la principal carretera que atraviesa el área de estudio corresponde con una ruta cantonal, que comunica a los poblados de Buenos Aires y Gavilán con Dos Ríos, donde se comunica con la ruta nacional terciaria N.º 917. El camino cantonal mencionado posee una superficie de rodamiento de lastre, y se encuentra rodeada por gran cantidad de vegetación, principalmente árboles que durante periodos de fuertes vientos han caído ocasionando el bloqueo total o parcial del camino, siendo los vecinos de la zona, quienes en la mayoría de las ocasiones se encargan de despejar la vía. Asimismo, durante la época lluviosa y en ausencia de mantenimiento, este camino se torna lodoso y la circulación de vehículos se complica. La ruta es atravesada por varios ríos y quebradas, los cuales, durante periodos de fuertes lluvias, la bloquean con vegetación o rocas arrastradas por la corriente. Los ríos más importantes para efectos del presente estudio son el Pénjamo y el Azul, estos atraviesan la principal vía que comunica a los poblados de Buenos Aires y Gavilán con Dos Ríos, y con la ruta nacional más cercana.

Cuadro 9.12: Resumen de Áreas de peligro y recomendaciones para uso del territorio.

Áreas funcionales	Criterios de definición	Recomendaciones para uso del territorio
Muy alto peligro A1	Zona de peligro proximal, zona afectada por gases y lluvia ácida en la cima y radio de 2 km alrededor del cráter. Este sector es el más propenso a los flujos piroclásticos y lahares.	<p>Restringir todo tipo de actividad humana, permitiendo únicamente el acceso a personal de investigación y equipos de socorro.</p> <p>Prohibir el turismo ilegal.</p> <p>Los vulcanólogos, no deben permanecer cerca de ríos en periodos lluviosos o cuando no es visible la cima del volcán.</p> <p>Recalcar la prohibición de no construir dentro del cauce de dominio público, respetando las áreas protección establecidas para manantiales, quebradas y ríos de acuerdo (ley forestal y ley de aguas) o la zonificación del ASP (Área Silvestre Protegida). Las zonas aledañas a los cauces que nacen en la cima del volcán deben ser de restricción absoluta, amparado en la definición de área de protección según el artículo 33 de la ley Forestal N.º 7575.</p>
Alto peligro A2	Radio de 5 km alrededor del cráter, parte de las zonas expuestas a los efectos de cenizas, gases y lluvia ácida. Referente a los lahares, particularmente en los cauces de los ríos Pénjamo, Zanjonuda, Azufrada y Azul.	<p>Restringir actividades que requieran permanencia en el área por periodos superiores a ocho horas.</p> <p>Implementar medidas de seguridad en las actividades turísticas que se desarrollen.</p> <p>No permanecer cerca de ríos en periodos lluviosos o cuando no es visible la cima del volcán. Respetar el álveo de los ríos y quebradas.</p> <p>Ver leyes en A1.</p> <p>No construir infraestructura estratégica.</p> <p>Evaluar la ubicación de la escuela IDA Gavilán, ubicada dentro de esta zona.</p>
Moderado-bajo peligro A3	Posibles zonas de inundación por lahares, particularmente con volúmenes $\geq 2.5 \times 10^6$ m ³ , áreas afectadas por gases, lluvia ácida y zonas donde podría haber caída de ceniza con espesores de entre 10 y 30 cm.	<p>Puede permitirse cualquier tipo de actividad a los pobladores.</p> <p>Rotular la zona como área de influencia volcánica.</p> <p>No construir nuevos complejos habitacionales.</p> <p>No desarrollar actividades de agricultura ni ganadería a gran escala.</p> <p>Capacitar a los pobladores para proteger sus bienes, cultivos y animales ante un escenario eruptivo.</p> <p>Respetar las leyes de restricción de construir cerca del álveo de un río (ver leyes en A1).</p>

9.3.9 Comentarios sobre la preparación y resiliencia de los poblados y del personal e infraestructura ICE

Se entiende por resiliencia como la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas (Renda et al., 2017; UNISDR, 2017). La resiliencia puede ser medida mediante el funcionamiento de la infraestructura del sistema afectado por el evento adverso después de la ocurrencia de este y, especialmente, por el tiempo que tarda un sistema afectado por un desastre en volver a sus niveles de origen. Otra de las definiciones es entendida como “la habilidad que tienen algunas unidades sociales (organizaciones, comunidades) para mitigar los impactos de los eventos adversos cuando estos ocurren y desarrollar actividades de recuperación de modo tal de minimizar los daños sobre el tejido social y mitigar los efectos de desastres futuros.” (UNISDR, 2017).

Para poder comprender si las comunidades que viven en un radio de unos 10 km del Rincón de la Vieja, se puede consultar los cuadros 9.13 y 9.14, donde se se expresan las condiciones necesarias para que una ciudad, comunidad o grupo (caso del ICE) sea resiliente a los desastres, los diez aspectos esenciales para lograrlo -según la Estrategia Internacional para la Reducción Desastres de Naciones Unidas- y los aspectos más distintivos entre una comunidad vulnerable y otra resiliente.

Por ejemplo, con respecto al personal e infraestructura del ICE (Centro de Generación Geotérmica Pailas I y II y proyecto en construcción Borinquen), se puede decir lo siguiente:

- a) Poseen un plan de emergencias relacionado con los campos geotérmicos (ambas plantas), principalmente en caso de incendio, derrame de productos químicos, atención médica y posibles efectos atmosféricos. Para el caso de erupción volcánica se tiene identificado el peligro, más aún no se ha establecido ningún plan de emergencias, principalmente porque siempre la afectación mayor sería hacia el sector de Dos Ríos y para el Sector de Pailas la afectación sería mínima o nula.
- b) Sí se han realizado dos simulacros en esta línea (emergencia por erupción volcánica) en el ICE en dicho sector.
- c) El personal está consciente y ha recibido información, tales como charlas y los simulacros mencionados, además de que se utilizan medios electrónicos y pizarras informativas como información complementaria para sensibilizar a la población laboral del ICE sobre diferentes condiciones de peligro, incluyendo la amenaza volcánica. Además, como equipo de ERI (Equipo de Respuesta Inmediata) y el grupo de Sismología, Vulcanología y Geofísica del ICE con ascensos al cráter del volcán, para colaborar en trabajos de cambio de baterías de los equipos de monitoreo ahí instalados, recolección de muestras y ayuda física en ciertos trabajos.
- d) Es de conocimiento de las comunidades del sector Pacífico del volcán, que el volcán se mantiene activo, aunque los principales eventos se han manifestado más hacia el flanco

Caribe. Pero en general, este tema no compete a la Planta de Generación a nivel de comunales y pueblos vecinos.

e) El PN Rincón de la Vieja posee rotulación informativa amplia sobre el volcán, los procesos volcánicos, mapas de peligrosidad volcánica, entre otros, además de un personal que ha recibido con cierta frecuencia charlas al respecto.

f) Un detalle importante es que el Parque Nacional Rincón de la Vieja mantiene deshabilitado el acceso a senderos hacia el cráter, precisamente por el riesgo a erupción volcánica.

g) El sector del N y NW del cráter, donde se ubican comunidades como Gavilán, Dos Ríos, Bromelias, Buenos Aires, entre otras, posee un Cámara de turismo Rincón de la Vieja (CATURI) y Comité Comunal de Emergencia (CCE) de la comunidad El Gavilán muy organizada y proactiva. Corresponde en un sector en la cual las autoridades locales y la población comprenden sus amenazas y los riesgos, y sobre quién está expuesto y quién es vulnerable.

h) Allí, cada vez que hay un evento eruptivo importante, se toman las acciones preventivas y de alerta. Aunque no se ha realizado un simulacro de evacuación, se tienen claros los planes de emergencia. Allí, las personas están empoderadas para participar, decidir y planificar sus acciones juntamente con las autoridades locales; y valoran el conocimiento, las capacidades y los recursos locales autóctonos.

i) Son capaces de responder, implementar estrategias inmediatas de recuperación y restaurar en un tiempo adecuado los servicios básicos necesarios para reanudar la actividad social, institucional y económica tras un evento adverso.

j) Comprende que la mayoría de los puntos anteriores también son primordiales para desarrollar una mayor resiliencia a las repercusiones negativas. La inversión en resiliencia es una oportunidad para el desarrollo sostenible.

k) Se tienen rotulación informativa sobre el volcán en diversos sectores en las afueras del parque nacional, así como rotulos preventivos sobre lahares y de prohibición de acceso.

l) Se ha venido desarrollando el proyecto “Reducción de la vulnerabilidad de las personas ante amenazas múltiples y violencia generalizada en los cantones de La Cruz, Upala y Los Chiles en Costa Rica”, a través de la Fundación Ayuda en Acción con fondos de la Dirección General de Protección Civil y Ayuda Humanitaria (ECHO) de la Unión Europea. Ello ha reforzado mucho a las comunidades y generando capacitaciones, así como conocimiento básico.

Un aspecto que hace falta es el establecer un Sistema de Alerta Temprana (SAT), tal y como es conocido en la gerga latinoamericana, en particular para el flanco caribeño con respecto a los lahares y eventualmente flujos piroclásticos que excedan los 2-3 km de radio de acción. Uno de los problemas es la señal del celular, para poder instalar equipos que den una alerta con cierta antelación. En ello está trabajando el comité local de emergencia, así como la Cámara de Turismo.

Cuadro 9.13: Aspectos esenciales para lograr comunidades y ciudades resilientes (Renda et al., 2017).

ASPECTOS BASICOS	
1	Organización para la resiliencia [frente a los desastres] Establecer una estructura organizativa e identificar los procesos necesarios para entender y actuar en la reducción de la exposición, impacto y vulnerabilidad ante los desastres.
2	Identificar, comprender y utilizar los escenarios de riesgo actuales y futuros. Los gobiernos locales deben identificar y comprender sus escenarios de riesgos y garantizar que todos los actores colaboran y los reconocen.
3	Fortalecer la capacidad financiera para la resiliencia Comprender el impacto económico de los desastres y la necesidad de invertir en la construcción de resiliencia. Identificar y desarrollar mecanismos financieros que puedan apoyar las actividades de resiliencia.
ASPECTOS OPERATIVOS	
4	Promover el diseño y desarrollo urbano resiliente Asegurar la evaluación del entorno construido e impulsar la implementación de las acciones requeridas para hacerlo resiliente, de acuerdo con los objetivos trazados.
5	Proteger las zonas naturales de amortiguación para mejorar la función de protección proporcionada por los ecosistemas Identificar, proteger y monitorear aquellos servicios ecosistémicos críticos que contribuyen a mejorar la resiliencia antes los desastres.
6	Fortalecer la capacidad institucional para la resiliencia Asegurar que todas las instituciones relevantes para la resiliencia de la ciudad cuenten con las capacidades requeridas para desempeñar sus funciones.
7	Comprender y fortalecer la capacidad social para la resiliencia Fortalecer la "conexión" social y una cultura de ayuda mutua que influya de manera significativa en el impacto de los desastres sea cual sea su magnitud.
8	Incrementar la resiliencia de la infraestructura Comprender la forma en que los sistemas de infraestructura crítica responderán ante los escenarios de riesgo de desastres que la ciudad podría experimentar y desarrollar planes de contingencia para manejar el riesgo identificado.
ASPECTOS PARA UNA MEJOR RECONSTRUCCION	
9	Asegurar la efectividad de la preparación y una respuesta efectiva a los desastres Mejorar la preparación ante desastres para asegurar una respuesta efectiva, instalar sistemas de alerta temprana y desarrollar las capacidades de atención a emergencias en su ciudad.
10	Acelerar la recuperación y reconstruir mejor, después de cualquier desastre Planificar y estar preparado para las interrupciones del desarrollo antes de que ocurran. Aprender de los errores intentando comprender por qué se produjeron los daños y asegurar que se incorporen las lecciones aprendidas en los procesos de reconstrucción

Cuadro 9.14: Aspectos más distintivos entre una comunidad vulnerable y una resiliente (Renda et al., 2017).

COMUNIDAD VULNERABLE	COMUNIDAD RESILIENTE
<p>→ El desastre sorprende a la comunidad.</p>	<p>→ La comunidad cuenta con mecanismos de alerta temprana para tomar las medidas adecuadas ante la ocurrencia de un peligro.</p>
<p>→ La comunidad no conoce los peligros que pueden amenazarla</p>	<p>→ La comunidad ha identificado sus peligros y elaborado un mapa de peligros conocido por todos los moradores</p>
<p>→ La comunidad no sabe a dónde ir en caso de emergencia.</p>	<p>→ La comunidad ha identificado, señalado y acondicionado lugares seguros</p>
<p>→ La comunidad no está preparada para la ocurrencia de una emergencia.</p>	<p>→ La comunidad ha formado y capacitado una Brigada de Defensa Civil, que sabe cómo actuar en caso de emergencia</p>
<p>→ La comunidad deforesta para aumentar sus parcelas cultivables.</p>	<p>→ La comunidad preserva la flora existente y extiende sus parcelas en zonas que no generan un riesgo para su seguridad</p>
<p>→ La comunidad adopta una actitud pasiva ante la ocurrencia de un desastre, considerándolo un castigo divino.</p>	<p>→ Encabezada por el dinamismo de las autoridades, la comunidad toma conciencia de la posibilidad de prepararse para afrontar a un desastre y reducir los daños ocasionados</p>
<p>→ La comunidad vive a orillas de un río que tiene crecientes frecuentes.</p>	<p>→ La comunidad se reubica en una zona más segura o implementa medidas estructurales para minimizar el riesgo de inundación.</p>

9.3.10 ¿Qué se puede esperar en lo que resta del siglo y parte del entrante?

Los diferentes estudios utilizaron como modelo las diferentes fases, tipos y distribución de los productos eruptivos ayudan a estimar lo que se podría esperar del Rincón de la Vieja.

Si se observa la frecuencia eruptiva del Rincón de la Vieja para los últimos miles años, se pueden plantear dos hipótesis:

- a) Que continúe con las erupciones frecuentes de relativa poca monta y con efectos restringidos al parque nacional.
- b) Que entre en un periodo de dormitar por varios años como ocurrió en las décadas pasadas.
- c) Que se presente una intrusión importante de magma que pueda evolucionar en una erupción pliniana (poco probable a la luz de la información obtenida de la vigilancia volcánica).

En general, la mayoría de las erupciones importantes a nivel mundial son precedidas por señales premonitoras que, si logran reconocerse y auscultarse adecuadamente, podrían brindar la oportunidad de tomar medidas pertinentes con respecto a eventos futuros. Sin embargo, para erupciones pequeñas, las señales premonitoras pueden ser muy tenues o complejas, e incluso inexistentes y, para ser interpretadas correctamente, pueden requerir de estudios muy cuidadosos y detallados, de acuerdo con el grado de conocimiento del estado actual del volcán, que puede ser en reposo, actividad exhalativa (salida copiosa de gases) o actividad eruptiva frecuente o permanente y del pasado eruptivo del volcán mismo. Para ese entonces, el conocimiento de la vulcanología, los equipos y su tecnología, aunado a las experiencias previas resumidas en el presente trabajo, servirán de una base mucho mejor que la gestión del riesgo.

Puesto que varios de los eventos previos prehistóricos, dejaron un registro geológico mayor que los históricos, se puede inferir que en el caso de un reactivar en el futuro, se pueda presentar un evento vulcaniano mayor o similar que los observados en tiempo histórico (VEI 3-4). El tipo de erupción, su lugar de ocurrencia y volumen de magma involucrado en ascenso, se podrán evaluar mucho mejor en su momento con las técnicas de monitoreo y, con base en ello, establecer los tipos de peligros esperados, ya sea aquellos contemplados en el presente estudio, o bien, modificar cada cierto tiempo (mapas dinámicos) lo que se esté pronosticando en ese momento.

En particular, se debe contemplar que los lahares no solo pueden ser disparados la actividad volcánica, sino por terremotos, deslizamientos y lluvias intensas, por lo que se recalca que es meritorio y urgente un SAT y un mejor monitoreo de la cuenca del Reventado.

La mayoría de los volcanes entran en erupción tanto de manera efusiva como explosiva, siendo el comportamiento explosivo el responsable de la mayoría de las muertes humanas. Puesto que se cree que el estilo de erupción está fuertemente controlado por procesos de conducción rápidos, ello limita la capacidad de pronóstico, pero, además: ¿existen condiciones en las que el resultado de una erupción (explosiva o efusiva) esté predeterminado por el estado del magma en el reservorio subvolcánico? Un reciente estudio

al parecer sugiere que la cristalinidad pre-eruptiva, el contenido de agua disuelta y la presencia de volátiles exseltos en la cámara ejercen un control primario sobre los estilos eruptivos. Los magmas erupcionan explosivamente en un rango bien definido en contenido de agua disuelta (~ 4–5.5 % en peso) y cristalinidad (menos del 30 % en volumen). Todas las demás condiciones, a saber, mayor cristalinidad, contenidos de agua disuelta por debajo del 3.5 % en peso o por encima del 5.5 % en peso, favorecen la actividad efusiva. Entre estos rangos, existe un campo estrecho de propiedades de almacenamiento de transición que no discriminan entre estilos eruptivos, y donde el conducto ejerce el control principal sobre el comportamiento eruptivo. Ante ello, las mejores estimaciones de la cristalinidad y el contenido de agua en las cámaras subvolcánicas son la clave para pronosticar el estilo eruptivo, donde el conducto ejerce el control principal sobre el comportamiento de la erupción (Popa et al., 2021).

Se requiere de un tiempo prolongado para que la diferenciación química del magma produzca fundidos más ácidos (dacitas o riolitas), pese a ello, la inyección de andesitas/basaltos ricos en volátiles (4 % a 7 wt % H₂O) pueden desembocar en el despertar y erupción con desarrollo muy rápido en días a menos de 3 meses (Stix, 2018).

En tal caso, como lo proponen a modo de ejemplo White y McCausland (2016), la instrumentación de vigilancia volcánica podría alertar sobre la presencia de eventos sísmicos volcanotectónicos distales ($d \leq 45$ km), así como de forma posterior se puede hacer una estimación del volumen de magma inyectado al utilizar la sismicidad y la deformación.

Sin embargo, hay que tener particular precaución con la interpretación y confusión de eventos tectónicos con volcanotectónicos distales, particularmente en un medio volcánico muy afectado por fallas tectónicas, como lo es nuestro contexto nacional o donde existen varios embalses hidroeléctricos cercanos, que pueden generar sismicidad inducida. Se debe recordar que los sismos volcanotectónicos, desde el punto de vista estricto, son aquellos donde hay fluidos volcánicos involucrados (gases y magma) y no por el mero hecho de ocurrir dentro y bajo un edificio volcánico. Pese a que no siempre resulta fácil el discernir entre un evento sísmico tectónico de uno volcanotectónico, no se debe de tomar a la ligera su clasificación, dado que las implicaciones en la gestión del riesgo son diferentes.

Si la erupción fuese de grado VEI 3 o 4, los efectos adversos serán notorios sobre los flancos W y SW (claramente puede afectar otros flancos si la dirección del viento es diferente, así como la altura de la erupción). Los poblados y ciudades estarán propensos a problemas en la salud por la persistente inhalación y exposición a las partículas de ceniza y gases, presentándose con seguridad problemas respiratorios, oculares, cutáneos y gastrointestinales.

Se dará una afectación a los medios primarios de vida como la agricultura, la ganadería, el turismo y la pequeña y gran industria (hoteles, restaurantes, sodas). Ello conllevará a la falta de recursos económicos de las familias por pérdidas de sus trabajos y para la compra de alimentos y transporte de su ganado a sitios seguros.

Cuadro 9.14: Recomendaciones al uso del suelo en función de las amenazas volcánicas integradas (p. ej., Fig. 9.18) para la planificación del territorio (modificadas de Proyecto MET-ALARN, 2005).

Grado de Amenaza	Pérdidas y daños previsibles en casos de uso para asentamientos humanos	Implicaciones para el ordenamiento territorial (recomendación)
Amenaza Extrema (rojo oscuro)	<p>Las personas pueden estar en peligro tanto dentro como a fuera de los edificios, así como la destrucción o efectos en la infraestructura, viviendas y cultivos.</p> <p>Los daños son extremos (destrucción, muerte probable y heridas de consideración), con una probabilidad muy alta en el caso de entrar en actividad el foco eruptivo, en particular en el campo cercano.</p>	<p>Zona de prohibición: No se deben de construir estructuras vitales para el país ni obras a menos que sean para protección temporal o información turística, que no impliquen concentración de población 24/7.</p>
Amenaza Alta (rojo)	<p>Las personas pueden estar en peligro tanto dentro como a fuera de los edificios, así como la destrucción o efectos en la infraestructura, viviendas y cultivos.</p> <p>También puede ser que los eventos se manifiesten con una intensidad relativamente débil, aunque con una frecuencia elevada. En este caso, las personas están amenazadas por exposición continua.</p>	<p>Zona de restricción y control: No apta para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos. Se debe de promover la reubicación y no fomentar nuevas construcciones, a menos que sean de protección o información turística. En caso de que ya existan obras importantes, se debe hacer una revisión de las zonas de posible mayor impacto por la caída de ceniza y los gases, para la limpieza, el mantenimiento y la sustitución de piezas. Si existen núcleos poblacionales, se debe trabajar en procesos de educación y concientización sobre el peligro volcánico, así como establecer Sistemas de Alerta Temprana y rutas de evacuación. Además de la formación de vigilantes volcánicos comunales, para que las personas brinden su conocimiento y participen con la vigilancia volcánica. En el caso de usos agropecuarios se deben capacitar a los productores en técnicas para reducir pérdidas (invernaderos para protección de animales y de cultivos), así como promover mecanismos de seguros ante eventos naturales. En el caso de las ASADAS o acueductos comunales que tengan tomas de agua en esta área es importante que cuenten con Planes de Seguridad del Agua (PSA). Se recomienda un uso del suelo para zonas de protección y turismo de bajo impacto. Además de desincentivar la expansión de núcleos urbanos. Se recomienda un uso del suelo para zonas de protección y turismo de bajo impacto. Además de desincentivar la expansión de núcleos urbanos.</p>

<p style="text-align: center;">Amenaza Media (anaranjado)</p>	<p>Las personas están en peligro. Daños moderados a importantes a la agricultura y ganadería en función del tipo de peligro; abrasión de equipos, corrosión por gases a maquinarias, equipos y herramientas.</p>	<p>Zona de reglamentación: Se debe restringir la expansión y densificación de asentamientos humanos, a menos que se respeten reglas de ocupación del suelo.</p>
<p style="text-align: center;">Amenaza Baja (Amarillo)</p>	<p>El peligro para las personas es moderado a débil en eventos moderados a bajos. Los edificios pueden sufrir daños leves; daños temporales a la agricultura y ganadería, abrasión de equipos, corrosión por gases a maquinarias, equipos y herramientas.</p>	<p>Zona de sensibilización: Apta para asentamientos humanos, pero la población debe ser sensibilizada ante la existencia de amenazas moderadas a probables (no nulas), para que conozcan y apliquen reglas de comportamiento ante los eventos. Planes de evacuación y la probabilidad de pérdidas en la agricultura y ganadería. Se recomienda un uso de suelo urbano de baja densidad.</p>
<p style="text-align: center;">Amenaza residual (verde)</p>	<p>Existen amenazas que tienen una probabilidad de ocurrencia débil (no nula) o que se pueden manifestar con una intensidad fuerte, pero en período de retornos muy largos. Se excluyen los grandes colapsos volcánicos laterales (megadeslizamientos volcánicos), los colapsos de calderas con ignimbritas asociadas y las megaplinianas (VEI ≥ 4).</p>	<p>Zona de sensibilización: Apta para asentamientos humanos, aunque los usuarios del suelo deben ser sensibilizados ante la existencia de amenazas con largo período de retorno, para que conozcan y apliquen reglas de comportamiento apropiadas ante eventos.</p>
<p style="text-align: center;">Amenaza no evaluada (Blanco)</p>	<p>Blanco: Despreciable la amenaza o baja de las evaluadas según el estado actual de conocimientos. Se excluyen los grandes colapsos volcánicos laterales (megadeslizamientos volcánicos), los colapsos de calderas con ignimbritas asociadas y las megaplinianas (VEI ≥ 4).</p>	<p>Zona de sensibilización: Pese a que las personas no estén bajo la influencia directa, la educación y el conocimiento resulta importante dado que se pueden movilizar por turismo o trabajo a sectores bajo algún grado de amenaza. Puede existir cierta peligrosidad a largo plazo.</p>

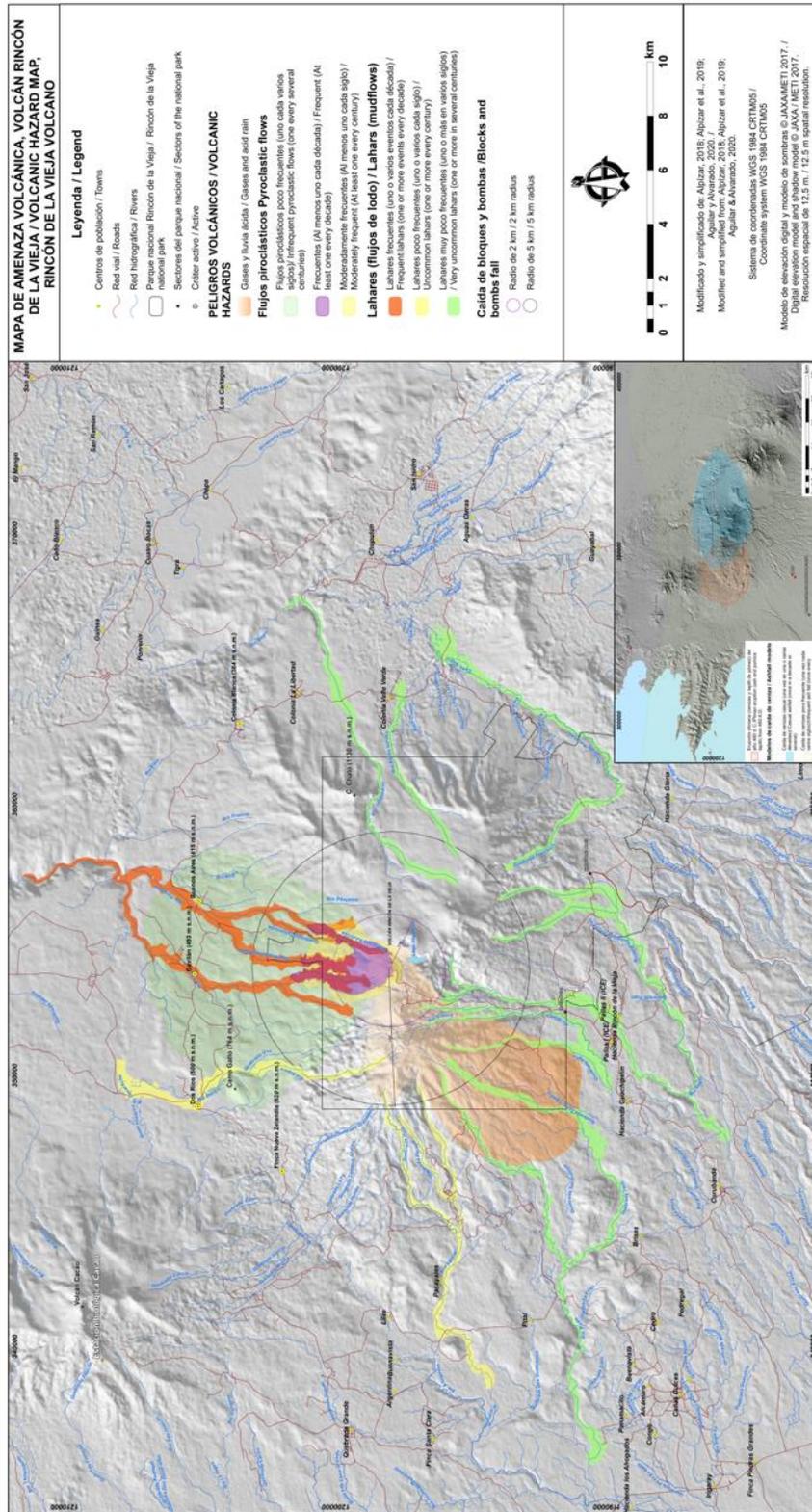


Fig 9.23. Amenazas volcánicas integradas del Rincón de la Vieja.

10. CONCLUSIONES

El volcán Rincón de la Vieja, el único volcán históricamente activo en la cordillera volcánica de Guanacaste, abarca 321 km² y una altitud de 1916 m s.n.m. Desde el punto de vista geomorfológico, corresponde con un macizo estratovolcánico complejo, con varios conos y cráteres cuspidales, pero ninguno satelital en sus flancos medios o bases. Se establecieron tres grandes unidades morfo-cronológicas:

- 1) Proto-Rincón (15 % del área total), perteneciente al Pleistoceno Inferior, subdividido en 2 subunidades con coladas de lava bien definidas con pendientes suaves (3°-7°) pero abruptas en sus frentes (7°-22°), bastante bien conservadas sus morfologías pese a avanzada edad.
- 2) Paleo-Rincón (37 %) del Pleistoceno Medio, subdividido en 3 subunidades, profundamente diseccionado, aunque con pendientes generales suaves (10°-13°).
- 3) Neo-Rincón (48 %) del Pleistoceno Superior al Holoceno, compuesto de 11 subunidades, con pendientes fuertes (17°-22°) en su parte media y suavizadas (7°-8°) hacia el N.

Contrario a muchos volcanes de la cordillera de Guanacaste y Central, donde el grado de disección el flanco nórdico (caribeño) está más profundamente diseccionado con respecto al flanco Pacífico, lo opuesto ocurren el Rincón de la Vieja. La razón está relacionada a que muchos de los conos volcánicos recientes (Cuaternario Superior del Neo-Rincón) vertieron sus coladas de lava, flujos piroclásticos y lahares hacia el flanco Caribe, cubriendo el paisaje rugoso previo y suavizando con ello el relieve. En forma adicional, existe una caldera de avalancha en su cerca mirando al Pacífico. Una excepción es el cerro Chato (1130 m s. n.m.), un volcán extinto y muy derruido (disectado) por la erosión en su flanco NE, así como sus extremos oriental y occidental con fuertes escarpes. Gran cantidad de cascadas se presentan en los cursos de agua.

Se definieron 12 focos eruptivos (en lugar de los 9 conocidos hasta el momento), además de un posible domo en el interior del cráter 5. Los conos que alojan los cráteres poseen pendientes entre 20° y 30°. Por otra parte, se propone una evolución del complejo volcánico mediante criterios como en análisis del patrón y densidad de drenajes, análisis de pendientes y grado de erosión, así como otros criterios morfométricos. La distribución espacial de los 12 focos eruptivos posee un ordenamiento complejo con cambios de orientación de E-W en su extremo occidental, a WNW-ESE en su sector oriental, no sencillo de explicar; por lo que se ofrecen varios modelos de volcanoestructurales, en su mayoría relacionados con fallas de rumbo.

Al ser el único volcán históricamente activo en la cordillera de Guanacaste, presenta un turismo incipiente en su flanco nórdico, justo en el sector en el que ya en estudios anteriores habían identificado diversos peligros volcánicos. Dada la necesidad de conocer a detalle la geología en la zona, así como sus unidades estratigráficas de los eventos eruptivos Holocenos (últimos 11 años), se realizó un mapeo geológico y estratigráfico entre las comunidades de Dos Ríos hasta Buenos Aires, del cantón de Upala, base fundamental para

los estudios de amenaza volcánica. El trabajo estratigráfico fue complementado con 6 nuevas dataciones de radiocarbono.

Allí, unos lahares antiguos afloran en la llamada catedral Santuario (río Azul) con una edad superior a 42 ka, mientras que algunas capas plinianas de pómez meteorizadas (anaranjadas) afloran tanto en el flanco SW como entre Nueva Zelanda y Gavilán con una edad cercana a los 10 ka, según los resultados obtenidos en los paleosuelos infrayacentes a las pómez cerca del puente sobre el río Azul. Por lo tanto, la colada de lava que sobreyace a los lahares antiguos e infrayace a las plinianas antiguas ha de tener una edad superior a los 10 ka. En efecto, el campo de coladas de lava en bloques de Neo-Rincón Superior (o Gavilán), geomorfológicamente el más reciente del Rincón de la Vieja, provienen del cono Von Seebach (Neo-Rincón W) y del cono del cráter Activo (Neo-Rincón E); tendrían una edad de unos 5 ka o ligeramente más joven y estarían cronológicamente sobre la discordancia observada en la plataforma geotérmica.

El evento pliniano de caída más reciente (direccionado hacia el WSW) con flujos piroclásticos asociados (direccionados hacia el norte) ocurrió con una edad ponderada del año 300 de nuestra era, fecha corroborada por estudios arqueológicos recientes. Este evento, sin duda, profundizó y agrandó el cráter Activo, dándose su morfología actual y con la formación de un lago cratérico hiperácido y caliente, al cortar acuíferos más profundos. Posteriormente, los eventos explosivos subsiguientes (freatosurseyanos) generaron un anillo de piroclastos alrededor del cráter Activo y abanicos de lahares en su flanco N.

Todo esta historia está plasmada en el mapa geológico, en columnas estratigráficas y en la revisión de las dataciones radiométricas. Análisis petrográficos y químicos están en proceso de estudio. Una sección estratigráfica expuesta en la plataforma del pozo geotérmico PLB-05 (sector pacífico del Rincón de la Vieja), permitió complementar y correlacionar cronológicamente la estratigrafía con la del sector Caribe. Allí se dató un suelo desarrollado sobre una discordancia erosiva y gap, así como un depósito pliniano antiguo con la formación de suelos rojizos, que debió de ocurrir alrededor del 8.4 ka, sobre la cual se encuentran los productos eruptivos recientes (plinianos y subplinianos, CDPd) del Rincón de la Vieja. Perfectamente, la capa de pómez anaranjadas antigua y meteorizada, presente en la plataforma podría ser equivalente a alguna de las plinianas que afloran entre Nueva Zelanda y Gavilán.

Referente a la caída de cenizas, el programa FALL3D permitió mejorar apreciablemente la resolución espacial y temporal del análisis de eventuales episodios de caída de ceniza. Las simulaciones de caída de ceniza con ayuda de supercomputadoras permitieron que Costa Rica tuviera una versión operativa de FALL3D, además de poder estar más cerca de establecer un monitoreo y pronóstico de caída de ceniza en tiempo casi real. De esta manera, se pudo analizar de manera más realista las posibles afectaciones que generaría. En el presente trabajo se hace un profundo uso de las diversas capas presentes en la atmósfera a la hora del evento eruptivo y de cómo afectan a la columna y la pluma de maneras diferentes según el tamaño del clasto. Desde el punto de vista del análisis de peligro, se analizó por primera vez el efecto que la costa tiene en el transporte de los clastos eyectados por una eventual erupción del Rincón de la Vieja, incorporando la climatología costera desde un muy nuevo ángulo. También se ha incorporado una nueva manera de analizar el proceso eruptivo

basado en el modelo fractal, que permite evidenciar el efecto que cada uno de los procesos de transporte aportan al depósito de caída, permitiendo por primera vez al investigador hacer una tomografía de una capa estratigráfica. La única llamada de atención que Kempter et al. (1996) hacen sobre capas atmosféricas con características diversas que afectan el transporte de la pluma, es cuando sugieren un mecanismo que genere el segundo máximo. En el análisis realizado en el presente informe, el segundo máximo aparece de manera natural, aunque a una distancia mayor de la fuente, sugiriendo la necesidad de revisar los parámetros de entrada.

En relación con el peligro de caída de ceniza, este presenta una menor frecuencia de afectación sobre las comunidades del flanco N, sin embargo, se deben tomar medidas de prevención principalmente en el sector ganadero y agrícola para reducir los efectos como los presentados durante la erupción del 28 de junio del 2021, donde se destruyeron cultivos de tomate y chayote. Puesto que la caída de material volcánico (cenizas y lapilli) la afectación por la dirección predominante del viento es casi siempre hacia el lado nórdico y occidental, por lo que en este caso el PGB se encuentra en el área de amenaza moderada a baja de caída de ceniza. Pero como evidencian los resultados acá presentados, la dispersión de piroclastos puede presentar un patrón de caída compuesto de varios lóbulos, con ancho constante, pero eje principal en varias direcciones. Por ello, aunque la probabilidad de que esto ocurra en la vida del proyecto Borinquen es muy baja, no es nula. Los otros peligros volcánicos tienen una probabilidad muy baja de que ocurran en la vida útil de ambas plantas, sin embargo, sí fueron contemplados.

Referente a los lahares, a partir del análisis realizado y ante un evento importante, es posible afirmar que, en caso de que descendan por los cauces de los ríos Pénjamo o Azul, y considerando los acontecimientos pasados, existe la posibilidad que los puentes sean destruidos o dañados. El riesgo se debe en primer lugar, a que las estructuras se asientan sobre los cimientos de los puentes preexistentes, por lo que su emplazamiento no cambió y ante un evento similar al ocurrido en mayo de 1991, podrían dejar parcialmente incomunicadas a una o varias comunidades.

Ante un escenario de afectación por lahares, en la comunidad de Dos Ríos, la mayor parte de edificaciones, incluyendo ambos centros educativos, podrían verse afectados, ya que se encuentran dentro de la zona que podría ser inundada por lahares de gran volumen. No obstante, si bien existe la posibilidad de que lahares de gran volumen afecten esta zona, esta es baja. Podría eventualmente ocurrir en caso de que se dé: i) un periodo eruptivo con caída de ceniza constante hacia el oeste del cráter activo acompañado de precipitaciones sostenidas, ii) un colapso de la pared norte del cráter activo y iii) un evento pliniano.

En el asentamiento Gavilán, gran parte de las edificaciones, incluyendo la escuela primaria y el salón comunal, se encuentran dentro de la zona que podría ser afectada por lahares. Para la comunidad de Buenos Aires, la principal amenaza a corto plazo es el aislamiento parcial por interrupción de la vía terrestre, como sucedió durante 1991, aunque hoy día existe salida hacia Colonia Blanca.

Donde hoy día se encuentran las instalaciones de producción de energía geotermoeléctrica Pailas I y II se encuentra en un sector donde no hay depósitos volcánicos

recientes, ni lahares, aunado a que los ríos están lejos, por lo que la probabilidad de una afectación volcánica es muy baja a casi nula, con excepción de un megadeslizamiento.

En el sector donde se va a instalar la central geotérmica Borinquen para el 2027, se encuentra en un punto elevado, distante 9.5 km al W del cráter activo del Rincón de la Vieja, lo que ayuda o le protege, en cierta medida a las futuras instalaciones en caso de un evento explosivo fuerte y extraordinario que genere oleadas piroclásticas, pero no así para un pliniano de caída, aunque su probabilidad es igualmente baja. En el caso poco probable de un evento máximo, en el PGB la afectación sería mínima, principalmente enfocada a la tubería al sur del proyecto y en algunas plazoletas de producción, esto si el río Pacayal se viera impactado. En el caso de la quebrada Gata, la cual atraviesa en medio del proyecto, la principal afectación sería la tubería. Referente a la quebrada ubicada al N del proyecto (quebrada Sin Nombre), podría generar algún daño, ya que se proyecta que, en un evento, máximo podría afectar infraestructura, como es la casa de máquinas, subestación eléctrica, tubería y plazoletas de producción. Esta información resulta importante porque, a pesar de que históricamente en el lado sur no ha habido mayor afectación por lahares, no se puede decir que no podría pasar en algún momento y esto debe ser contemplado en los planes de emergencias. La probabilidad de que esto suceda es muy baja a baja para lo que resta del presente siglo, pero no nula.

Otros procesos eruptivos, como la formación de calderas (de colapso sectorial $> 0.1 \text{ km}^3$ o con ignimbritas asociadas con volúmenes $> 1 \text{ km}^3$) poseen una baja probabilidad en el corto plazo, si bien nunca es nula, por lo que correspondería con un riesgo emergente, es decir, un evento de probabilidad extremadamente baja, pero con la capacidad de un alto impacto social si llegase a ocurrir. Este tipo de amenazas volcánicas, tal como se dijo, no se contemplaron en los mapas de peligro por ser procesos eventuales y a largo plazo. Además, no se observan signos evidentes de una gran inestabilidad en el flanco S, como para generar un megadeslizamiento (también llamados deslizamientos gigantes) del tipo avalancha de escombros volcánica (*volcanic debris avalanche*). Eso sí, se pueden producir deslizamientos de menor volumen en el sector de Prusia y hacia el Caribe, tal y como se han verificado en los últimos siglos.

En general, en el presente informe se cumple la primera de las cuatro prioridades del Marco de Acción de Sendai, donde el riesgo de desastres se percibe basado en una comprensión adecuada de los peligros volcánicos, dimensiones de la vulnerabilidad, capacidad, grado de exposición de las personas y bienes, para la elaboración de las medidas apropiadas y en tiempo de pasividad eruptiva.

Cuadro 10.1: Síntesis del grado de importancia relativa de la peligrosidad a corto plazo (fuera de los límites del PN Rincón de la Vieja).

Peligro	Frecuencia relevante en corto plazo	Sector afectado en forma severa	Daño en agricultura y ganadería	Daño en infraestructura	Efectos en personas	Grado de importancia relativa
Gases volcánicos	Es probable, aunque temporal y de limitada extensión	W y SW	Posible pero limitados	Posible pero limitados	Posible, pero temporal	Al parecer bajo
Coladas de lava	Poco probable	N	Alto si llegase a ocurrir	Alto si llegase a ocurrir	Muy bajo si se toman las medidas	Muy bajo
Flujos piroclástico (CDPd)	Frecuente cada año o lustro	N	Posible	Factible si llegaran a salir de los límites del parque	Factible si llegaran a salir de los límites del parque	Moderado
Caída de cenizas	Frecuente cada año o lustro	N, W y SW	Factible	Moderado a bajo	Bajo	Moderado a bajo
Balística	Frecuente cada año o lustro	Dentro del parque	Ninguno	Bajo	Poco probable a más de 5 km	Bajo
Terremotos tectónicos	Baja y de poca magnitud	Área mesosísmica o epicentral	Muy bajo a nulo	Muy bajo a nulo	Factible si caen fuera de los límites del parque	Bajo
Deformación	Baja	Baja	Ninguno	Poco probable fuera del parque	Nulo	Bajo por ser poco probable
Formación de nuevos focos	Muy baja	Muy poco probable fuera de la cima	Posible	Menor	Moderado	Bajo por ser poco probable
Lluvia ácida	Es probable	N, W y SW	No hay reportes	Bajo	Bajo	Bajo
Deslizamiento	Algunos cada lustro	S y N	0	0	0	Bajo
Avalanchas	0	N y S	0	Factible si llegase a ocurrir	Factible si llegase a ocurrir	Bajo
Lahares	Varios al año	N	Bajo	Bajo a moderado	Bajo a moderado	Alto

11. RECOMENDACIONES

Una gestión integral de riesgos, articulada con la política de las dos provincias y acorde con las condiciones socioeconómicas que correspondan a cada sector o cantón, aportará a minimizar las consecuencias de una próxima erupción, en particular en los elementos fundamentales de la prevención, la mitigación y acciones concretas de respuesta.

De acuerdo con el registro de los últimos 30 años de afectación por peligros volcánicos en las comunidades de estudio. El modelado de los lahares se tomó del mapa preliminar de peligros volcánicos elaborado por Alpízar (2018), modificado por Aguilar y Alvarado (2020), el cual es de tipo cualitativo integrado, basado tanto en el registro geológico, como en modelación determinística e información de peligros preexistente. El mayor peligro en vidas humanas está centrado en el flanco N, donde los fuertes aguaceros o temporales pueden disparar no solo deslizamientos, sino también lahares, cuyos umbrales de lluvia no están del todo bien establecidos, ni mucho menos para la región en general. Por ello, un aspecto que hace falta es el establecer un Sistema de Alerta Temprana (SAT), tal y como es conocido en la gerga latinoamericana, en particular para el flanco caribeño con respecto a los lahares y eventualmente flujos piroclásticos que excedan los 2-3 km de radio de acción. Uno de los problemas es la señal del celular, para poder instalar equipos que den una alerta con cierta antelación.

A lo largo del informe se recalca, reiteradamente, la prohibición de no construir dentro del cauce de dominio público (álveo), respetando las áreas protección establecidas para manantiales, quebradas y ríos de acuerdo con la legislación establecida (ley forestal y ley de aguas) o la zonificación del ASP (Área Silvestre Protegida). Las zonas aledañas a los cauces que nacen en la cima del volcán deben ser de restricción absoluta, amparado en la definición de área de protección según el artículo 33 de la ley Forestal N.º 7575, la cual establece como dominio del estado 15 m desde ambos márgenes en zona rural o 50 m si el terreno es quebrado con una inclinación mayor a 45°. Además, estos cauces poseen el potencial de descenso de flujos torrenciales de escombros rocosos, arcillas y troncos (lahares), cuando se dan lluvias extraordinarias en la cima que erosionan los depósitos de ceniza.

Debido a que una parte del área de estudio se encuentra habitada, y considerando el hecho de que los pobladores han desarrollado su estilo de vida y medios de subsistencia en la zona, se considera que, más allá de simplemente restringir las actividades a los locales, se debe fomentar un modelo de convivencia con el volcán, enfocado en la prevención, y con la coordinación de los gobiernos locales, teniendo en consideración que es más probable que los habitantes se adapten, a que abandonen sus terrenos y actividades de subsistencia.

En cuanto a percepción del riesgo, la mayoría de la población estudiantil analizada tiene una clara conciencia del peligro volcánico al que está expuesta la zona. Esto resalta la necesidad de reforzar el conocimiento sobre los peligros potenciales que podrían afectar a las comunidades y las acciones de preparación y respuesta que pueden llevarse a cabo tanto en la escuela como en el entorno familiar. Esto resalta cuando se observa que, entre los resultados más importantes del análisis de percepción del riesgo en adultos, destaca como el 82 % de los entrevistados señaló a la familia como motivación total o parcial para vivir en la

zona de estudio, mientras que solo el 11 % indicó que el trabajo es su única justificación para vivir en el área. Los habitantes son conscientes de la relación que existe entre la actividad del volcán, en ocasiones las precipitaciones y los lahares, principal peligro volcánico en la zona. Al saber esto, es factible suponer que la población, al ser consciente de las características de su entorno, no es indiferente a la necesidad de saber cómo reaccionar ante la actividad eruptiva. Esta afirmación se sustenta también en el hecho de que el 82 % de los adultos y el 66 % de los niños afirmaron saber cómo actuar ante una erupción. Esto más allá de que lo que saben sea correcto, indica preocupación por el tema. Por ello, es igualmente importante inculcar en los niños el sentido de la convivencia con el volcán y contribuir a que sean conscientes de los beneficios de vivir en una zona volcánica. Esto podría incluso evitar que, en el futuro, esta generación abandone el área motivada por el temor a la actividad volcánica.

Adicionalmente, se debe de implementar una capacitación regular de los guías turísticos locales ya que algunos de estos introducen a los turistas en zonas de peligro (incluyendo algunas cascadas); incluso se hacen viajes hasta el cráter activo del volcán. Está claro que esta actividad es una importante fuente de ingresos; sin embargo, la práctica causa preocupación debido al peligro inmediato al que los lugareños y turistas están expuestos, ya que incluso pequeñas erupciones freáticas son capaces de arrojar bloques a varios cientos de metros de distancia, y en el caso de Rincón de la Vieja, los productos eruptivos se depositan principalmente en el sector norte del cráter, que es por donde las personas acceden al borde del cráter activo. En este sentido, es necesario cambiar la percepción que los niños tienen sobre la práctica de acceder al cráter activo, ya que lo perciben como algo cotidiano y seguro, cuando en realidad no lo es.

La población local percibe a las erupciones volcánicas como algo de su cotidianidad, lo que puede aumentar su vulnerabilidad (y por consiguiente el riesgo) ante un escenario mayor de afectación por lahares o caída de ceniza. Por ello, se debe de dar a conocer los actuales mapas de peligros volcánicos, asimismo, se desconocen los sitios de reunión seguro o posibles albergues habilitados, entre otros. Además, es necesario crear estrategias de preparación e informativas a la población local sobre el riesgo y los beneficios de vivir en comunidades con influencia volcánica, para el aprovechamiento de los recursos, a través de agroturismo.

La investigación obtuvo que la zona de El Gavilán-Buenos Aires y el asentamiento Agroindustrial Sur presentan la aglomeración del sistema turístico a través de centros turísticos, por lo que, ante un escenario de afectación por lahares, se debe tener acondicionado uno de estos para utilizarse como albergue para el turista extranjero y nacional, ya que no hay equipamiento social. En la zona de Dos Ríos se puede utilizar su salón comunal como albergue para la población localiza en la zona de Manzanares, Argelia y El Gavilán, mientras la zona de Buenos Aires se recomienda evacuar hacia la comunidad de Aguas Claras. Por ello, se recomienda habilitar y dar mantenimiento a todas las posibles vías de evacuación existentes en la zona, particularmente la ruta que comunica Buenos Aires con la Colonia Libertad, ya que podría ser una alternativa para los pobladores de Buenos Aires en caso de que el puente sea destruido por un lahar. Dentro de ello resulta necesario que la municipalidad de Upala brinde mantenimiento constante en la red vial, ya que son de lastres y en estación lluviosa presentan mal estado, sobre todo la ruta de evacuación de evacuación que comunica a la comunidad de Buenos Aires con Aguas Claras.

Llama la atención, que en la zona se asocie la ocurrencia de lahares con la amenaza inminente de otros tipos de peligros (no geológicos), por ejemplo, resulta común que enjambres de avispas o abejas sean molestadas por el ruido de los flujos, lo que en muchas ocasiones causa que se desplacen, pudiendo afectar a quienes permanezcan en exteriores.

Los habitantes del sector N del volcán expresaron una gran preocupación ante la posibilidad de colapso de la pared N del cráter activo; sin embargo, aunque el colapso de flancos es un evento relativamente normal en los estratovolcanes, no existen estudios que confirmen o nieguen esta posibilidad a corto o mediano plazo.

En último lugar, como parte de las recomendaciones sobre realizar investigaciones de tipo explicativas bajo la temática de riesgo y planificación territorial en las comunidades del distrito de Dos Ríos y Aguas Claras, es necesario tener en cuenta que las comunidades presentan altos regímenes de precipitación. Se debe tener en consideración para recolección de datos de campo, como entrevista, encuestas o toma de datos geológicos en el cauce de los ríos. Además, es necesario realizar investigaciones sobre la vulnerabilidad de los sectores económicos para generar instrumentos que fortalezcan la generación de estrategias para la resiliencia de la población local.

Los principales temas que se deben reforzar en la población son los siguientes:

1. ¿Por qué hacen erupción los volcanes?
2. El volcán Rincón de la Vieja y su actividad;
3. Los beneficios de vivir cerca de un volcán;
4. ¿Qué hacer antes, durante y después de una erupción? y;
5. ¿Cuáles son las áreas seguras en caso de erupción?

Para apoyar a la comunidad en este sentido, se pondrá a su disposición, presentando a las comunidades, y explicándoles correctamente el material complementario descrito en el capítulo 6, entre otros.

Un modelo de “convivencia con el volcán”, puede ser exitoso, siempre y cuando se cumpla al menos con los siguientes requisitos:

1. Comunicación fluida entre las autoridades de emergencias (CCE, CME y CNE), científicos y líderes comunales.
2. Un sistema de monitoreo volcánico y transmisión de información eficiente y oportuno.
3. Participación responsable de los ciudadanos.
4. Capacitación adecuada y oportuna a los pobladores y guías turísticos sobre peligros volcánicos, prevención y respuesta ante emergencias por actividad eruptiva.

Teniendo en cuenta que una sección importante de la zona de estudio ha sido catalogada como de alto o moderado peligro, sí es recomendable evitar la expansión de los poblados por medio de construcción de urbanizaciones y el desarrollo de complejos hoteleros de gran tamaño. Asimismo, se recomienda habilitar y dar mantenimiento a todas las posibles vías de evacuación en la zona, particularmente la ruta que comunica Buenos Aires con la Colonia Libertad, ya que podría ser una alternativa para los pobladores de Buenos Aires en caso de que el puente sea destruido por un lahar.

Para emitir recomendaciones sobre el uso del territorio en el área de estudio, y facilitar a la población la lectura del mapa de peligros, se han establecido tres áreas funcionales a partir del mapa preliminar de peligros. Las áreas definidas fueron clasificadas como: muy alto peligro (A1), alto peligro (A2) y moderado - bajo peligro (A3). Al igual que se señaló para los mapas de peligros, las zonas delimitadas como A1, A2 y A3, no establecen límites definitivos y en el caso de que un lugar de interés se encuentre dentro de una de estas zonas, o cerca de sus límites, se recomienda elaborar un estudio de amenazas localizado.

A1 incluye la zona de peligro proximal, parte del área afectada constantemente por gases y lluvia ácida en la cima y el radio de 2 km alrededor del cráter activo. Esta zona se ubica dentro del parque nacional Rincón de la Vieja, y dentro de ella se recomienda restringir todo tipo de actividad humana, permitiendo únicamente el acceso a personal de investigación en condiciones controladas.

A2 contempla un radio de 5 km alrededor del cráter activo, parte de las zonas expuestas a los efectos de cenizas, gases y lluvia ácida y los cauces de los ríos Pénjamo y Azul, que son los más propensos a ser afectados por lahares. En esta área es recomendable limitar las actividades humanas que demanden permanecer por periodos superiores a ocho horas, pero se puede aprovechar el potencial turístico siempre que se implementen las medidas de seguridad necesarias y se respeten las directrices del SINAC, en aquellos sectores donde A2 se traslapa con el área del parque nacional. Se recomienda no permanecer en o cerca de los cauces fluviales en periodos lluviosos, cuando la cima del volcán está nublada o durante la noche.

A3 puede permitirse cualquier tipo de actividad a los pobladores, pero se recomienda rotular el área como zona de influencia volcánica y tener presente que, en caso de erupción, podría ser necesario tomar las medidas de seguridad que el caso demande. No se recomienda que en esta área se inicie la construcción de nuevos asentamientos o complejos habitacionales. Tampoco es recomendable desarrollar actividades de agricultura ni ganadería a gran escala. El área de moderado-bajo peligro, llamada A3, incluye las posibles zonas de inundación por lahares de gran volumen, áreas afectadas por gases y lluvia ácida y zonas donde podría entre 10 cm y 30 cm de caída de ceniza.

A nivel local, para las comunidades más cercanas al volcán, y todas aquellas que de alguna forma se puedan ver afectadas por su actividad, o beneficiadas por el mismo, es importante fomentar un modelo de convivencia con el volcán con enfoque preventivo en coordinación con los gobiernos locales y comités de emergencias.

Se elaboró un mapa de cobertura y usos del suelo para las comunidades localizadas en el flanco norte, donde se demuestra que el sector turístico sería el más afectado por lahares, específicamente por que los centros turísticos se localizan en las zonas de con alta exposición.

Por lo anterior, tanto a nivel central como local, se debe tomar en cuenta algunas recomendaciones como:

- Establecer mecanismos de evacuación y rutas durante una erupción volcánica o lahares disparados por terremotos o actividad eruptiva, para poner a salvo el personal del PN Rincón de la Vieja, ICE, entre otros, además de los visitantes y las familias que viven en sus flancos. Realizar simulacros cada cierto tiempo (por lo menos cada dos años).
- Revisar los protocolos de seguridad dentro del PN Rincón de la Vieja, realizar simulacros internos y una mejor capacitación de los guardaparques.
- Poseer una estrategia integrada de salud, donde se identifiquen los problemas de salud, los escenarios (incluyendo su efecto en las personas) y las necesidades, así como planificar la respuesta administrativa y la división de los planes en unidades autosuficientes (https://cso.go.cr/documentos_relevantes/manuales_guias/guia_ceniza_volcanica.pdf). Además, formular un plan hospitalario y de contingencia para eventuales emergencias. El personal expuesto a los gases por períodos prolongados de tiempo debería rotar, aunque se debe de consultar a los especialistas en medicina antes de tomar decisiones en este sentido.
- Se deben de colocar rótulos con las rutas de evacuación.
- Recomendar a los tomadores de decisiones y personal del SINAC y Municipalidad leer, con particular cuidado, el apartado de discusión y conclusiones con sus recomendaciones.
- Establecer un museo que sirva de medio educativo acerca de los geopeligros, el vulcanismo y la biodiversidad de la zona.
- Incluir y fortalecer más la gestión comunitaria del riesgo, de forma que se involucre a la comunidad más allá de los comités de emergencia, lo cual es vital para que cualquier esfuerzo futuro y sus frutos.
- Se recomienda tener una provisión adecuada en el país de mascarillas faciales (tapabocas o cubrebocas) diseñadas para filtrar las partículas finas y neutralizar los gases ácidos y, no tanto, las mascarillas quirúrgicas, porque son mucho más delgadas y no cuentan con material filtrante eficiente (Fig. 10.1). Se debe de tener presente que cualquier persona que inhale las partículas de ceniza finas (principalmente el mineral fibroso cristobalita) con un tamaño inferior a diez micras o micrómetros (\leq PM10) y particularmente de menos de cuatro micrómetros, pueden entrar en los pulmones y si se da por un tiempo prolongado, pueden desarrollar neumoconiosis o contraer posteriormente un cáncer de

pulmón. Las mascarillas faciales (cubrebocas o tapabocas) que recomiendan los especialistas en salud para este tipo de eventos volcánicos son, por ejemplo, la N95 (México NOM-116-STPS-2009), FFP2 (Europa EN 149-2001), KN95 (China GB2626-2006), P2 (Australia/Nueva Zelanda AS/NZA 1716:2012), Korea 1a clase (Korea KMOEL - 2017-64) y DS (Japón JMHLW-Notificación 214, 2018). Estos utensilios deberían de estar disponibles en el mercado (farmacias y ferreterías), en ciudades y poblados ubicados cerca de volcanes activos, particularmente en las casas, trabajo, centros educativos y alberges.

- Utilizar sombreros, camisas de manga larga y anteojos con protección lateral (tipo industrial) para proteger los ojos. Contar con una buena provisión en las farmacias y ferreterías, así como en las compañías y casas, en particular para los poblados cercanos al volcán; se debe tener particularmente presente para los centros educativos y los alberges de ancianos.
- Dedicar un día o algunas clases de ciencias, dentro de la educación de escuelas, liceos y colegios en las cercanías del volcán, a comentar sobre los peligros de origen natural y antrópico, incluyendo la actividad del volcán Rincón de la Vieja y sus eventuales peligros. El tema ya existe como eje transversal en los programas educativos, por lo que se recomienda abarcarlo activamente.

Referente a los análisis de caída de ceniza con modelos computacionales, resulta conveniente tener las siguientes consideraciones:

a) Los análisis basados en promedio mensuales (caso de la dirección predominante de los vientos) deben tomarse como lo que son, es decir, aproximaciones basadas en generalizaciones. Por ello, patrones de caída que evidencien que la dirección puede variar incluso en periodos de muy pocas horas (de 11 a. m. a 3 p. m.) permitirá desplegar personal y equipo de una manera más efectiva, reduciendo la posibilidad de concentrarlos en un área que se vería afectada quizá solo por 1 hora.

b) Los modelos de simulación en 1D y 2D, como se advirtió líneas arriba no incluyen, entre otros, los cortantes horizontales y, en algunos casos, dejan completamente por fuera el tensor de difusividad turbulenta que afecta el transporte de la pluma por el viento, por lo que sus resultados deben tomarse con precaución pues, como ya vimos, esas generalizaciones dan como resultado plumas que progresivamente se adentra en el mar, cuando en realidad la pluma puede llegar a moverse paralelamente a la costa. Por ello, se recomienda el uso de modelos de simulación en 1D y 2D con fines académicos o de entrenamiento de personal, o para emergencias inmediatas, siempre y cuando como parte del ejercicio, se incluya una seria crítica de las aproximaciones y carencias del modelo.



Fig. 10.1: Dentro de las recomendaciones para protegerse de cenizas y aerosoles volcánicos, aparte de utilizar sombrero y manga larga, es la de utilizar anteojos con protección lateral y mascarillas faciales (cubrebocas o tapabocas) que recomiendan los especialistas en salud para este tipo de eventos volcánicos, tales como la N95 (México NOM-116-STPS-2009), FFP2 (Europa EN 149-2001), KN95 (China GB2626-2006), P2 (Australia/Nueva Zelanda AS/NZA 1716:2012), Korea 1a clase (Korea KMOEL - 2017-64) y DS (Japón JMHLW-Notificación 214, 2018). Estos utensilios deberían de estar disponibles en el mercado (farmacias y ferreterías), en ciudades y poblados ubicados cerca de volcanes activos, particularmente en las casas, trabajo, centros educativos y alberges.

12. AGRADECIMIENTOS

A la Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo, Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), por las facilidades logística y de información digital aportada para la realización de la presente investigación.

El proyecto Fundación Ayuda en Acción en Costa Rica, Upala, Alajuela, colaboró con el soporte logístico de alimentación y hospedaje de los estudiantes que realizaron la práctica Geológica en el 2021, procedentes de la Escuela Centroamericana de Geología. Sus resultados fueron justamente el mapeo geológico del flanco caribeño del Rincón de la Vieja y la geomorfología del volcán.

También, dicho proyecto colaboró con el soporte parcial de otro estudiante de geografía de la Universidad Nacional, quien realizó un estudio de vulnerabilidad volcánica del sector norte o caribeño del Rincón de la Vieja, procedente de la Escuela de Ciencias Geográficas (Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, UNA).

En primera instancia, se agradece al personal del SINAC, particularmente a los funcionarios del parque nacional Rincón de la Vieja por toda su colaboración a lo largo de los años y por su apoyo en las visitas al campo.

El ICE hace varios años, y la CNE por el igual, aportaron la logística y personal para la realización del trabajo de campo y la vigilancia volcánica. Al OVSICORI y la RSN por todos estos años de investigación, información y análisis detallado de la actividad eruptiva histórica reciente.

Johan Valerio Pérez, Randall Rojas, Leonardo Solís, Bermúdez y Jéssica Arias Hernández, del Centro de Servicio Recursos Geotérmicos del ICE, aportaron información valiosa sobre los campos geotérmicos, la gestión del riesgo y simulacros ante eventual actividad volcánica en las centrales de generación eléctrica Pailas I y II, así como el estado constructivo de la nueva planta geotérmica Borinquen.

El Geól. Alexis Cerdas (Grupo Geociencias, Proceso de Ingeniería, Dirección de Ingeniería y Construcción, ICE) revisó el presente informe.

El borrador de este documento fue entregado a varios profesionales de la RSN (UCR-ICE), del OVSICORI-UNA, LAQAT-UNA y del SINAC para su revisión y ulterior distribución. A todos ellos que contribuyeron con su revisión, muchas gracias.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abarca, T. y Alvarado, G. E. (2017). Pérdidas económicas en valor al año 2016 causadas por el vulcanismo en Costa Rica entre 1953 y 2016. *Rev. Geol. Amér. Central*, 56, 37-50.

Abarca, K., Sánchez, M. y Alvarado, G. E. (2021). Geomorfología del volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica. En: Mora, M. y Soto, G. J. (eds.). *5to. Congreso Geológico UCR-2021 Programa y Resúmenes*, noviembre 2021, San José, p. 20.

Adamson, M. y Castillo, F. (2012). Conclusiones. En Adamson, M. y Castillo, F. (eds.). *Desastres. Costa Rica en el tercer milenio: Desafíos y propuestas para la reducción de vulnerabilidad*. Contrastes Vivos de Costa Rica, pp. 430-443.

Aguilar, I. y Alvarado, G. E. (2014). Pérdidas humanas y económicas causadas por el vulcanismo en Costa Rica entre 1953 y 2005. *Rev. Geol. Amér. Central*, 51, 93-128.

Aiuppa, A., Robidoux, P., Tamburello, G., Conde, V., Galle, B., Avard, G., Bagnato, E., de Moor, J. M., Martínez, M. y Muñoz, A. (2014). Gas measurements from the Costa Rica-Nicaragua volcanic segment suggest possible along-arc variations in volcanic gas chemistry. *Earth and Planetary Sci. Letters*, 407, 134-147.

Aguilar, I. L. y Alvarado, G. E. (2020). Las erupciones relevantes del Rincón de la Vieja en los últimos 6000 años basado en tefrocronostratigrafía sobre su flanco SW. *Rev. Geol. Amér. Central*, 63, 1-19.

Aguilar, I., Taylor, W. y Madrigal, L. (2020). Actividad sísmica y volcánica en los alrededores de los proyectos geotérmicos Borinquen y Pailas desde el 21 de noviembre del 2019 al 21 marzo del 2020. Informe interno.

Aguirre, J. A. (2008). Midiendo el impacto económico del gasto turístico de los visitantes a los parques nacionales de Costa Rica. *PASOS, Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 6(1), 11-26.

Alaska Satellite Facility DAAC. (2015). ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res; Includes Material © JAXA/METI 2007. Descargado el 11 de agosto de 2017. DOI: 10.5067/JBYK3J6HFSVF

Alatorre-Ibargüengoitia, M. A., Delgado-Granados, H. y Farraz-Montes, I. A. (2006), Hazard zoning for ballistic impact during volcanic explosions at Volcán de Fuego de Colima (Mexico), *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 402, 26-39.

Alpízar, 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, Programa de postgrado en Geología, Universidad de Costa Rica].

Alpizar, Y., Fernández, M., Ramírez, C. y Arroyo, D. (2019). Hazard Map of Rincón de la Vieja Volcano, Costa Rica: Qualitative Integration of Computer Simulations and Geological Data. *Anuário do Instituto de Geociências UFRJ*, 42-3, 474-488.

Alpizar, Y., Mora-Amador, R., González, G., Ramírez, C., Mora, M., y Taylor, W. (2014). Resumen del estado de los volcanes activos de Costa Rica durante el periodo 2012-2013. *Rev. Geol. Amér. Central*, 51. doi: <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v51i1.16910>

Alpizar, Y., González-Ilama, G., Mora, M., Mora-Amador, R., y Ramírez, C. (2014b). Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica, octubre 2014. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Volcanes/Informe_volcanes_octubre_2014.pdf

Alpizar, Y., Fernández, M., Ramírez, C. y Arroyo, D. (2019). Hazard map of Rincón de la Vieja Volcano, Costa Rica: qualitative integration of computer simulations and geological data. *Anuario do Instituto de Geociências-UFRJ*, 42, pp 474-488. ISSN 0101-9759

Alvarado, G. E. (1984). *Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas de Cenozoico Superior de Costa Rica* (Tesis de Licenciatura). Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.

Alvarado, G. E. (1989). *Los volcanes de Costa Rica*. San José: EUNED.

Alvarado, G. E. (1990). *Los relieves de las rocas ígneas: Génesis, clasificación y aplicabilidad*. Cartago, Costa Rica: ETCR.

Alvarado, G. E. (2000). *Los volcanes de Costa Rica: su geología, historia y riqueza natural* [2.ª ed.]. San José, Costa Rica: EUNED.

Alvarado, L.F. y Fernández, W. (2001). Relación de las anomalías climáticas de la atmósfera libre sobre Costa Rica y la variabilidad de las precipitaciones durante eventos de El Niño. *Top. Meteor. Oceanog.*, 8, 145-157.

Alvarado, G. E. (2003). *Diagnóstico de la estabilidad del cono y comportamiento de la fundación debido al crecimiento del edificio volcánico del Arenal (Costa Rica)* (Tesis de Maestría con énfasis en Geotecnia e Hidrogeología). Univ. 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, Costa Rica: EUNED.

Alvarado, G. E. (2011). *Los volcanes de Costa Rica: Geología, historia, riqueza natural y su gente*. San José, Costa Rica: EUNED (Editorial Universidad Estatal a Distancia).

Alvarado, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. EUCR, EUNA, ETCR.

Alvarado, G. y Morales, L.D., (1989). Historia de la Vulcanología en Costa Rica. En: Ruiz, A. y Camacho, L. (eds.): *Historia de la Ciencia y la Tecnología. El avance de una disciplina*. Ed. Tecnológica de Costa Rica, pp. 291-314; Cartago.

Alvarado, G. E. y Schmincke, H.-U. (1994). Stratigraphic and sedimentological aspects of the rain triggered lahars of the 1963-1965 Irazú eruption, Costa Rica. *Zbl. Geol. Paläont. Teil, 1*(H. 1/2), 513-530.

Alvarado, G. E. y Gans, P. B. (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. *Rev. Geol. Amér. Central*, 46, 7-122.

Alvarado, G.E. y Denyer, P. (2019). Estratigrafía volcánica del Neógeno y Cuaternario. En: Denyer, P. (ed.): *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica: historia, evolución y cartografía*. *EUCR-CICG*, 101-238.

Alvarado, G. E., Barquero, R., Boschini, I., Chiesa, S. y Carr, M. J. (1986). Relación entre la Neotectónica y el Vulcanismo en Costa Rica. *Rev. CIAF*, 11(1-3), 246-264.

Alvarado, G. E. Fernández, M. Barquero, R., Flores, H. y Soto G.J. (1992). Aborted Eruptions Triggered by Earthquakes? Costa Rica (abstract). *Eos Trans. AGU*, 73 (14), Spring Meeting Suppl., p. 194.

Alvarado, G., Acevedo, A.P., Monsalve, M.L., Espíndola, J.M., Gómez, D., Hall, M., Naranjo, J.A., Pulgarín, B., Raigosa, J., Sigarán, C. y Van der Laat, R. (1999). El Desarrollo de la Vulcanología en Latinoamérica en el Último Cuarto de Siglo XX. *Rev. Geofísica*, 51, 185-241; México.

Alvarado, G. E., Vega, E., Chaves, J. y Vázquez, M. (2004). Los grandes deslizamientos (volcánicos y no volcánicos) de tipo *debris avalanche* en Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 30, 83-99.

Alvarado, G. E., Soto, G. J., Pullinger, C. R., Escobar, R., Bonis, S., Escobar, D. y Navarro, M. (2007). Volcanic activity, hazards, and monitoring. En Bundschuh J. y Alvarado, G. E. (eds.): *Central America: Geology, Resources and Hazards*. Taylor & Francis, Londres/London. 2, 1155-1188.

Alvarado, G. E., Vargas, A., Campos, N. y Chaves, I. (2014). *El riesgo derivado de la amenaza volcánica en Costa Rica*. San José: Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Red Sismológica Nacional. San José: Extensión S. A.

Alvarado, G. E., Brenes-André, J., Barrantes, M., Vega, E., de Moor, J. M., Avard, G., Dellino, P., Mele, D., DeVitre, C., Di Piazza, A., Rizzo, A. L. y Carapezza, M. L. (2016a). Actividad explosiva del Turrialba (Costa Rica) en 2010- 2016. *Rev. Geol. Amér. Central*, 55, 7-60.

Alvarado, G. E., Mele, D., Dellino, P., de Moor, J. M., Avard, G. (2016b). Are the ashes from the latest eruptions (2010-2016) at Turrialba volcano (Costa Rica) related to phreatic or phreatomagmatic events? *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 327, 407-415

Alvarado, G.E., Fallas, B., Vargas V., A., Vega, E., Bakkar, H. y Barrantes, G. (2017). Los lahares del Volcán Miravalles disparados por el huracán Otto (24 de noviembre del 2016), Costa Rica: Meteorología, sedimentología, periodos de recurrencia, alerta temprana y recomendaciones. Instituto Costarricense de Electricidad [Inf. Interno].

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. Área de Amenazas y Auscultación Sismológica y Volcánica, ICE [Inf. Interno].

Alvarado, G.E., Denyer, P., Aguilar, T., Chavarría, M. M. y Soto, G. (2019a). Mapa geológico de la hoja Cacao. Escala 1:50 000, Editorial UCR, San José.

Alvarado, G.E., Denyer, P., Montero, W., Chavarría, M.M. y Solano, P. (2019b). Mapa geológico de la hoja Curubandé. Escala 1:50 000, EUCR, San José.

Alvarado, G. E., Avard, G., Esquivel, L., Chaves, I., Mora, M., de Moor, M., Müller, C., Pacheco, J. y Sánchez, B. (2020). Clasificación de la amenaza por los volcanes de Costa Rica y la evaluación de la red de monitoreo 21 de enero del 2020. OVSICORI, CNE, RSN, San José [Inf. Interno].

Alvarado, G. E., Esquivel, L. y Sánchez, B. (2021). Mejoras en el paradigma del manejo de la gestión del riesgo en los parques nacionales volcánicos de Costa Rica, entre el año 2000 y el 2020. *Rev. Geol. Amér. Central*, 64, 1-15.

Alvarado, L. F. y Fernández, W. (2001). Climatología de la atmósfera libre sobre Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanog.* 8(2), 89-115.

Alvarado, X. (2006). Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del volcán Arenal, en la población de La Fortuna de San Carlos. *Rev. Costarricense de Salud Pública*, 15 (29), 25-34.

Álvarez, A. y Cadena, E. (2006). Índice de vulnerabilidad social en los países de la OCDE, Universidad Autónoma de Madrid, Working Paper 1.

Anderson, RS y Hallet, B. (1986). Sediment transport by wind. Toward a general model. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 97, pp.523-535

Andronico, D., Scollo, S., Caruso, S. y Cristaldi, A. (2008). The 2002-03 Etna explosive activity: Tephra dispersal and features of the deposits. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 113, B04209 doi:10.1029/2007jb005126

Armienti, M., Macedonio, G. y Pareschi, M. T. (1988). A numerical model for simulation of tephra transport and deposition: applications to May 18, 1980, Mount St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.* 93, 6463-6476.

Asamblea Legislativa de Costa Rica. (1974, 22 de abril). Ley N° 5398 del 22 de abril de 1974. Ley Nacional del Parque Nacional Rincón de la Vieja. Sistema Costarricense de Información Jurídica.

Araña, V. y Ortiz, R. (1984). *Volcanología*. Madrid: Consejo Sup. Invest. Cient. y Ed. Rueda.

Araña, V. y Ortiz, R. (1993). Riesgo volcánico. En Martí, J. y Araña, V.: *La Volcanología Actual*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp. 277-385.

Arce-Rodríguez, A., Puentes-Sánchez, F., Avendaño, R., Martínez-Cruz, M., de Moor, M., Pieper, D. H., Martínez-Cruz, M. de Moor, M. y Chavarría, M. (2019). Thermoplasmatales and sulfur-oxidizing bacteria dominate the microbial community at the surface water of a CO₂-rich hydrothermal spring located in Tenorio Volcano National Park, Costa Rica. *Extremophiles* (<https://doi.org/10.1007/s00792-018-01072-6>).

Arguedas, C. (10 de abril de 2016). Nivel del lago del volcán Rincón de la Vieja bajó tres metros. *La Nación*. Recuperado de http://www.nacion.com/sucesos/desastres/Nivel-lago-Rincon-Vieja-metros_0_1553844650.html

Arteaga, A y San Juan, G. (2012). Metodología para obtener un índice de vulnerabilidad social. el caso del municipio de La Plata. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16.

ASF DAAC (2015). ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res; Includes Material © JAXA/METI 2007. Descargado el 24 de febrero de 2021. doi: 10.5067/JBYK3J6HFSVF

ATS (2018). Volcanic Eruptions and Threats to Respiratory Health. *Am. J. Respir. Crit. Care. Med.*, 197, 21-22, American Thoracic Society (ATS), Patient Education Series.

Avard, G., Pacheco, J., Martínez, M., van der Laat, R., Menjivar, E., Hernández, E., Marino, T., Sáenz, W., Brenes, J. y Martínez, J. (2013). Estado de los Volcanes 2012 Resumen Anual Oficial. Inf. OVSICORI-UNA.

Auker, M. R., Sparks, R. S. J. y Siebert, L. (2013). A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *J. Applied Volcanology*, 2, 1-24.

Banta, R.M. y Cotton, W. R. (1982). An observational and numerical study of mountain boundary-layer flow. *Atmosphere Science Paper No. 350*, Colorado State University, 203 p.

Bakkar, H. (2017). *Estudios de los procesos sísmicos y volcánicos en el Rincón de la Vieja (Costa Rica)*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica.

Bakkar, H. y Aguilar, I. (2018). Actividad sísmica y volcánica en los alrededores de los proyectos geotérmicos Borinquen y Pailas desde el 15 de marzo al 15 julio del 2018. - Informe interno ICE, 7 págs.

Bakkar, H. y Taylor, W. (2016). Resumen preliminar de la actividad reciente en el Rincón de la Vieja de enero-marzo del 2016.

Bakkar, H., Mora, M. y Taylor, W. (2016). Resumen de la actividad sísmica y eruptiva, Volcán Rincón de la Vieja marzo del 2016. Red Sismológica Nacional (RSN (UCR-ICE), Universidad de Costa Rica. Informe interno.

Barahona, M., Bonilla, E., Cortés, R., Coto, L., Guzmán, G., Herrera, P., Hidalgo, P., Martens, U., Méndez, J., Pérez, J., Pérez, K., Reyes, K., Sjobhom, L., Vargas, C. y Zamora, N. (2001). Geología-Vulcanología del campo geotérmico Borinquen-Las Pailas. ICE-UCR. Informe de campaña geológica.

Barquero, J. y Segura, J. (1983). La actividad del volcán Rincón de la Vieja. *Boletín de Vulcanología*, UNA, Heredia, 6(13), 5-10.

Barquero, J. y Fernandez, E. (1987). Estado de los volcanes en Costa Rica. *Boletín de Vulcanología*, 18, 56.

Barquero, R., Montero, W. y Rojas, W. (1991). Actividad sísmica relacionada con el sismo de Cóbano. La Crisis Sísmica del Golfo de Nicoya y eventos sísmicos relacionados, Costa Rica, 1990. ICE, 4, 45-73 [Inf. Interno].

Barrantes, M. (2006). Geo-environmental aspects for the development of Las Pailas Geothermal field, Guanacaste, Costa Rica. The United Nations Univ., *Geothermal Training Programme*, 8, 121-151; Reykjavik.

Barrantes, S. O. y Sandoval, M. L. (2016). Uso/cobertura de la tierra en los cantones de Upala, Guatuso y Los Chiles en el año 2011. *Revista Geográfica de América Central*, 1(56),59-91. [fecha de Consulta 22 de agosto de 2021]. ISSN: 1011-484X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451746028003>

Battaglia, A., de Moor, J. M., Aiuppa, A., Avaró, G., Bakkar, H., Bitetto, M., Mora, M. M., Kelly, P., Giudice, G., Donne, D. D. y Villalobos, H. (2019). Insights Into the Mechanisms of Phreatic Eruptions From Continuous High Frequency Volcanic Gas Monitoring: Rincón de la Vieja, Costa Rica. *Frontiers in Earth Sci.* doi: 10.3389/feart.2018.00247

Bean, C. J., De Barros, L., Lokmer, I., Métaixian, J.-P., O'Brien, G. S., Murphy, S. (2013). Long-period seismicity in the shallow volcanic edifice formed from slow-rupture earthquakes. *Nature Geoscience*, doi. 10.1038/NGEO2027

Beaubien, S. E., Ciotoli, G. y Lombardi, S. (2003). Carbon dioxide and radon gas hazard in Alban Hills area (central Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 123, 63-80.

- Beckett, W. (2000). Occupational respiratory disease. *N. Engl. J. Med.* 342:406-413.
- Benavides, S. (2020). El aporte del turismo a la economía costarricense: más de una década después. *Economía y Sociedad*, 25, 57, <http://orcid.org/0000-0001-8383-397X>.
- Benner, S. W. (1987). Stratigraphy and volcanic hazard of Volcano Rincón de la Vieja, a preliminary report. *ACM Tropical Field Studies*, Costa Rica.
- Bergoeing, J. P. (1978). *La fotografía aérea y su aplicación a la geomorfología de Costa Rica*. San Jose: Ministerio de Obras Publicas y Transportes, IGN.
- Bergoeing, J. P. (1998). *Geomorfología de Costa Rica*. Inst. Geográf. Nacional, San José.
- Bergoeing, J. P. (2007). *Geomorfología de Costa Rica*. (2 ed.). Librería Francesa.
- Bergoeing, J. P. (2009). *Costa Rica, paisajes volcánicos*. San Jose: Ed. Jadine.
- Bergoeing, J. P., Brenes, L. G. y Malavassi, E. (1983). *Geomorfología del Pacífico Norte de Costa Rica* (Explicación del mapa geomorfológico 1:100 000). MOPT-IGN-UCR.
- Bergoeing, J. P., Brenes, L. G., Protti, R., Arce, R., Artavia, L. G., Salas, D. y Carrillo, M. (2010). *Atlas geomorfológico del Caribe de Costa Rica*. San José: UCR-IGN.
- Bermúdez, M. (s.f). Vulnerabilidad social y organización ante desastres naturales. Comisión Nacional de Atención de Emergencias y Prevención de Riesgos. San José, Costa Rica.
- Bessho, K., Date, K., Hayashi, M., Ikeda, A., Imai, T., Inoue, H., Kumagai, Y., Miyakawa, T., Murata, H., Ohno, T., et al. (2016). An Introduction to Himawari-8/9-Japan's New-Generation Geostationary Meteorological Satellites. *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II*, 94, 151-183.
- Biolley, P., 1889: *Costa-Rica et son Avenir*. Traducido al inglés (C. Charles, 1890): Costa Rica and her future. Judd y Detweiller, Washington.
- Black, B. A., Manga, M. y Andrews, B. (2016). Ash production and dispersal from sustained low-intensity Mono-Inyo eruptions. *Bull. Volcanol.*, 78:57. <http://dx.doi.org/10.1007/s00445-016-1053-0>.
- Blunda, Y. (2009). Percepción del riesgo volcánico y conocimiento de los planes de emergencia en los alrededores del volcán Poás, Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 43. doi: <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v0i43.3465>
- Bolaños, G. I. (2003). Reseña de " Introducción a la fotointerpretación" de Felipe Fernández García. *Papeles de Geografía*, (37),285-288. [fecha de Consulta 22 de agosto de 2021]. ISSN: 0213-1781. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40703720>

Bonadonna, C. y Costa, A. (2012). Estimating the volume of tephra deposits: A new simple strategy. *Geology*, 40, 415-418.

Bonadonna, C. y Costa, A. (2013). Modeling tephra sedimentation from volcanic plumes. En Fagents, S. A., Gregg, T. K., Lopes, R. M. C. (eds.) *Modelling volcanic processes: the physics and mathematics of volcanism* (pp. 173-202), Cambridge University Press.

Bonadonna, C., Connor, C.B., Houghton, B.F., Connor, L.J., Byrne, M., Laing, A. y Hincks, T.K. (2005) Probabilistic modeling of tephra dispersal: hazard assessment of a multiphase rhtolitic eruption at Tarawera, New Zeland. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 110, p. B03203.

Bonadonna, C. y Costa, A. (2013). Modeling tephra sedimentation from volcanic plumes. En Fagents, S. A., Gregg, T. K. P. y Lopes, R. M. C.: *Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism* (eds.). Published by Cambridge University Press, pp. 171-202.

Bonadonna, C., Costa, A., Folch, A., Koyaguchi, T. (2015). Tephral dispersal and sedimentation. En Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S. R., Rymer, H. y Stix, J. (eds) *The encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, Amsterdam, 1421 p. ISBN 9780123859389

Bonali, F. L., Tibaldi, A., Corazzato, C., Torney, D. R. y Lara, L. E. (2013). Quantifying the effect of large earthquakes in promoting eruptions due to stress changes on magma pathway: The Chile case. *Tectonophysics*, 583, 54-67.

Boudon, G., Rançon, J. P., Kieffer, G., Soto, G. J., Traineau, H., y Rossignol, J. C. (1996). Les éruptions de 1966-1970 et 1991-1992 du volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica: exemple d'activité récurrente d'un système hydromagmatique. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes*, 322(2), 101-108.

Bovis, M. J., y Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth surface processes and landforms*, 24(11), 1039-1054.

Brown, W. y Wohletz, K. (1995) Derivation of the Weibull distribution based on physical principles and its connection to the Rosin-Rammler and log normal distribution. *J. Applied Phys.* 78, 2758-2763.

Bursik, M. (2001). Effect of wind on the rise height of volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3621-3624.

Bullard, F. M. (1956). Volcanic activity in Costa Rica and Nicaragua in 1954. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 37(1), 75-82.

Calder, E., Wagner, K., y Ogburn, S. (2015). Volcanic hazard maps. En S. Loughlin, S. Sparks, S. Brown, S. Jenkins, y C. Vye-Brown (Eds.), *Global Volcanic Hazards and Risk* (pp. 335-342). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781316276273.022

Cambres, J. (2015). La balística forense como herramienta fundamental para identificación del arma de fuego utilizada en un hecho punible (Tesis de Especialidad). Univ. Costa Rica.

Campos, E. (1997). Simulación de la dispersión de ceniza durante las erupciones de noviembre de 1995 del Volcán Rincón de la Vieja. *Top. Meteor. Oceanog.*, 4(1), 5-13.

Campos, R. (2010). Prueba pericial de Balística: su aplicación y valoración en el proceso penal costarricense (Tesis de grado). Univ. Costa Rica. <http://ijj.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2017/06/Prueba-pericial-de-balística.pdf>

Campos, M. y Castro, V. (1992). El clima a sotavento de las montañas de Costa Rica. Instituto Meteorológico, Tópicos meteorológicos, N.º 2, 21p.

Campos, D. D. y Barrantes, C. G. (2020). Evaluación de la vulnerabilidad asociada a la actividad del volcán Turrialba (2010-2017) en el distrito de Santa Cruz de Turrialba, Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 63, 1-19. doi: 10.15517/rgac.v63i0.43404

Carey, S. N. (1996). Modelling of tephra fallout from explosive eruptions. En *Monitoring and mitigation of volcano hazards*. Ed. by Scarpa, R. y Tilling, T. Springer-Verlag Berlin pp.429-461.

Carey, S. y Bursik, M. (2015). Volcanic plumes. En Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S. R., Rymer, H. y Stix, J. (eds). *The encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, Amsterdam, 1421 p. ISBN 9780123859389

Carey, S. N. Y Sigurdsson, H. (1982). The influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens volcano. *J. Geophys. Res.*, 87 pp. 7061.7072.

Cashman, K. V. y Hoblitt, R. P. (2004). Magmatic precursors to the 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens, USA. *Geology*, 32 (2), 141-144.

Clarke, A.B., (2012). Unsteady explosive activity: Vulcanian eruptions. En Fagents, A., Gregg, T. K. P., Lopes, R. M. C. (eds.). *The physics and mathematics of volcanism*. Cambridge University Press, Modeling Volcanic Processes, 129-152.

Carr, M. J., Saginor, I., Alvarado, G. E., Bolge, L. I., Lindsay, F. N., Mildkakis, K., Turrin, B., Feigenson, M. D. y Swisher, C. (2007). Element Fluxes from the Volcanic Front of Nicaragua and Costa Rica. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 8(6). DOI:10.1029/2006GC001396.

Chavarría, L., Hakanson, E. y Mora, Ó. (2007). Geología del Sector Mundo Nuevo. Inf. Interno ICE, C. S. Recursos Geotérmicos, Área de Geociencias.

Chen, C. Y., y Wang, Q. (2017). Debris flow-induced topographic changes: effects of recurrent debris flow initiation. *Environmental monitoring and assessment*, 189(9), 449.

Cioni, R. y Pistolesi, M. (2015). Plinian y sublinian eruptivos. En Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S. R., Rymer, H. y Stix, J. (eds) *The encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, Amsterdam,.1421 p. ISBN 9780123859389

CNE. (2015). *Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, San José.

CNE. (2016). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2020*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, San José.

CNE. (2021). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2021-2025 Costa Rica*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, San José.

CNE. (2003a). Mapa de Amenazas Naturales Potenciales Cantón Liberia. Escala 1:50 000. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, San José.

CNE. (2003b). Mapa de Amenazas Naturales Potenciales Cantón Upala. Escala 1:50 000. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, San José.

CNE. (2012). Plan de Contingencia, Parque Nacional Volcán Rincón de la Vieja. Disponible en <http://investigadoresacg.org/blog/wp-content/uploads/2013/07/PLAN-DE-CONTINGENCIA-VOLCAN-RINCON-DE-LA-VIEJA-26-11-2012.pdf>. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, San José.

CNE. (2019). Plan de Contingencia de las comunidades de Buenos Aires, Gavilán y Dos Ríos.

CNE. (s.f). Mapa de Amenazas y Peligros Naturales Cantón Upala. Escala 1:50 000.

CNE-CMEU. (2019). Plan de contingencia Comunidades Buenos Aires, Gavilán y Dos Ríos por Actividad Volcánica del Rincón de la Vieja Preliminar. CNE-Comité Comunal de Emergencias de Dos Ríos, Upala, enero 2919.

Connor, C. B., Hill, B. E., Winfrey, B., Franklin, N. M. y La Femina, P. C. (2001). Estimation of volcanic hazards from tephra fallout. *Natural Hazard Review* (1)2, pp.33-42

Connor, L. J. y Connor, C. B. (2006) Inversion is the key to dispersion: Understanding eruption dynamics by inverting tephra fallout. En Mader, H., Coles, S. C., Connor, C.-B. y Connor, L. J. (eds.), *Statistics in volcanology* (Vol. 231-242), Geological Society.

Constantinescu, R., Hopulele-Gligor, A., Connor, C. B., Bonadonna, C., Connor, L. J., Lindsay, J. M. et al (2021). The radius of the umbrella cloud helps characterize large explosive volcanic eruptions. *Communications Earth and Environment*, 2, (3), https://digitalcommons.usf.edu/geo_facpub/2304

Corrales, R. (1974). Avance del informe de la visita a los campos geotermales en Guanacaste. ICE [Informe interno].

Corrales, R.S. (1976). Proyecto geotérmico de Guanacaste; informe de previabilidad técnica: geoquímica. Informe Interno, Instituto Costarricense de Electricidad, San José.

Corner, J. (1950). *The Theory of the Interior Ballistic of Guns*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Coto-Cedeño, W. I. (2019). Nubes de ceniza, campos de arena. Actividad volcánica en Costa Rica y su impacto en el sector agropecuario, 1950-2017. *Rev. Geográf. Amér. Central*, 62: 129-158.

Cowlyn, J., Kennedy, B. M., Gravley, D. M. y Cronin, S. J. (2020). A Confidence-Based Assessment Method for Distinguishing Pyroclastic Density Current Deposits From Other Volcaniclastic Units. *Frontier in Earth Science* 8, 581195, doi: 10.3389/feart.2020.581195

Crandell, D. R., Booth, B., Kusumadinata, K., Shimozuru, D., Walker, G. P. L. y Westercamp, D. (1984). *Source-book for volcanic-hazards zonation*. UNESCO, París.

Danielsen, E. (1981). Trajectories of the Mount St. Hellens eruption plume. *Science* 211, 819-821.

Denyer, P., Vargas, C. A., Lücke, O., Solano, J. P. (2019). Deformación y geomorfología. En Denyer, P. (ed.): *Perspectiva Geológica del Noroeste de Costa Rica. Historia, Evolución y Cartografía*. EUCR, pp. 275-299.

Diario Oficial la Gaceta (11 de enero de 2006). Ley Nacional de Emergencias y Prevención de Riesgos N° 8488, Costa Rica. Recuperado de: <http://www.cne.go.cr/Documentos/legal/LEY%20NACIONAL%20DE%20EMERGENCIA%208488.pdf>

Dóndoli, C. (1951). Informe sobre los azufrales de Santa María zona de Liberia en la provincia de Guanacaste, Costa Rica. *Informes Técnicos y Notas Geológicas*, 19: 1-4. Dirección de Geología, Minas y Petróleo (reimpreso en 1972).

Donovan, A. (2019). Critical volcanology? Thinking holistically about risk and uncertainty. *Bull. Volcanol.* 81, 20, <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1279-8>

Donovan, A., Suppasri, A., Kuri, M. y Torayashiki, T. (2018). The complex consequences of volcanic warnings: trust, risk perception and experiences of businesses near Mount Zao following the 2015 unrest period. *Int. J. Disaster Risk Reduction* pp. 57-67.

Du, J., Fan, Z., Xu, W. y Dong, L. (2021). Research Progress of Initial Mechanism on Debris Flow and Related Discrimination Methods: A Review. *Frontiers in Earth Science*, doi: 10.3389/feart.2021.629567

Dzierma, Y. y Wehrmann, H. (2014). Probabilities of future $VEI \geq 2$ eruptions at the Central American Volcanic Arc: a statistical perspective based on the past centuries eruption record. *Int. J. Earth Sci. (Geol, Rundsch.)*, 103, 2029-2042.

Dzierma, Y., Thorwart, M. M., Rabbel, W., Flueh, E.R., Alvarado, G.E. y Mora, M. M. (2010). Imaging crustal structure in south central Costa Rica with receiver functions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11, 1-21.

Echols, W. T. y Wagner, N. K. (1972). Surface roughness and internal boundary layer near a costaline. *J. Appl. Meteor*, 11, 658-662.

Edwards, M. J., Kennedy, B. M., Jolly, A. D., Scheu, B. y Jousset, P. (2017). Evolution of a small hydrothermal eruption episode through a mud pool of varying depth and rheology, White Island. *N. Z. Bull. Volcanol.*, 79, 16, doi:10.1007/s00445-017-1100-5

Espinosa, C. E. y Arriaga, I. (2014). Enfoque Sistémico de la gestión local del riesgo por inundación. El caso de la subcuenca del río Caldera en el Distrito de Boquete, Panamá. *Investig. Geogr. Chile*, 48, 53-72.

Esquivel, L. (2011). Restricción del uso de la tierra en áreas bajo amenaza volcánica: el caso del Arenal. *Rev. Geol. Amér. Central*, 30. doi: <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v0i30.7289>

Ewert J. W. (2007) System for Ranking Relative Threats of U. S. Volcanoes. *Nat.Hazards Rev.*, 8(4): 112-124.

Fagents, S. y Wilson, L. (1993). Explosive volcanic eruptions: VII. The ranges of pyroclasts ejected in transient volcanic explosions. *Geophys. J. Int.*, 113, 359-370.

Faillace, C. (1973). Notas sobre algunas fuentes termo minerales en Guanacaste. *Publicaciones Geológicas del ICAITI, IV*, 47-58.

Fauria, K. F., Manga, M. y Wei, Z. (2017). Trapped bubbles keep pumice afloat and gas diffusion makes pumice sink. *Earth Planet Sci. Lett.* 460, 50-59. Doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.055

Fearnley, C., Winson, A. E. G., Pallister, J. y Tilling, R. (2018a). Volcano Crisis Communication: Challenges and Solutions in the 21st Century. En Fearnley, C., Bird, D. K., Haynes, K., McGuire, W. J. y Jolly, G. (2018, eds.). *Observing the volcano World. Volcano Crisis Communication*. Springer Open, Advances in Volcanology, IAVCEI.

Fearnley, C., Bird, D. K., Haynes, K., McGuire, W. J. y Jolly, G. (2018b). *Observing the volcano World. Volcano Crisis Communication*. Springer Open, Advances in Volcanology, IAVCEI.

Fehn, U., Snyder, G. T. y Varekamp, J. C. (2002). Detection of recycled marine sediment component in lake fluids using ¹²⁹I. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 115, 451-460.

Fernández, E., Brenes, J. y Barboza, V. (1991). La actividad eruptiva del Volcán Rincón de La Vieja, durante los días 6, 7 y 8 de mayo de 1991. *Bol. de Vulcanología*, 22, 11-17.

Fernández, E., Brenes, J. Segura, J. y Barboza, V. (1995). Actividad Eruptiva del Volcán Rincón de La Vieja, de los días 6-13 de noviembre 1995. OVSICORI-UNA, Heredia, Costa Rica [Informe inédito].

Fernández, E., Avaró, G., Duarte, E., Pacheco, J., Martínez, M., Sáenz, W. y Brenes, J. (2012). Boletín de Vulcanología Estado de los Volcanes Febrero 2012. Inf. OVSICORI-UNA.

Fierstein, J. Y Nathenson, M. (1992) Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bull. Volcanol.*, 54, 157-167.

Folch, A., Mingari, L., Gutierrez, N., Hanzich, M., Macedonio, G. y Costa, A. (2019). FALL3D-8.0: a computational model for atmospheric transport and deposition of particles, aerosols and radionuclides. Part I: model physics and numerics. Geoscientific Model Development Discussions. <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-311>.

Forworthy, B. L. y Hill, M. (1982). *Volcanic Eruptions of 1980 at Mount St. Helens. The First 100 Days*. Geological Survey Professional Paper 1249, Washington.

Frantzius, A. Von. (1861a). Beiträge zur Kenntniss der Vulkane Costarica's. Gotha: Justus Perthes, Petermann's Geographische Mittheilungen. Trad. al español, Aporte al conocimiento de los volcanes de Costa Rica. En Vargas. A. C. (Ed.), 1979, 11-32.

Frantzius, A. Von. (1861b). Originalkarte des nördlichen Theiles von Costa Rica. 1:1 000 000. Gotha: Justus Perthes, Petermann's Geographische Mittheilungen.

Frantzius, A. von. (1862a). Die warmen Mineralquellen in Costa Rica (Schluss). *Preussische Medicinal Zeitung*, new ser. 5 (14-16): 124-126. Berlin. Trad. al español por A. G. Vargas y S. Kussmaul, 2007: Las fuentes termominerales en Costa Rica II: *Rev. Geol. Amér. Central*, 37 Especial, 31-34*.

Frantzius, A. von. (1862b). *Die warmen Mineralquellen in Costa Rica*. Ed. A.W. Schade, Berlín.

Frantzius, A. von. (1873). Die warmen Mineralquellen in Costa Rica. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 5, 496-510. Fascículo. Stuttgart. Trad. al español A. G. Vargas y S. Kussmaul, 2007: Las fuentes termominerales en Costa Rica I: *Rev. Geol. Amér. Central*, 37 Especial, 23-30.

Fuchs, K. (1884, 4 ed.). *Les volcans et les tremblements de terre*. Ancienne Librairie Germer Baillié et Cie., Paris.

Gabb, W. M. (1874). On the Geology of the Republic of Costa Rica. U. S. Geol. Survey. Trad. Español en: Informe sobre la exploración en Talamanca verificada durante los años de 1873-74. Anales del Instituto Físico-Geográfico Nacional, Tipografía Nacional, V: 67-92. Transcripción del original en inglés por Lücke, O. H., Gutiérrez, V. y Soto, G., 2007: *Rev. Geol. Amér. Central*, 37, 103-118.

García, G. M. (1994). Los mapas de riesgos. Concepto y metodología para su elaboración. *Revista Sanidad e Higiene Pública*, 4(68), 443-453.

García-Cacho, L. (2010). Avalanchas volcánicas. En González, E., Escobar, E., Becerra, R., Gosáldez, R. U. y Dóniz, J. (eds.). *Aportaciones recientes en Volcanología 2005-2008*. Centro de Estudios Calatravos, España, pp. 205-223.

Gaunt, H. E., Bernard, B., Hidalgo, S., Proaño, A., Wright, H., Mothes, P. Criollo, E. y Kueppers, U. (2016). Juvenile magma recognition and eruptive dynamics inferred from the analysis of ash time series: The 2015 reawakening of Cotopaxi volcano. *J. Volcanol. Geotherm.* 328, 134-146, <https://doi.org/10.1016/j.volgeores.2016.10.013>

Giggenbach, W.F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca. geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.

Giggenbach, W.F. y Corrales, R. (1992). Isotopic and chemical composition of water and stream discharges from volcanic-magmatic-hydrothermal systems of the Guanacaste Geothermal Province, Costa Rica. *Applied Geochemistry*, 7, 309-332.

Global Volcanism Program (1991a). Report on Rincón de la Vieja (Costa Rica). En: McClelland, L (ed.), *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 16, 4. Smithsonian Institution. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN199104-345020>

Global Volcanism Program (1991b). Report on Rincón de la Vieja (Costa Rica). En: McClelland, L (ed.), *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 16, 5. Smithsonian Institution. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN199105-345020>

Global Volcanism Program (1991c). Report on Pinatubo (Philippines). En: McClelland, L (ed.), *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 16, 9. Smithsonian Institution. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN199109-273083>

Gómez, F. (1996). *Desarrollo de una metodología para el análisis del riesgo volcánico en el marco de un sistema de información geográfica*. (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, España.

Gómez, A. E. (2012). Promoción de la ciencia, tecnología y capacitación para la prevención. En Adamson, M. y Castillo, F. (eds.). *Desastres. Costa Rica en el tercer milenio: Desafíos y propuestas para la reducción de vulnerabilidad*. Contrastes Vivos de Costa Rica, pp. 128-137.

González, C. (1910). *Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica; 1608-1910*. Tipogr. de Avelino Alsina, MCMX 8; San José. Primera reimpresión, ETCR, 1994.

González-Ilama, G., Mora, M., Alpízar, Y., Mora-Amador, R., Taylor, W. y Ramírez, C. (2013a). Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica, julio 2013. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de:

<http://rsn.ucr.ac.cr/actividad-volcanica/reportes-volcanicos/626-03-07-13-informe-sobre-la-actividad-de-los-volcanes-activos-de-costa-rica-en-junio-del-2013>

González-Ilama, G., Alpízar, Y., Mora-Amador, R., Ramírez, C., Mora, M., y Taylor, W. (2013b). Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica, noviembre 2013. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Volcanes/Informe_volcanes_noviembre_2013.pdf

González-Ilama, G., Mora-Amador, R., Alpízar, Y., Mora, M., y Ramírez, C. (2014a). Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica, agosto 2014. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Volcanes/Informe_volcanes_agosto_2014.pdf

González-Ilama, G., Mora-Amador, R., Mora, M., Alpízar, Y., y Taylor, W. (2014b). Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica, septiembre 2014. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Volcanes/Informe_volcanes_septiembre_2014.pdf

González-Ilama, G., Mora-Amador, R., Mora, M., Taylor, W. y Alpízar, Y. (2014c). Erupciones freáticas mayores en el volcán Rincón de la Vieja. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: <http://rsn.ucr.ac.cr/actividad-volcanica/reportes-volcanicos/5334-23-09-14-erupciones-freaticas-mayores-en-el-volcan-rincon-de-la-vieja-2>

Guimarães, L. F., Nieto-Torres, A., Bonadonna, C. y Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 2: Application to Latin America. *Frot. Earth Sci.* 9:757742, doi: 10.3389/feart.2021.757742

Gurioli, L., Harris, A. J. L., Colo, L., Bernard, J., Favalli, M., Ripepe, M. y Andronico, D. (2013). Classification, landing distribution and associated flight parameters for a bomb field emplaced during a single major explosion at Stromboli, Italy. *Geology* 41, 5, 559-562. <https://doi.org/10.1130/G33967.1>

Hammarlund, L. y Piñones, J. (2009). *Arsenic in Geothermal waters of Costa Rica. A minor Field Study*. M. Sc tesis, Dept. Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Hansell, A. y Oppenheimer, C. (2004). Health hazards from volcanic gases: a systematic literature review. *Archives of Environmental Health: An Int. J.*, 59(12). Doi:10.1080/0003989049602947

Hapuarachchi, H. A. P., Wang, Q. J., y Pagano, T. C. (2011). A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological processes*, 25(18), 2771-2784.

- Hasegawa, Y., Sugai, A., Hayashi, Y., Hayashi, Y., Saito, S. y Shimbori, T. (2015). Improvements of volcanic ash fall forecasts issued by the Japan Meteorological Agency. *J. Appl. Volcanol.*, 4, 1-12.
- Hayes, J. L., Holbrook, W. S., Lizarralde, D., Avendonk, H. J. A., Bullock, A. D., Mora, M., Ramirez, C. y Alvarado, G. E. (2013). Crustal structure across the Costa Rican Volcanic Arc. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14(4), 1087-1103.
- Healy, J. (1969). *Notes on the volcanoes of the Guanacaste volcanic range, Costa Rica*. New Zeland Geological Survey.
- Hernández, A. (2018). Evaluación Arqueológica en el Proyecto Geotérmico Borinquen I, Vaporducto. ICE (Inf. Interno).
- Hilje, L. y Saunders, J. (2008). *Manejo integrado de plagas en Mesoamérica: aportes conceptuales*. Cartago, Costa Rica: Ed. Tecnológica de Costa Rica.
- Horwell, C. J. y Baxter, P. J. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bull. Volcanol.* 69, 1-24. Doi: 10.1007/s00445-006-0052-y
- ICE-ENEL (1991). *Evaluación del Potencial Geotérmico de Costa Rica*. Lista de mapas. Departamento de Recursos Geotérmicos, ICE. 2 volúmenes [Inf. Interno].
- ICE (2013). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Geotérmico Borinquen*. Tomo N°1. UEN Proyectos y Servicios Asociados. Centro de Servicio de Gestión Ambiental. Instituto Costarricense de Electricidad. San José, Costa Rica.
- ICE. (2015). Costa Rica: Energía geotérmica, modelo propio de sostenibilidad. Grupo ICE, Dirección de Comunicación e Identidad Corporativa [Inf. Interno].
- INITTA. (2015). *Suelos de Costa Rica, orden andisol*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria Editorial M&F, S. A. San José.
- ISDR. (2009). *2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. International Strategy for Disaster Reduction, Japón: ISDR.
- Iversen, J. D. Y White, B. R. (1982). Saltation threshold on Earth, Mars and Venus, *Sedimentology*, 29, 111-119.
- Jarvis, P. A., Bonadonna, C., Dominguez, L., Forte, P., Frischknecht, C., Bryan, D., Aguilar, R., Beckett, F., Elissondo, M., Gillies, J., Kueppers, U., Merrison, J., Varley, N. y Wallace, K. L. (2020). Aeolian Remobilisation of Volcanic Ash: Outcomes of a Workshop in the Argentinian Patagonia. *Frontiers in Earth Science*, 8, 575184, doi 10.3389/earth.2020.575184.
- Jenkins, P.E., Arellano, J., Ross, M. y Snell, M. (2018). Drag Coefficients of Golf Balls. *World Journal of Mechanics*, 8, 236-241.

Jenkins, S. F., Spence, R. J. S., Fonseca, J. F. B. D., Solidum, R.U. y Wilson, T. M. (2014). Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment. *J. Volcanol. Geother. Res.*, 276, 105-120, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.03.002.

Jongmans, A. G., Mulder, J., Groenesteijn, K. y Buurmam, P. (1996). Soil Surface Coatings at Costa Rica Recently Active Volcanoes. *Soil Sci. Am. J.*, 60, 1871-1880.

Jutzeler, M., Marsh, R., van Seville, E., Mittal, T., Carey, R. J., Fauria, K. E., Manga, M., McPhie, J. (2020). Ongoing dispersal of the 7 August 2019 pumice raft from the Tonga arc in the southwestern Pacific Ocean. *AGU Geophys. Res. Lett.* 47(5) <https://doi.org/10.1029/2019GL086768>

Kanji, M. A., Massad, F., y Cruz, P. T. (2003). Debris flows in areas of residual soils: occurrence and characteristics. *International workshop on occurrence and mechanisms of flows in natural slopes and Earthfills*, Associazione Geotecnica Italiana, Sorrento, Italia.

Kelfoun, K., Harris, A., Bontemps, M., Labazuy, P., Chausse, F. et al. (2020). A method for 3D reconstruction of volcanic bomb trajectories. *Bull. Volcanology*, 82 (4), 34. [ff10.1007/s00445-020-1372-zff](https://doi.org/10.1007/s00445-020-1372-zff). [ffhal-02517099](https://doi.org/10.1007/s00445-020-1372-zff)

Kempton, K. (1997). *Geologic evolution of the Rincón de la Vieja Volcanic Complex, NW Costa Rica*. (Tesis doctoral). Universidad de Texas en Austin.

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 hazards implications. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 71(2), 109-127. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00072-0)

Kempton, K. A., y Rowe, G. L. (2000). Leakage of Active Crater lake brine through the north flank at Rincón de la Vieja volcano, northwest Costa Rica, and implications for crater collapse. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 97(1-4). doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00181-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00181-X)

Krank, K. y Milligan, T. G. (1985). Origin of grain size spectra of suspension deposited sediment., *Geo. Mar. Lett.*, 5, 61-66.

Kratzmann, D. J., Carey, S. N., Fero, J., Scasso, R. A., Naranjo, J. A. (2010). Simulations of tephra dispersal from the 1991 explosive eruptions of Hudson volcano, Chile. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 190, 37-352.

Larsson, W. (1937). Vulkanische Asche vom Ausbruch des chilenischen Vulkans Quizapú (1932) in Argentina gesammelt- Eine Studie über aolische Differentiation. *Uppsala University Geological Institution Bulletin*, 26, 27-52.

Lescinsky, D.T., Connor, C.B. y Stoiber, R.E. (1987). Soil mercury study of thermal areas, Rincon de la Vieja volcano, Costa Rica. *Geothermics*, 2 (16), 159-168.

Ley Nacional de Emergencias y Prevención de Riesgos. N° 8488. Asamblea Legislativa de la Republica de Costa Rica.

Leyrit, H. (2000). Flank collapse and debris avalanche deposits. En Leyrit, H. y Montecat, C. (eds.): *Volcaniclastic Rocks, from Magma to Sediments*. Gordon and Breach Science Pub., Holanda, pp. 111-129.

Leyton, S. R. (2020). Análisis sobre la percepción del riesgo en volcanes activos de Costa Rica (2019-2020). Práctica profesional supervisada. Escuela de Ciencias Geográficas, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Univ. Nacional.

Li, Q. M., Reid, S. R., y Ahmad-Zaidi, A. M. (2006). Critical impact energies for scabbing and perforation of concrete target. *Nuclear Engineering and Design*, 236, 1140-1148.

Lindsay, J. B. (2016). Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. *Computers & Geosciences*, 95, 75-84.

Linkimer, L., Beck, S. L., Schwartz, S. Y., Zandt, G. y Levin, V. (2015). Nature of crustal terranes and the Moho in northern Costa Rica receiver function analysis. *Geochem. Geophys. Geosystems*, 11 (1), doi:10.1029/2009GC002795

Llinares, M. A., Ortiz, R. y Marrero, J. M. (2004). *Riesgo volcánico*. Madrid, España. Ed, Dirección General de Protección Civil y Emergencias.

Long, A. y Rippeteau, B. (1974). Testing Contemporaneity and Averaging Radiocarbon Dates. *Amer. Antiquity*, 39 (2), 205-215.

López, A. (1999). *Neo- and Paleostress partitioning in the SW corner of the Caribbean plate and its fault reactivation potential* (Tesis Ph.D.). Tübinger Geoswissenschaftliche Arb., A (53).

López, P. y Fachelli, S. (2015). Metodología de la Investigación Social Cuantitativa. Universitat Autònoma de Barcelona, España.

Lücke, O. H. (2012). Moho structure of Central America based on three-dimensional lithospheric density modelling of satellite derived gravity data. *Int. J. Earth Sci.*, 103, 1733-1745, doi:10.1007/s00531-012-0787-y.

Lücke, O. H. y Arroyo, I. G. (2015). Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zoned from 3-D gravity modeling and local earthquake data. *Solid Earth*, 6, 1169-1183.

Malavassi R., E. (1991). *Magma sources and crustal processes at the southern terminous of the Central American Volcanic Front* (Tesis Ph. D.). Univ. de Santa Cruz, EE. UU.

Manga, M., Fauria K. E., Lin, C., Mitchell, S. J., Jones, M., Conway, C. E., Degruyter, W., Hosseini, B., Carey, R., Cahalan, R., Houghton, B.F. (2018). The pumice raft-forming 2012 Havre submarine eruption was effusive. *Earth Planet. Sci. Lett.* 489: pp49-58

Marrero, J. M., García, A., Berrocoso, M., Llianres, Á., Rodríguez-Losada, A. y Ortiz, R., (2019). Strategies for the development of volcanic hazard maps in monogenetic volcanic fields: the example of La Palma (Canary Islands). *J. Applied Volcanology*, 8: 6, <https://doi.org/s13617-019-0085-5>.

Marzocchi, W. y Bebbington, M. S. (2012). Probabilistic eruption forecasting at short and long time scales. *Bull. Volcanol.* 74, 1777-1807.

Mastin, L. G., Randall, M. J., Schwaiger, H. F., y Denlinger, R. P. (2013). *User's guide and reference to Ash3d: a three-dimensional model for Eulerian atmospheric tephra transport and deposition*. 2013-1122. U. S. Geological Survey.

Matson, M., (1984). The 1982 El Chichón volcano eruptions. - A satellite perspective. *J. Volcanol. Geotherm. Res*, 23, 1-10.

Mendenhall et al., (2012). *Introduction to Probability and Statistics*. Duxbury Press, 744 pp.

Mercalli, G. (1907). *Vulcani Attivi della Terra. Morfologia – dinamismo – prodotti – distribuzione geografica – cause*. Ulrico Hoepli, Ed. Libraio della Real Casa, Milano.

MIAVITA (2012). *Handbook for Volcanic Risk Management. Prevention, Crisis management, Resilience*. Orleans, Francia: MIAVITA (Mitigate and Assess risk from Volcanic Impact on Terrain and human Activities).

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2015). Leyenda para la generación de mapas de uso y cobertura de la tierra de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Miller, C. F. (1966). *Operation ceniza-arena: The retention of fallout particle from volcan Irazú (Costa Rica) by plants and people*. Stanford Res. Inst., Merlo Park. (en algunas referencias como Miller y Lee, aunque depende del documento con que se disponga).

MIVAH (2005). *Informe de asentamientos en condición de precarios y en tugurio de la gran área metropolitana*. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, San José.

Miyagi, I., Geshi, N., Hamasaki, S., Oikawa, T. y Tomiya, A. (2020). Heat source of the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan. *Bull. Volcanol.* 82, 33, doi.org/10.1007/s0045-020-1358-x

Molina, F. (2000). Las Pailas Geothermal Area Rincón de la Vieja volcano, Costa Rica. Reports 2000. The Unites Nations University, *Geothermal training programme*,13, 267-284, Iceland.

Molina, F. y Martí, J. (2016). The Borinquen geothermal system (Cañas Dulces caldera, Costa Rica). *Geothermics*, 64, 410-425.

Molina, F., Martí, J., Aguirre, G., Vega, E. y Chavarría, L. (2014). Stratigraphy and structure of the Cañas Dulces caldera (Costa Rica). *Geol. Soc. Amer. Bull.* doi: 10.1130/B31012.1

Montero, W. (1994). Neotectonic and related stress distribution in a subduction-collisional zone: Costa Rica. En H. Seyfried y W. Hellman (eds.): *Geology of an Evolving Island Arc. The Isthmus of Southern Nicaragua, Costa Rica, and Western Panama. Profil 7*, 125-141.

Montessus de Ballore, F. (1884). *Temblores y erupciones volcánicas en Centro-América con un apéndice meteorológico*. Imprenta del Dr. Francesco Sagrini, San Salvador.

Mooser, F., Meyer-Abich, H. y McBirney, A. R. (1958). *Catalog of Active Volcanoes of the World including Solfatara Fields of Central America*. International Volcanological Association; Nápoles.

Mora-Marín, F. (2015). The “Charlie Chaplin” Silhouette Figural Theme: A Pan-Middle American Theme. *Cuadernos de Antropología Enero-Junio*, 26(1), 9-45.

Mora, I. y Amador, J. A. (2000). El ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 7, 27-39.

Mora, M., Taylor, W., y Soto, G. (2012). Sismicidad inducida y otros efectos causados en el arco magmático. En: L. Linkimer, y G. Soto (Ed.). *El Terremoto de Sámara del 5 de septiembre de 2012* (pp. 62-78). Red Sismológica Nacional (ICEUCR).

Mora-Amador, R., González-Ilama, G., Alpízar, Y. y Ramírez, C. (2015a). Erupciones freáticas del volcán Rincón de la Vieja del 4 y 11 de noviembre del 2015. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: <http://rsn.ucr.ac.cr/actividad-volcanica/reportes-volcanicos/5391-informe-de-campo-volcan-rincon-de-la-vieja-del-4-al-11-de-noviembre-2015>

Mora-Amador, R., Ramírez, C., González-Ilama, G. y Alpízar, Y. (2015b). Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica, mayo 2015. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Volcanes/2015/Informe_volcanes_mayo_2015.pdf

Mora-Amador, R. y Ramírez, C. (2016). Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica, marzo 2016. Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/2016/informe_volcanes_MARZO_2016.pdf

Morales, L. D. (1986). Historia de la Sismología en Costa Rica. *Rev. Filosofía*, XXIV (59), 93-104.

Moran, S. C., Newhall, C. y Roman, D. C. (2011). Failed magmatic eruptions: late-stage cessation of magma ascent. *Bull. Volcanol.* 73, 115-122.

MOVE (2011). *Assessing vulnerability to natural hazards in Europe: From Principles to Practice. A manual on concept, methodology and tools.* Methods for the Improvements of Vulnerability Assessment in Europe, Bonn.

Municipalidad de Upala. (2020). Plan Estratégico Municipal 2020-2024. Oficina de Planificación.

Municipalidad de Upala. (2012). Plan Regulador del Cantón de Upala, Reglamento de Zonificación.

Murcia, H., Borrero, C., Pardo, N., Alvarado, G.E., Arnosio, M. y Scolamacchia, T. (2013). Depósitos volcanoclásticos: términos y conceptos para una clasificación en español. *Rev. Geol. Amér. Central*, 48, 15-39.

Narváez, I. (2013). Percepción sobre la tendencia de caudales, precipitación, temperatura y cambio de uso del suelo con relación al uso y manejo del agua en la zona norte de Cartago, Costa Rica. Máster Práctica del Desarrollo, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Narváez, L., Lavell, A. y Pérez, G. (2009). *La Gestión del Riesgo de Desastres. Un enfoque basado en procesos.* Comunidad Andina, Perú.

Newhall, C. G. y Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, 87, 1231-1238.

Newhall, C. G. y Hobblitt, R. P. (2002). Constructing event trees for volcanic crises. *Bull. Volcanol.*, 64, 3-20.

Nieto-Torres, A., Guimarães, L. F., Bonadonna, C. y Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 1: Methodology. *Frot. Earth Sci.* 9: 697451, doi: 10.3389/feart.2021.697451

Núñez-Corrales, S. y Brenes-André, J. (2021). BALISTICA (Version 1.0.0) [Computer software]. <https://github.com/RECIEM/Balistica>

O'Brien, J. S., Julien, P. Y., & Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *J. hydraulic engineering*, 119(2), 244-261.

Organización Panamericana de la Salud. (s.f). Erupciones volcánicas. [Erupciones volcánicas - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud \(paho.org\)](#)

Ortiz, E. (2020). *Evaluación de los efectos causados por la exposición a gases en ambientes frecuentados por parte de funcionarios de los parques nacionales volcán Poás y volcán Turrialba* (Tesis Lic.) Escuela de Química, UNA.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (1987). *Manejo de emergencias volcánicas*, México.

Ortíz, R. y Araña, V. (1996). *Daños que pueden producir las erupciones*. En Ortiz, R. (ed.). Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI). (1995). Reporte sobre la actividad del volcán Rincón de la Vieja. Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia.

Ortiz, R. (Ed.). (1996). *Riesgo volcánico*. Lanzarote: Serie Casa de los Volcanes 5.

Ortiz, R. y Araña, V. (1996). Daños que pueden producir las erupciones. En: R. Ortiz (Ed.): *Riesgo Volcánico*. Serie Casa de los Volcanes, Cabildo de Lanzarote, 5, 37-96.

OVSICORI. (2011a). Boletín de vulcanología, estado de los volcanes septiembre 2011. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia. Recuperado de: <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/vulcanologia/estado-de-los-volcanes/category/9-estado-de-los-volcanes-2011>

OVSICORI. (2011b). Boletín de vulcanología, estado de los volcanes octubre 2011. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia. Recuperado de: <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/vulcanologia/estado-de-los-volcanes/category/9-estado-de-los-volcanes-2011>

OVSICORI. (2012). Estado de los volcanes, resumen anual oficial 2012. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia. Recuperado de: <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/vulcanologia/estado-de-los-volcanes/category/8-estado-de-los-volcanes-2012>

OVSICORI-UNA (2021). Erupción en el Volcán Rincón de la Vieja del 28 de junio del 2021, 5:42 am (Actualización el 2 de julio del 2021). Inf. Interno OVSICORI-UNA.

Paniagua, S., Salazar, L., Kussmaul, S., Monge, A., y Obando, L. (1996). Síntesis de la amenaza volcánica y estimación básica del riesgo del volcán Rincón de la Vieja, Cordillera de Guanacaste, Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José [Informe interno].

Papale, P. (2017). Rational volcanic hazard forecasts and the use of volcanic alert levels. *J. Applied Volcanol.* 6 (13), doi 10.1186/s13617-017-0064-7

PAT. (2018). *Plan de acción temprana: Dispersión de cenizas volcánicas*. Cruz Roja Ecuatoriana.

Penning-Rowell, E.C., Tunstall, S.M., Tapsell, S.M. y Parker, D.J. (2000). The Benefits of Flood Warning: Red but Elusive, and Politically Significant. *J. Inst. Water and Environm. Man.*, 14: 7-14.

Peraldo, G. (1996). Desastre natural y planificación urbana. Reflexiones sobre los conceptos. *Reflexiones*, 43, 13-23.

Peraldo, G. y Montero, W. (1994). *Temblores del período colonial de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: ETCR.

Peraldo-Huertas, G. y Mora-Fernández, M. (2017). Experiencias desde la geología en percepción del riesgo de desastres en el contexto de la psicología comunitaria. En Dobles, I., Maroto, A., Masís, M. J. y Rodríguez, A. (Eds.), *Miradas sentidas y situadas: experiencias con grupos y comunidades* (pp. 153-175). San José, Costa Rica: Editorial UCR.

Phillips-Lander, C.M., Fowle, D.A., Taunton, A., Hernández, W., Mora, M., Moore, D., Shinogle, H. y Robertz, J.A. (2014) Silicate Dissolution in Las Pailas Thermal Field: Implications for Microbial Weathering in Acidic Systems. *Geomicrobiology J.*, 31:23-41.

Pittier, H. (1889). *Apuntaciones sobre el Clima y la Geografía de la República de Costa Rica. Observaciones y exploraciones efectuadas en el año de 1888*. Bol. Instituto Meteorológico Nacional, Tipografía Nacional, Tomo I.

Pittier, H. (1910). Costa Rica –Vulcan's smithy. *Nat. Geog. Mag.*, 21 (6), 494-525.

Pittier, H. (1912). Kostarika. Beiträge zur Orographie und Hydrographie. A. Petermanns Geographische Mittheilungen, Justus Perthes' Geographischer Anstatt, 175, 1-48.

Pizarro, B. (2001). La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina. CEPAL. Santiago de Chile.

Popa, R.-G., Bachmann, O. y Huber, C. (2021). Explosive or effusive style of volcanic eruptions determined by magma storage conditions. *Nature Geoscience*, 14, 781-786.

Pujol, R. (2012). Ordenamiento territorial para enfrentar amenazas naturales. En Adamson, M. y Castillo, F. (eds.). *Desastres. Costa Rica en el tercer milenio: Desafíos y propuestas para la reducción de vulnerabilidad*. Contrastes Vivos de Costa Rica, pp. 158-175.

Pujol, R. y Pérez, E. (2012). *Crecimiento urbano en la región metropolitana de San José. Una exploración espacial y temporal de los determinantes del cambio de uso del suelo, 1986-2010*. Lincoln Institute of Land Policy.

Quesada, T. A. (1989). Estudio geológico y geofísico del campo geotérmico Las Pailas, parque nacional Rincón de La Vieja, Guanacaste, Costa Rica. Univ. De Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

Raccichini, S., (1976). Notas sobre la actividad exhalativa cerca del Rincón de la Vieja. Costa Rica. *Rev. Geogr. Amér. Central*, 4: 93-104.

Ramírez, P. (1983). Estudio Meteorológico de los Veranillos en Costa Rica. Informe Técnico. Nota de investigación No 5: Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 47 p.

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. y Talamo, S. (2020). The INTCAL20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4), 725-757.

Renda, E., Rozas, M., Moscardini, O. y Torchia, N. P. (2017). *Manual para la elaboración de mapas de riesgo*. Programa Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Ministerio de Seguridad de la Nación, Argentina.

Robinson, C. S. (1943). *The thermodynamic of firearms*. McGraw Hill book Co., Inc., New York.

Rodolfo, K. S. (2000). The hazard from lahars and Jokulhlaups. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 973- 995.

Rodríguez, M. (2018). Cuantificación de vulnerabilidad y riesgo: las inundaciones en Motozintla de Mendoza, Chiapas, México. *Rev. Cartográfica*, 97, 81-104

Romero, J. E., Polacci, M., Watt, S., Kitamura, S., Tormey, D., Sielfeld, G., Arzilli, F., La Spina, G., Franco, L., Burton, M. y Polanco, E. (2021). Volcanic Lateral Processes in Mafic Arc Edifices: A Review of Their Driving Processes, Types and Consequences. *Frontiers in Earth Science*, doi: 10.3389/feart.2021.639825

Rosales I. A. (2015). Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria. Manual de definición de clases y especificaciones cartográficas de la Leyenda CLC-CR, para la generación de mapas de uso y cobertura de la tierra de Costa Rica. San José. Costa Rica. SasPlanet. (2021). Imágenes satelitales. Recuperadas el 14 de agosto de 2021.

Sánchez-Rivera, E., Solís-Salguero, L., Guido-Sequeira, H. y Vallejos-Ruíz, O. (2020). Costa Rica Country Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2020* Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2, 2020.

RSN. (1995). La erupción del volcán Rincón de la vieja, noviembre de 1995. Informe preliminar. Red Sismológica Nacional, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José.

RSN. (2011). Reporte sismos sentidos septiembre 2011. Red Sismológica Nacional, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José. Recuperado de:

http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/2011/Boletin_2011_09.pdf

RSN. (2012a). Reporte sismos sentidos febrero 2012. Red Sismológica Nacional, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José. Recuperado de: http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/2012/Boletin_2012_02.pdf

RSN. (2012b). Reporte sismos sentidos abril 2012. Red Sismológica Nacional, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José. Recuperado de: http://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/2012/Boletin_2012_04.pdf

Sáenz, W. R. (2020). Señales isotópicas de la Naciente Santuarium en el sistema magmático hidrotermal del volcán Rincón de la Vieja. Tesis Maestría en Gestión y Estudios Ambientales. Escuela de Química, UNA.

Saito, M. (1969). Forecasting time of slope failure by tertiary creep. En *Proc. 7th Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, México, 2, 677-683.

Sandman, P. (2003). Four kinds of risk communication. *The Synergist*, 8, 26-27.

Sallarès, V., Dañobeitia, J. J. y Flueh, E. (2001). Lithospheric structure of the Costa Rican Isthmus: Effects of subduction zone magmatism on an oceanic plateau. *J. Geophys. Res.*, 106 (B1), 621-642.

Sapper, K. (1925). *Los volcanes de la América Central*. Halle (Staae): Max Niemayer, Halle (Staae).

Sarna-Wojcicki, A. M., Shipley, S., Waitt, R.B., Dzurisin, D., Wood, S.H. (1980). Areal distribution, thickness, mass, volume, and grain size of air-fall ash from the six major eruptions of 1980. En Lipmann, P. W. y Mullineaux, D. R.(eds.). *The 1980 eruption of the Mount St. Helens, Washington (U.S. Geological Survey, Professional Paper, 1250, pp. 577-600.*

Scandone, R. (1983). Problems related with the evaluation of volcanic risk. En Tazieff, H., Sabroux, J.C. (Eds.), *Forecasting Volcanic Events, Developments in Volcanology*, 1, 57- 69; Elsevier, Amsterdam.

Scandone, R., Giacomelli, L., y Gasparini, P. (1993). Mt. Vesuvius: 2000 years of volcanological observations. *Journal of volcanology and geothermal research* 58, 5–26

Schilling, S. P. (1998). LAHARZ; *GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones*. 98-638. U. S. Geological Survey.

Schilling, S. P. (1998). LAHARZ; *GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones*. 98-638. U. S. Geological Survey.

Schilling, S.P. (2014). Laharz_py: GIS Tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones: U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1073, 78 pp., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141073>.

Schindlbeck, J. C., Kutterolf, S., Freundt, A., Alvarado, G. E., Wang, K.-L., Straub, S. M., Hemming, S. R., Frische, M. y Woodhead, J. D. (2016a). Late Cenozoic tephrostratigraphy offshore the southern Central American Volcanic Arc. 1. Tephra ages and provenance. - *Geochem. Geophys. Geosyst.* 17, doi. 10.1002/2016GC006503.

Schindlbeck, J. C., Kutterolf, S., Freundt, A., Straub, S. M., Vanucchi, P. y Alvarado, G. E. (2016b). Late Cenozoic tephrostratigraphy offshore the southern Central American Volcanic Arc. 2. Implications for magma production rates and subduction erosion. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17. DOI: 10.1002/2016 GC 006504

Schmitt, A. K., Danišik, M., Aydar, E., Şen, E., Ulusoy, I., Lovera, O. M. (2014). Identifying the Volcanic Eruption Depicted in a Neolithic Painting at Çatalhöyük, Central Anatolia, Turkey. *PLoS ONE* 2014 9(1); e84711. doi: 10.1371/journal.pone.0084711. pmid:24416270
Selva, J., Orsi, G., Di Vito, M., Marzocchi, W., Sandri, L. (2012). Probability hazard map for future vent opening at the Campi Flegrei caldera, Italy. *Bulletin of Volcanology* 74, 497-510. doi:10.1007/s00445-011-0528-2

Schneider, D. J., Rose, W. I., Coke, L. R., Bluth, G. J. S., Sprod, I. E. y Krueger, A. J. (1999). Early evolution of a stratospheric volcanic eruption cloud as observed with TOMS and AVHRR. *J. Geophys. Res.*, 104, 4037-4050.

Schuster, R. L. (1981). Effects of the eruptions on civil Works and operations in the Pacific Northwest. En: Lipman, P. W. y Mullineaux, D. R. (eds.): *The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington*. Geol. Survey Prof. Paper 1250:701-718.

Schweizer, P. J. y Renn, O. (2019): Governance of Systemic Risks for Disaster Prevention and Mitigation. *Contributing Paper to GAR 2019*. https://www.preventionweb.net/files/66695_f431finalschweizergovernanceofsyste.pdf

Scollo, S., Del Carlo, P. y Coltelli, M. (2007). Tephra fallout of 2001 Etna flank eruption: Analysis of the deposit and plume dispersion. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 160, 147-164.

Scollo, S., Coltelli, M., Bonadonna, C. y Carlo, P. (2013). Tephra hazard assessment at Mt. Etna (Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 3221-3233.

Scott, W. E. (1989). Volcanic and related hazards. En Tilling, R. I. (Ed.). *Volcanic Hazards* (pp. 9-23). Washington D. C.: American Geophysical Union.

Scott, L. M., y Janikas, M. V. (2010). Spatial statistics in ArcGIS. In *Handbook of applied spatial analysis* (pp. 27-41). Springer, Berlin, Heidelberg.

Seebach, K. von (1865). Seebach's Besteigung des Vulkans Turrialba in Costa-Rica. *Petermann's Geogr. Mittheilungen*, IX, 321-324.

Seinfeld, J. H. y Pandis, S. N. (2006, 2 ed.). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, New York.

Seropian, G., Kennedy, B. M., Walter, T., R., Ichihara, M. y Jolly, A. D. (2021). A review framework of how earthquakes trigger volcanic eruptions. *Nature Communications*, doi.org/10.1038/s41467-021-21166-8

Servicio Geológico de los Estados Unidos. (2000). ¿Cuáles son las Amenazas o Peligros Volcánicos? *USGS Fact Sheet 002-97*. Recuperado de: <http://pubs.usgs.gov/fs/fs144-00/fs144-00.pdf>

Sheridan, M. F. (1971) Particle-size characteristics of pyroclastic tuffs. *J. Geophys. Res.*, 76, pp.5627-5634.

Sheridan, M. F. y Updike, R. G. (1975) Sugarloaf Mountain tephra- A pleistocene rhyolitic deposit of base surge origin in northern Arizona, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, 571-581.

Siebert, L. (1986). Hazards of Large Volcanic Debris Avalanches and Associated Eruptive Phenomena. En Scarpa, R. y Tilling, R. I. (eds.). *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, Springer, 541-572.

Siebert, L., Sinkin, T. y Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the World*. ix + 551 pp. Smithsonian Institution, Univ. California Press, Londres.

Sistema Nacional de Protección Civil Mexicana (s. f). Peligros volcánicos. [319-infografapeligrosvolcnicos \(www.gob.mx\)](http://www.gob.mx/infografapeligrosvolcnicos)

Smets, B., Tedesco, D., Kervyn, F., Kies, A., Vaselli, O., y Yalire, M. M. (2010). Dry gas vents (“mazuku”) in Goma region (North-Kivu, Democratic Republic of Congo): Formation and risk assessment. *J. African Earth Sciences*, 58(5), 787-798.

SNAA (1964). Efectos de la actividad volcánica en el sistema de abastecimiento de agua de la ciudad capital. En: *Informe Anual del Servicio Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SNAA)*, pp. 32-41.

Solano, E. (1964). Dermatología y Ceniza. *XXXII Congreso Médico Nacional*, pp. 51-55, <https://www.binasss.sa.cr>

Solís, L. (2016). Propuesta de modelo conceptual para el reservorio del Proyecto Geotérmico Borinquen, basado en análisis unidimensional de la técnica magnetotérmica, Liberia, Guanacaste, Costa Rica. Tesis Lic., Univ. Costa Rica.

Solís, L y Meneses, E. (2020). Identification of Magmatic Intrusions Through Integrated Geophysical Methods. A Contribution for a Sustainable Geothermal Energy Development: Borinquen Geothermal Project – Central America Case Study. *Procc. World Geothermal Congress, Reykjavik*, Islandia.

Soto, G. J. (1994). Vulcanología Física. En Denyer, P. y Kussmaul, S. (Eds.), *Atlas Geológico Gran Área Metropolitana* (pp. 131-146). Cartago, Costa Rica: ETCR.

Soto, G. J. (2010). Volcanalidad, peligro volcánico del Rincón de la Vieja y su perspectiva en el impacto ambiental del Proyecto Geotérmico Mundo Nuevo. Inf. Interno ICE.

Soto, G. J. (2013). Peligro volcánico del Rincón de la Vieja y su perspectiva en el impacto ambiental del Proyecto Geotérmico Borinquen. En Zeledón, R. (Ed.), *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Geotérmico Borinquen*. (sección 5.1.6.3), (pp. 252-286). San José, ICE [Inf. Interno].

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 Guancaste, Costa Rica. Inf. Inter. ICE, Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, 78 p.

Soto, G. J., Alvarado, G. E. y Goold, S. (2003b). Erupciones <3800 a.P. del volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 29, 67-86.

Soto, G. y Martínez, M. (2016). Volcano Hazard zone of Rincón of Rincón de la Vieja volcano (Costa Rica). Mapa presentado en el tercer taller internacional de Buenas Prácticas de Observatorios Volcánicos sobre evaluación de riesgos volcánicos a largo plazo (VOPB3). 15-18 de noviembre de 2016 Vancouver, Washington, EE. UU.

Sparks, R. S. J., Aspinall, W. P., Crossweller, H. S. y Hincks, T. K. (2013). Risk and uncertainty assessment of volcanic hazards. En Roudgier, J., Sparks, S. y Hill, L. (Eds.), *Natural hazards* (pp. 364-397). Cambridge: Cambridge Univ. Press.

Stix, J. (2018). Understanding Fast and Slow Unrest at Volcanoes and Implications for Eruption Forecasting. *Front. Earth Sci.* 6: 56, doi: 10.3389/feart.2018.00056

Stix, J. y de Moor, J. M. (2018). Understanding and forecasting phreatic eruptions driven by magmatic degassing. *Earth, Planets and Space*. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0855-z>.

Stoiber, R. E y Carr, M. J. (1973). Quaternary volcanic and tectonics segmentation of Central America. *Bull. Volcanol.* 37, 304-325.

Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston and London.

Suzuki, T. (1983). The theoretical model for dispersion tephra. In autores? Arc Volcanims: physic and tectonics, pages 94–113. Terra Scientific publishing company, Tokio.

Szakacs, A. (1994). Redefining active volcanoes: a discussion. *Bull. Volcanol.*, 56, 321-325.

Tanguy, J. C., Ribiere, C., Scartha, A. y Tjetjep, W. S. (1998). Victims from volcanic eruptions: a revised database. *Bull Volcanol.*, 60, 137-144.

Tassi, F., Vaselli, O., Capaccioni, B., Giolito, C., Duarte, E., Fernandez, 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. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 148, 315-333.

Tassi, F., Vaselli, O., Fernandez, E., Duarte, E., Martinez, M., Delgado Huertas, A. y Bergamaschi, F. (2009). Morphological and geochemical features of crater lakes in Costa Rica: an overview. *J. Limnol.*, 68(2), 193-205. DOI: 10.3274/JL09-68-2-04

Taylor, W. y Aguilar, I. (2021). Nota técnica preliminar. Actividad eruptiva del volcán Rincón de la Vieja durante el 28 de junio 2021. Inf. Técnico Observ. Sismológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), ICE.

Thomas, B. J. (2012). Evaluación de la vulnerabilidad social ante amenazas naturales en Manzanillo (Colima). Un aporte de método. *Investigaciones Geograficas*, 81, 79-93. ISSN 0188-4611.

Tierz, P. (2020). Long-Term Probabilistic Volcanic Hazard Assessment Using Open and Non-open Data: Observations and Current Issues. *Frontiers in Earth Science*, doi: 10.3389/feart.2020.00257

Tilling, R. I. (1982). *Eruptions of Mount St. Helens: Past, Present, and Future*. U.S. Geol. Surv., Washington.

Tournon, J. (1984). *Magmatismes du Mesozoique a l'Actuel en Amerique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des Ophiolites aux Andesites (Tesis doctoral)*. Univ. Curie, París.

Trejos Hermanos (1925, eds.). *Geografía ilustrada de Costa Rica* (5^{ta} ed.): Tipografía de Trejos Hermanos.

Trejos, J.F. (1959). *Geografía de Costa Rica. Física, Política y Económica*: Imprenta Universal, San José.

Tristán, J. F. (1921). Apuntes sobre el Volcán Rincón de la Vieja. *Rev. Costa Rica*, 2(6), 161-168.

UCR (2013). Mapa digital de suelos de Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas. San José, Costa Rica.

Ui, T. (1989). Discrimination between debris avalanches and other volcanoclastic deposits. En Latter, J. H. (ed.): *Volcanic hazards*. IAVCEI Proceedings in Volcanology, Springer, 1, 201-209.

Ui, T., Takarada, S. y Yoshimoto, M. (2000). Debris avalanches. En: Sigurdsson, H. (ed.): *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, 617-626.

UNDRR (2009). *Terminología de la UNDRR sobre reducción del riesgo de desastres 2009*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres.

UNDRR (2011). *Informe de Evaluación Global sobre Reducción del Riesgo de Desastres 2011*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres

UNDRR (2013). *Informe de Evaluación Global sobre Reducción del Riesgo de Desastres 2013*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres.

UNDRR (2015). *Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres 2015*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres.

UNDRR (2017). *Terminología de la UNDRR sobre Reducción del Riesgo de Desastres 2017*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres.

UNDRR (2019). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), Geneva, Suiza.

UNISDR (2015). *Impacto de los desastres en América Latina y el Caribe 1990-2013. Tendencias y estadísticas para 22 países*. UNISDR, AECID, Corporación OSSO.

UNISDR (2017). *Cómo desarrollar ciudades más resilientes*. Manual para líderes de los gobiernos locales. United Nations Office for Disaster Reduction (UNISDR), Ginebra.

USAID (2019). *Material de referencia del curso de reducción del riesgo de desastres CRRD*. United States Agency International Development (versión 09/05/2019). USAID/OFDA/LAC.

U. S. National Weather Service (2013). Environmental Modeling Center, Global Forecast System. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php?branch=GFS>.

USGS OFR 2013-1122 ver 2.0: User's guide and reference to the Web interface of Ash3d-A three-dimensional model for atmospheric tephra transport and deposition. Open-file Report 2013-1122. Version 2.0, April 2021

Vallance, J. W. y Iverson, R. M. (2015). Lahars and their deposits. In *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (pp. 649-664).

Vargas, J. M. (1967). Aspectos de la Actividad Volcánica de Costa Rica en los últimos tiempos. *Efemérides Costarricenses*, 1(3), 18-25.

Vargas, A. y Alvarado, G. E. (2017). *Amenaza volcánica sobre las líneas de transmisión y subestaciones eléctricas del ICE, Costa Rica*. Área de Amenazas y Auscultación Sismológica y Volcánica, ICE, San José [Inf. Interno].

- Vargas, W. (2012). Vulnerabilidad de los sistemas vitales de Costa Rica: Infraestructura vial, energía eléctrica y telecomunicaciones. En Adamson, M. y Castillo, F. (eds.). *Desastres. Costa Rica en el tercer milenio: Desafíos y propuestas para la reducción de vulnerabilidad*. Contrastes Vivos de Costa Rica, pp. 76-126.
- Vargas, E., Rojas, J. y Ureña, B. (2016). Preparación de la población costarricense ante una erupción importante. Curso II semestre Diseño de Encuestas por Muestreo, Escuela de Estadística, Univ. Costa Rica (inédito).
- Waldron, H. H. (1967). Debris Flow and Erosion Control Problems Caused by the Ash Eruptions of Irazu Volcano, Costa Rica. *Geol. Surv. Bull.*, 1241-I, 1-37.
- Walker, G. P. L. (1971). Grain-size characteristics of pyroclastic deposits, *J. Geol.*, 79, 696-714.
- Walker, G. P. L. (1980). The Taupo pumice: Product of the most powerful known (ultraplinian) eruption? *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 8, 69-94.
- Walker, G. P. L. (1982). Volcanic hazards. *ISR Interdiscip. Sci. Rev.* 7, 148-157.
- Waring, G. A. (1965). *Thermal Springs of the United States and Other Countries of the World –A Summary*. Geol. Surv. Prof. Paper, 492.
- Wardman, J. B., Wilson, T. M., Bodger, P. S., Cole, J. W. y Johnston, D. M. (2011). Investigating the electrical conductivity of volcanic ash and its effect on HV power systems. *Phys. Chem. Earth.*, 45-46, 128-145.
- Wardman, J. B., Wilson, T. M., Bodger, P. S., Cole, J. W. y Stewart, C. (2012). Potential impacts from tephra fall to electric power systems: a review and mitigation strategies. *Bull. Volcanology*, 74(10), 2221-2241.
- Wardman, J., Wilson, T., Hardie, S. y Bodger, P. (2014). Influence of Volcanic Ash Contamination of the Flashover Voltage of HVAC Outdoor Suspension Insulators. *IEEE Transactions of Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(3), 1189-1197.
- Warrick, R. A. Anderson, J., Downing, T., Lyons, T., Ressler, J. y Warrick, T. (1981). *Four communities under ash. After Mount St. Helens*. Program on Technology, Environment and Man, Univ. Colorado, Inst. Behavioral Sci., Monograph 34.
- White, R. y McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 309, 139-155.
- Whiteman, C. D. (2000). *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. University Press, New York y Oxford. Doi: 10.1093/oso/9780195132717001
- Wieland, M. y Mueller, R. (2009). Dam safety, emergency action plans and water alarm systems. *Int. Water & Dam Construction*, enero, 34-38, www.waterpowermagazine.com.

- Wilcox, R. E. (1959). Some effects of recent volcanic ash falls with special reference to Alaska. *U. S. Geological Survey Bull.* 1028-N., 409-426.
- Wille, A. y Fuentes, G. (1975). Efecto de la ceniza del volcán Irazú (Costa Rica) en algunos insectos. *Rev. Biol. Tropical*, 23 (2), 165-175.
- Williams, S. N. y Self, S. (1983). The October 1902 Plinian eruption of Santa María volcano, Guatemala. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 16, 33-56.
- Williams, G.T., Kennedy, B.M., Wilson, T.M., Fitzgerald, R.H., Tsunematsu, K., y Teissier, A. (2017). Buildings vs. ballistics: Quantifying the vulnerability of buildings to volcanic ballistic impacts using field studies and pneumatic cannon experiments. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.06.026
- Williams-Jones, G. y Rymer, H. (2000). Hazards of volcanic gases. En Sigurdsson, H. (ed.). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press., pp. 997-1004.
- Williams-Jones, G. y Rymer, H. (2015). Hazards of Volcanic Gases. En Sigurdsson, H. (ed. 2^{da} edición). *The Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, pp. 985-992.
- Wilson, T. M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., Wardman, J., Wilson, G. y Barnard, S. T. (2012). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth*, 45-46, 5-23.
- Witham, C. S. (2005). Volcanic disasters and incidents: A new database. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 148(3-4), 191-233. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2005.04.017
- Wohletz, K. H., Sheridan, M. F. y Brown, W. K. (1989). Particle size distribution and the sequential fragmentation/transport theory applied to volcanic ash. *J. Geophys. Res.*, 94, 15703-15721.
- Wright, H. M. N., Cashman, K. V., Rosi, M. y Cioni, R. (2007). Breadcrust bombs as indicators of Vulcanian eruption dynamics at Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Bull. Volcanol.*, 69(3), 281-300, doi:10.1007/s00445-006-0073-6.
- Yglesias, M. y Chamizo, H. A. (2013). Riesgo de padecer enfermedades y síntomas respiratorios asociados a la exposición a dióxido de carbono y dióxido de azufre provenientes del volcán Turrialba, Costa Rica. *Horizonte Sanitario*, 12 (1), 7-13.
- Yglesias-González, M. y Chamizo-García, H. A. (2014). Susceptibilidad y síntomas respiratorios asociados a la exposición a dióxido de carbono y dióxido de azufre provenientes del volcán Turrialba, Costa Rica. *Población y Salud en Mesoamérica*, 12 (1), 118-138.
- Yokoyama, I., Tilling, R. I. y Scarpa, R. (1984). *International Mobile Early-Warning Systems for volcanic eruptions and related seismic activities*. Unesco, FP/2106-82-01 (2286).
- Zárate, E. (1988). Factores meteorológicos asociados a desastres causados por erupciones

volcánicas en Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 12(1-2), 41-52.

Zeledón, E. (2014). *Viajes por Costa Rica, tomo II (Por los caminos de Costa Rica 1)*. EUNED, San José.

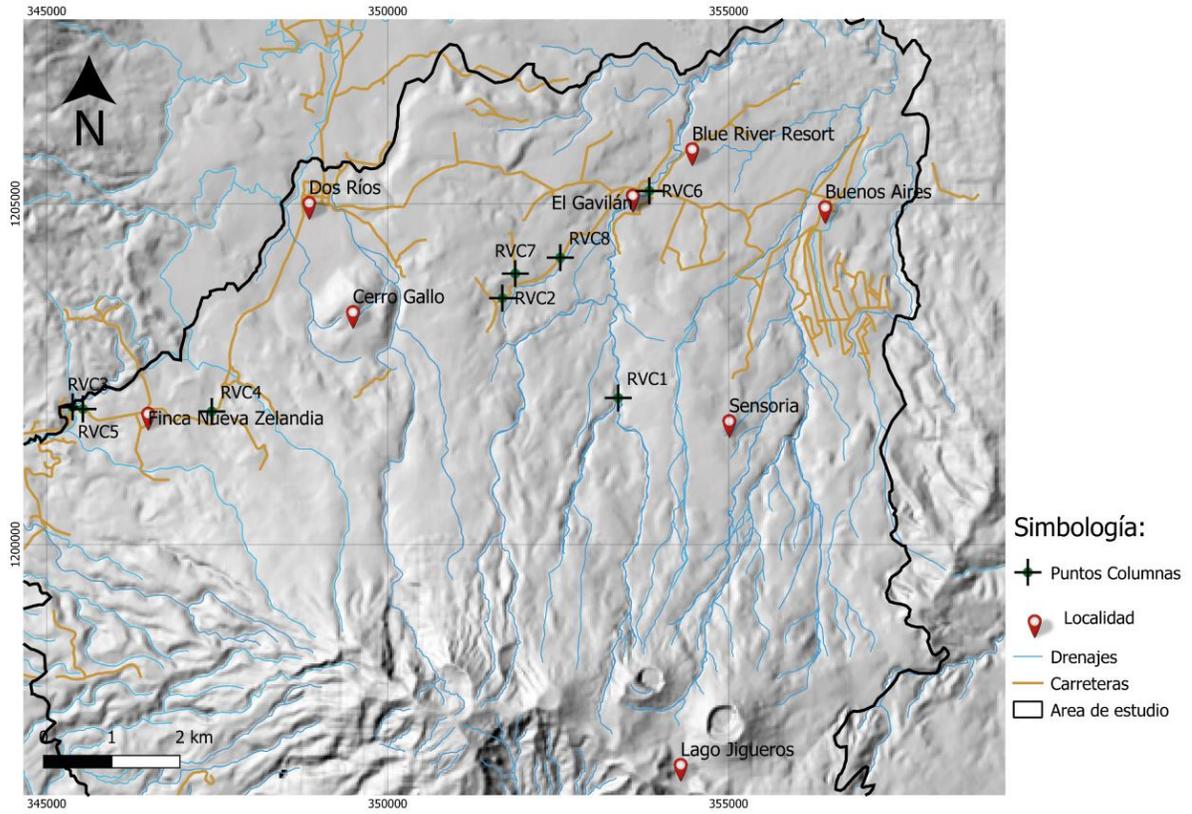
Zimmer, M. M. (2002). *Volatile chemistry of the Costa Rican segment of the Central American volcanic arc* (Tesis de M. Sc.). The Univ. of New Mexico, Albuquerque.

Zimmer, M. M., Fisher, T. P., Hilton, D. H., Alvarado, G.E., Sharp, Z. D. & Walker, J. A. (2004). Nitrogen systematics and gas fluxes of subduction zones: Insights from Costa Rica arc volatiles. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(5), 1-19, doi: 10.1029/2003GC000651.

Zobin, V. M. (2001). Seismic hazard of volcanic activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 112, 1-14.

14. ANEXOS

APÉNDICE 1



m	Granulometría			Descripciones
	mm	cm	dm	
0				Suelo orgánico café.
0.40				Arenas con gravas color café, mal seleccionadas.
0.60				Gravas subredondadas color gris, mal seleccionadas.
0.80				Suelo color café con arenas y gravas, mal seleccionadas.
1.2				Arenas gravosas con niveles locales de óxido de hierro irregulares, color gris con guijarros subredondeados.
1.9				Arenas color gris lenticular, con guijarros pequeños.
1.35				Arenas volcánicas finas, a los 15 cm se encuentra la capa de lapilli acrecional de 2 a 4 cm, y ceniza fina intercalada con arenas medias, con lentees de arena gruesa y laminación paralela a cruzada y laminación inclinada, discontinua.
1.95				Arenas gruesas color rojizo con clastos, mal seleccionados.
2.2				Intercalaciones de arenas finas a gruesas.
2.45				Arenas masivas gruesas con bloques flotantes, mal seleccionados.
2.75				Arenas color rojizo.
3.25				Arenas color gris.
3.65				

RVC8

Coordenadas en WGS84: (10.88734522, -85.34888248).

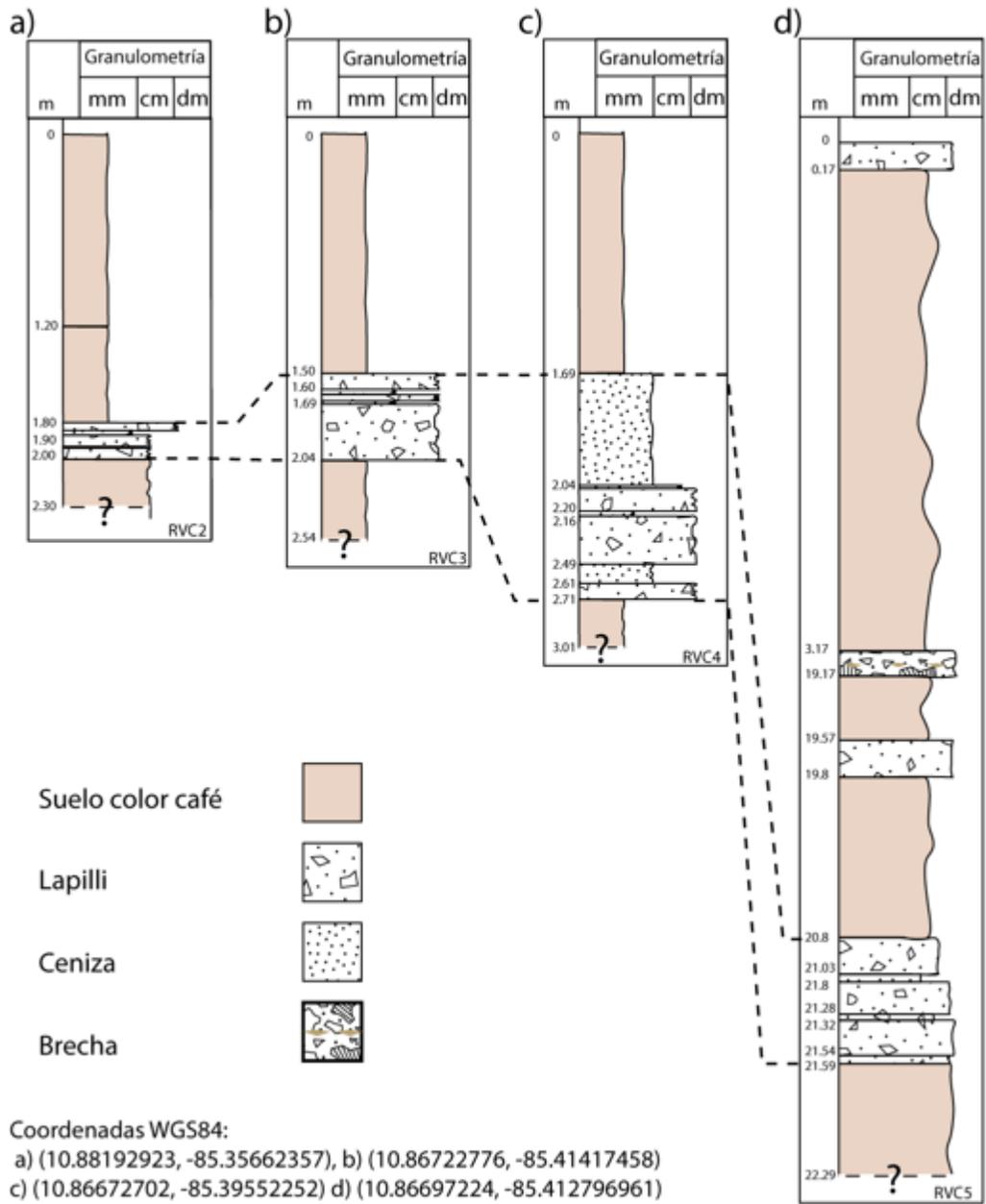
a)

m	Granulometría			Descripciones
	mm	cm	dm	
0				Colada de lava No se observa el contacto
0.50				Suelo color café.
0.65				Ceniza fina, color naranja fuertemente meteorizada.
0.85				Toba con lapilli color café a muy meteorizada.
1.30				Lapilli, sin gradacion aparente, masiva, color naranja con ceniza gruesa.
2.00				Suelo color café grisáceo, arcilloso.

Coordenadas WGS84:
a) (10.89623038, -85.336986),
b) (10.88519571, -85.35491107).

b)

m	Granulometría			Descripciones
	mm	cm	dm	
0				Suelo color café (presencia de bloques)
0.30				Capa dura de ceniza, color naranja meteorizada.
0.45				Toba con lapilli color café muy meteorizada.
0.53				Suelo color café grisáceo, arcilloso.
1.10				Bloques centimétricos a métricos posible colada de lava.
1.80				



m	Granulometría			Descripciones
	mm	cm	dm	
0				Suelo con bloques métricos y decimétricos mal seleccionados.
0.28				Lapilli fino con lentes de lapilli medio color café, meteorizada.
0.43				Lapilli medio color naranja, muy meteorizada.
0.63				Lapilli medio con intercalaciones de lapilli fino color café a naranja.
0.75				Laminaciones de lapilli fino, color amarillento.
0.84				Lapilli grueso, con gradación normal con bloques matriz soportados de 5 a 10 cm redondeados color amarillento. (espesor variable de 0.7 a 1.20 m).
1.54				Ceniza, color amarillento, con acuñamiento.
1.64				Material fino color negro agris, posiblemente de origen orgánico.
1.65				Ceniza media.
1.73				Ceniza media.
1.80				Ceniza media.
1.88				Toba con lapilli fina, color de café a rojiza.
2.00				Lapilli de fino a medio, color amarillento con clastos redondeados.
2.19				Lapilli grueso grisáceo intercalada con clastos decimétricos
2.35				Conglomerado con bloques decimétricos.
2.54				Lapilli grueso.
2.69				Conglomerado con bloques decimétricos
				Ceniza, meteorizadas.
				Conglomerado con bloques decimétricos
3.89				Colada de lava masiva.

RVC1

Coordenadas WGS84: (10.86876428, -85.34103607).

APÉNDICE 2

Para generar los 7 mapas simulados de cada hora (11 a. m. y 3 p. m.) se usaron las granulometrías presentadas en el Cuadro 7 de Soto et al. (2003a), resumidas en el cuadro 1. Si la velocidad horizontal del viento es mayor que la velocidad vertical de subida de la columna, la columna se denomina débil y se dobla pues la columna vertical no se puede desarrollar, mezclándose con la corriente turbulenta de aire que la transporta. En algunos casos, erupciones menores llegan a tener formas irregulares al ser susceptibles a las condiciones locales de la atmósfera. Por ende, pueden mostrar más de un lóbulo a diferentes alturas, debido a los cortantes del viento. La combinación de un viento horizontal con una corriente vertical puede originar vorticidad que ocasionalmente se manifiesta en una línea de tornados al margen de la pluma, como sucedió en las plumas débiles generadas la erupción del Surtsey en 1963.

Se observa que, además de la zona con alta concentración de material cerca del cráter, hay un segundo máximo. Los depósitos de tefra de las subplinianas consisten en varias capas de caída de ceniza, caracterizados por su propio eje de dispersión. Generalmente los depósitos están estratificados debido a la variación del tamaño de grano (Cioni y Pistolesi, 2015). Las plumas débiles generan depósitos estrechos muy alargados en la dirección del viento. Los bloques, lapilli y ceniza gruesa provienen de la sección curva de la pluma que puede extenderse por unas decenas de kilómetros (Bonadonna et al., 2015, p. 589). Todo esto sugiere una columna débil, doblada por efecto del viento según lo describe Bursik (2001), que el segundo máximo está asociado al transporte de lapilli por una corriente de aire más veloz rotada hacia el oeste, y que estaría encima de la capa que arrastró el lapilli para el primer lóbulo. Así, la parte de la columna que queda expuesta a la capa de viento será más larga que solo el ancho de la banda (como sería el caso si la columna es vertical). Los semi-ejes mayores de los dos máximos son casi paralelos en los dos mapas, porque los lóbulos asociados también lo son.

Conforme la columna se desplaza en la dirección del viento, su velocidad se acerca a la del viento, dando lugar a esfuerzos cortantes entre la atmósfera y los bordes superior e inferior de la pluma que va disminuyendo el contraste de densidad entre ambos. De esta forma la pluma es arrastrada como una lente de aerosoles y gas con un ancho constante. Esta forma elongada de las plumas (o bandas) se observó durante la erupción de El Chichón del 28 marzo de 1982, México, que produjo columnas eruptivas entre 17 y 31 km de altura (Matson, 1982). El patrón de los 3 lóbulos lo asociamos al arrastre de material por 3 capas de viento sucesivas en que la primera (de norte hacia el oeste) estaría a menor altura, la segunda estaría a una altura mayor, y la tercera estaría aún más alta.

Sin embargo, a las 11 a. m. los 3 lóbulos rotan en dirección tierra adentro posiblemente porque la tierra calienta el aire sobre ella por convección. El aire sobre el mar tiene relativamente una presión mayor, haciendo que el aire cerca de la costa fluya hacia la región con menor presión, o sea sobre la tierra. A las 3 pm la tierra se ha enfriado en tanto el océano, por la alta capacidad térmica, se mantiene caliente por lo que el patrón de los 3 lóbulos, prácticamente idéntico al de las 11 a. m., rota como un todo alejándose de la costa, por efecto de la brisa mar-tierra que se produce por la diferencia de temperatura. entre las dos partes.

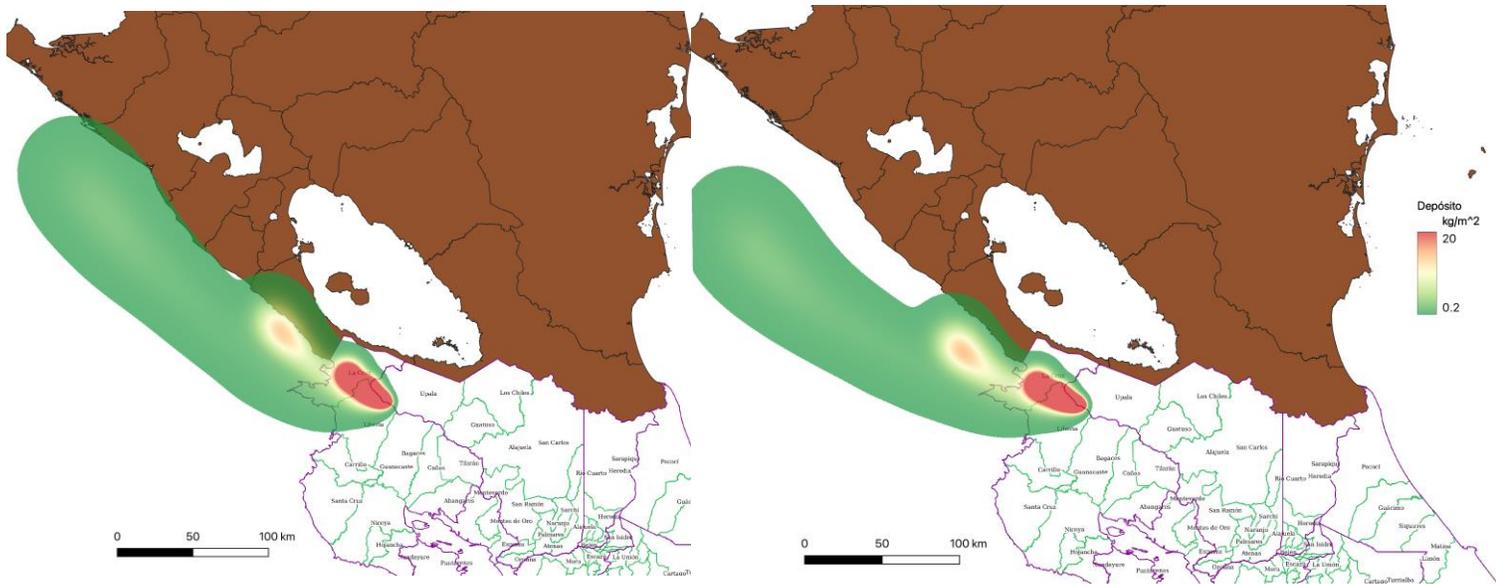


Figura A-1 Simulación de caída de ceniza según granulometría asociada a la capa ii inf. A la izquierda con el patrón de vientos presente el 28 marzo 2022 a las 11 a. m., y a la derecha con el presente a las 3 p. m. de ese mismo día.

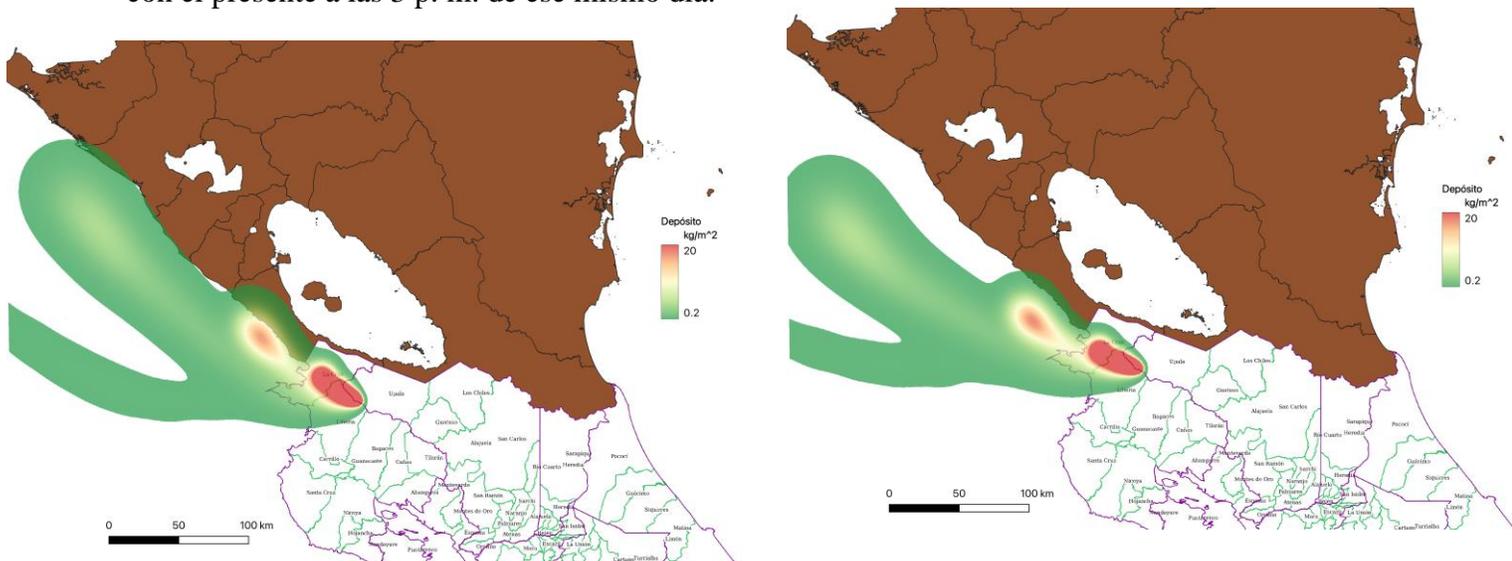


Figura A-2: Simulación de caída de ceniza según granulometría asociada a la capa ii sup. A la izquierda con el patrón de vientos presente el 28 marzo 2022 (11 a. m.), y a la derecha con el presente a las 3 p. m. de ese mismo día. El cambio de la granulometría lleva a que además de los 3 lóbulos resultantes para la capa ii- inf, aparezca un cuarto lóbulo claramente separado de los otros 3. En el caso de El Chichón, Schneider et al. (1999) asociaron los diversos lóbulos detectados en la atmósfera a eventos eruptivos diferentes. El hecho que el patrón constituido por los 3 primeros lóbulos sea muy similar al generado por la granulometría de la capa ii inf., sugiere que el material de la capa ii sup puede ser la mezcla de material de erupciones similares a las que generaron la capa ii inf y de otra que generó el lóbulo adicional. Puede ser también la mezcla del material de la nueva erupción con material de la capa ii inf que se retrabajó por efecto del viento.

Capa iii

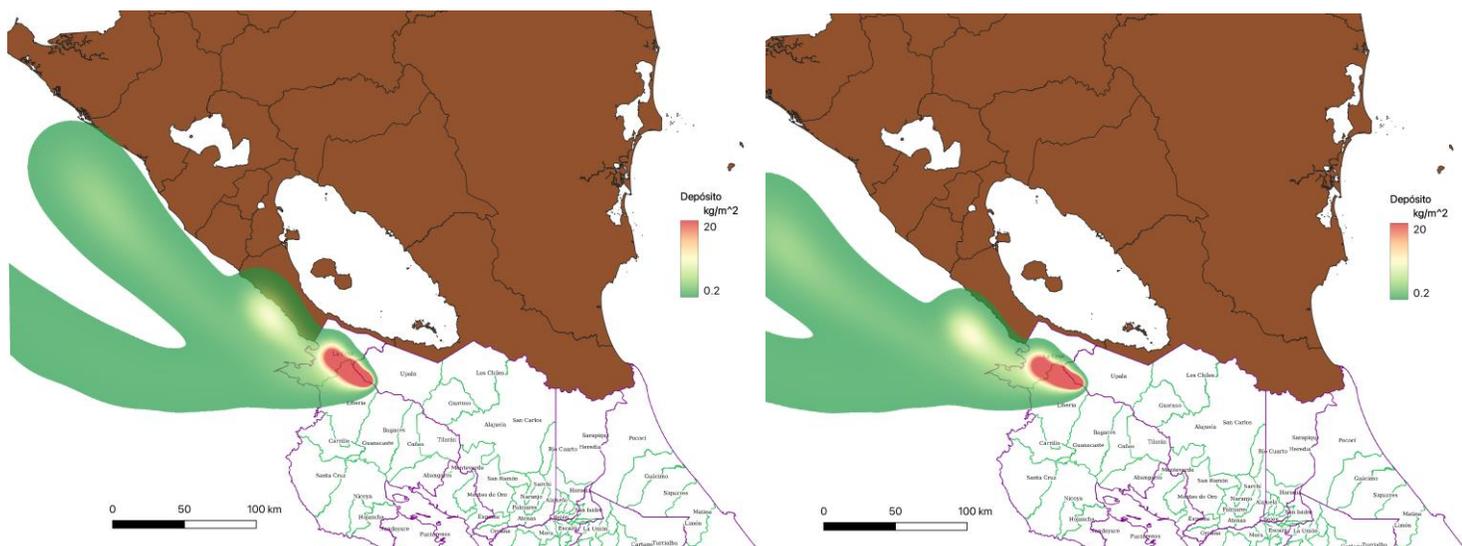


Figura A-3 Simulación de caída de ceniza según granulometría asociada a la capa iii. A la izquierda con el patrón de vientos presente el 28 marzo 2022 a las 11 a. m., y a la derecha con el presente a las 3 p. m. de ese mismo día.

El efecto de la diferente capacidad calórica de la tierra y el mar nuevamente queda en evidencia, a pesar de que la granulometría cambió, al rotarse todo el patrón de caída de ceniza en la dirección contraria a las agujas del reloj. En este caso, el segundo máximo no es muy visible, prueba de que aparece como efecto de la granulometría inicial.

Capa iv inf

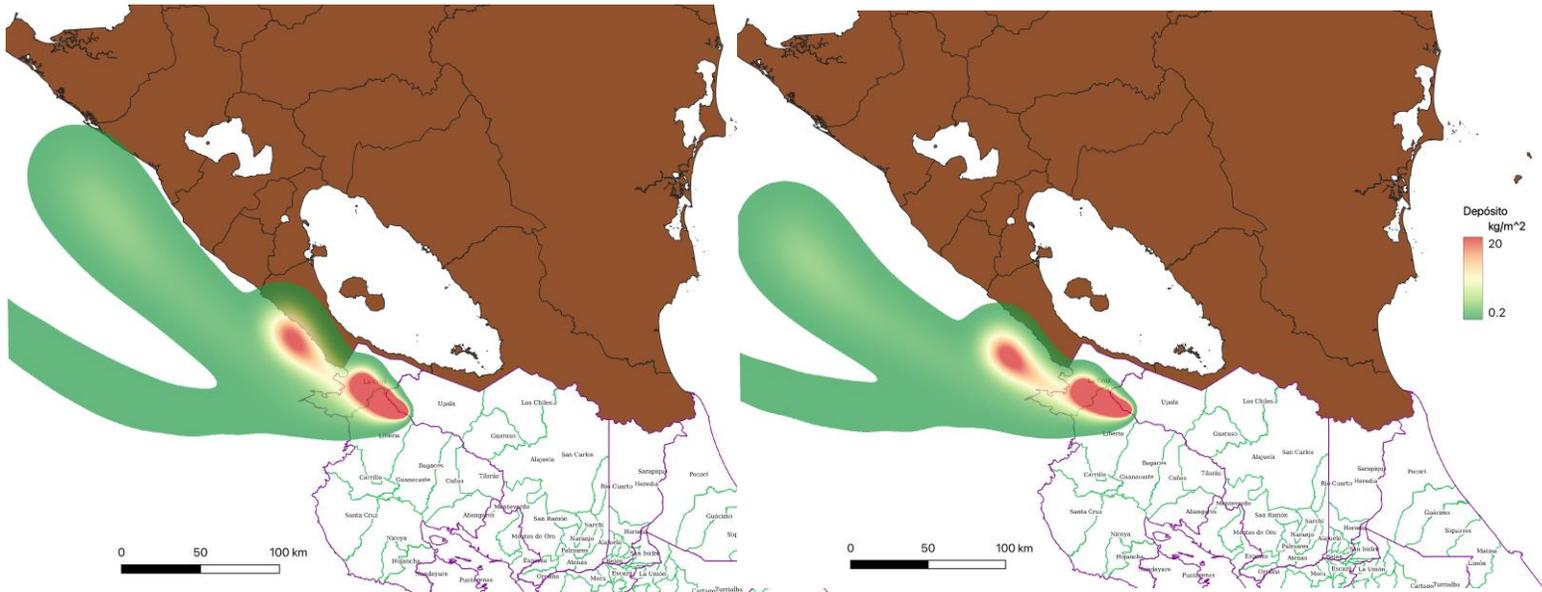


Fig. A-4 Simulación de caída de ceniza según granulometría asociada a la capa iv inf. A la izquierda con el patrón de vientos presente el 28 marzo 2022 a las 11 a. m., y a la derecha con el presente a las 3 p. m. de ese mismo día. Con esta granulometría, el segundo máximo está claramente presente.

Mapa iv med

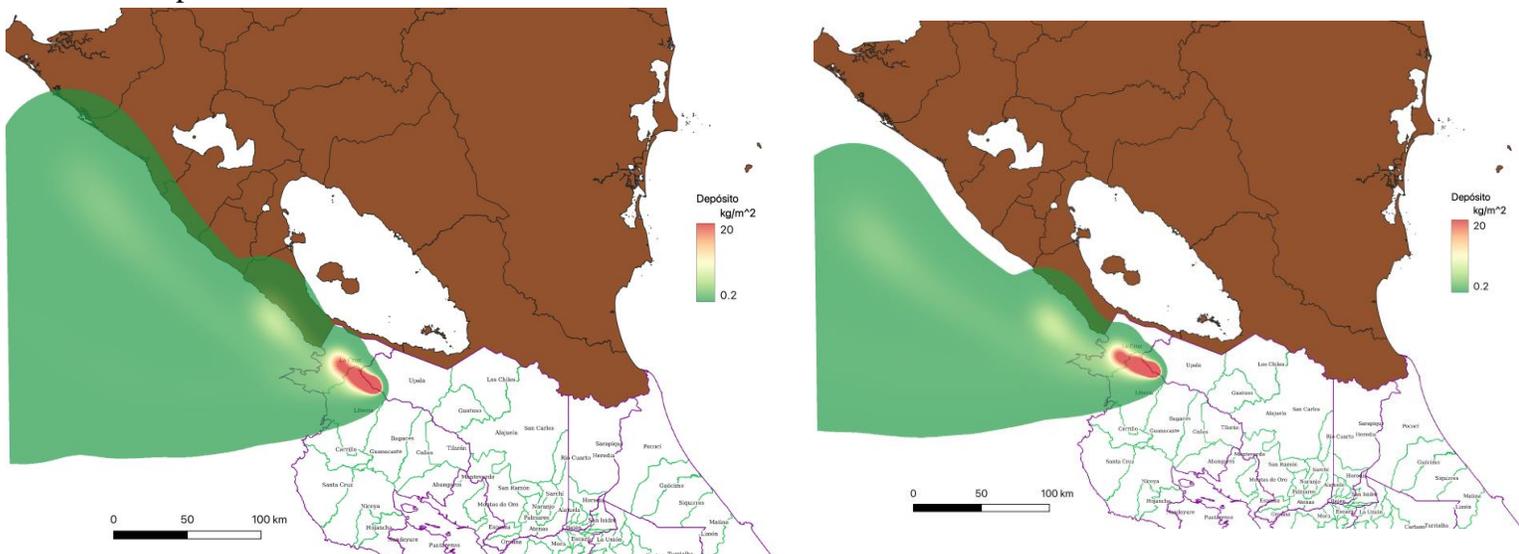


Figura A-5 Simulación de caída de ceniza según granulometría asociada a la capa ii inf. A la izquierda con el patrón de vientos presente el 28 marzo 2022 a las 11 a. m., y a la derecha con el presente a las 3 pm de ese mismo día. El segundo máximo apenas se nota. El máximo principal es más alargado y estrecho que el que se observa en la Fig. A-3, y es más largo en la simulación de las 10 am que en la de las 3 p. m.

Capa iv sup

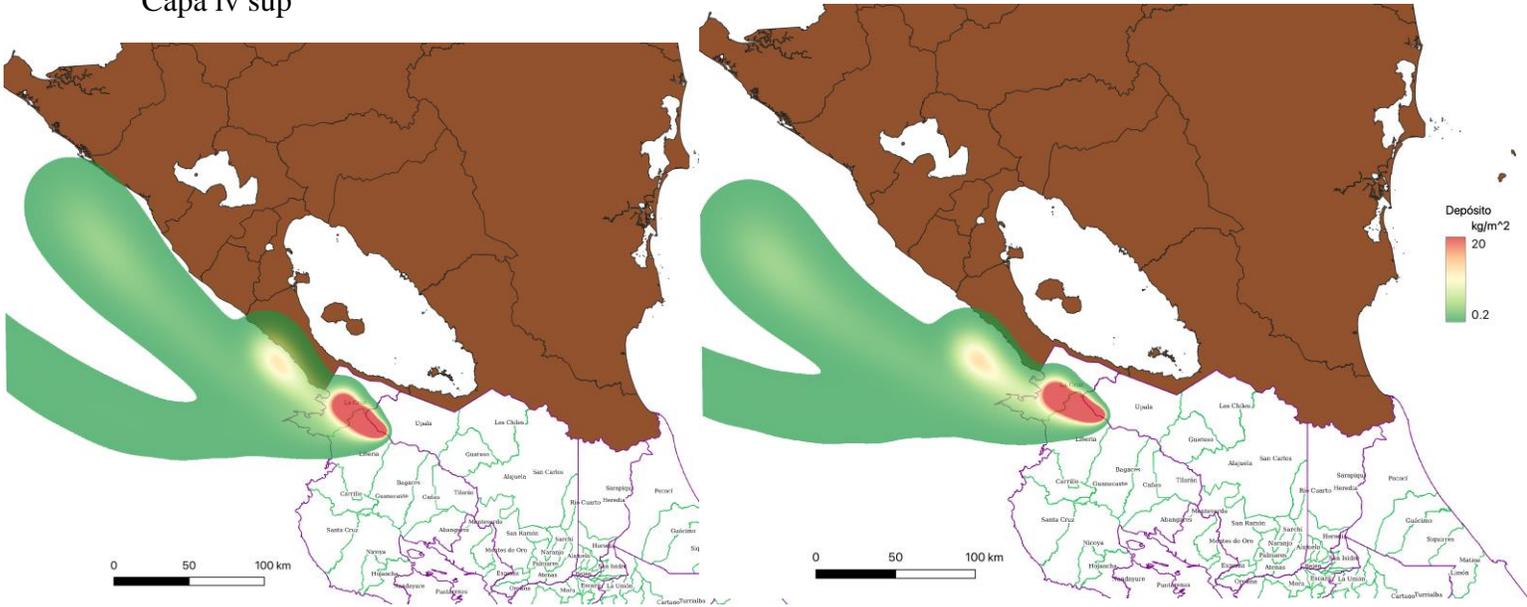


Figura A-6 Simulación de caída de ceniza según granulometría asociada a la capa iv sup. A la izquierda con el patrón de vientos presente el 28 marzo 2022 a las 11 am, y a la derecha con el presente a las 3 pm de ese mismo día. El ancho del máximo principal es mayor que el que se observa en la Fig A-5, el largo es similar, apuntando a que para definirlo con mayor exactitud este tipo de simulaciones deben llevarse a cabo para diferentes días a través del año.

Capa vi

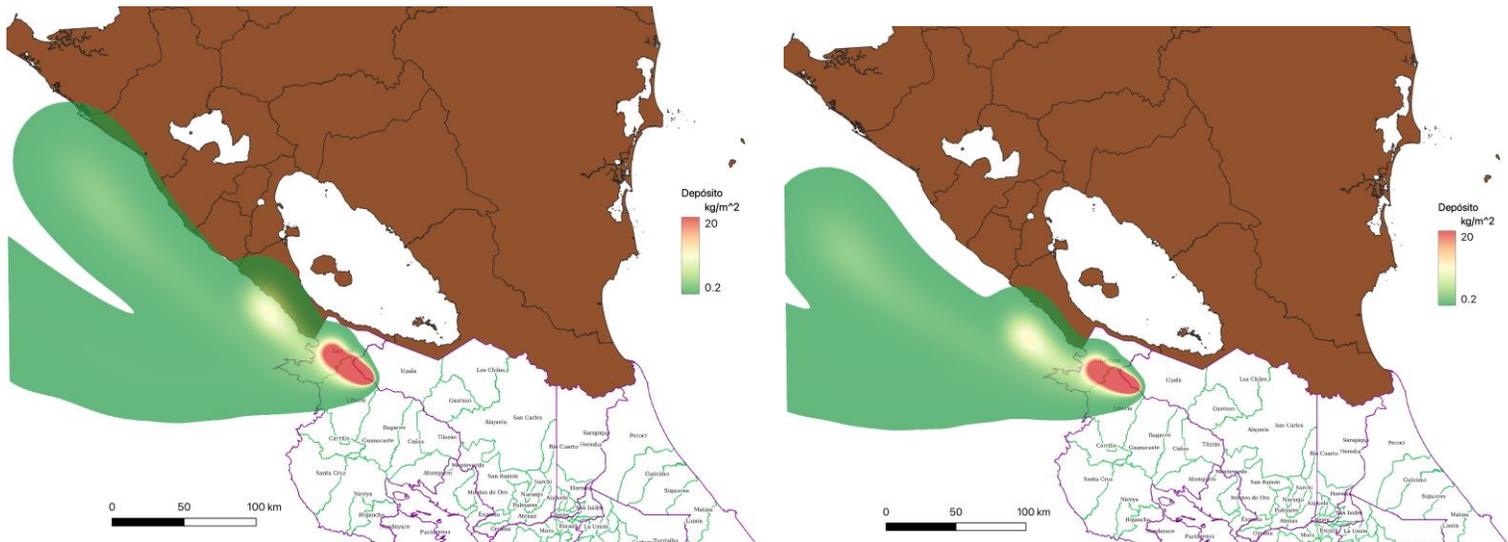


Figura A-7 Simulación de caída de ceniza según granulometría asociada a la capa vi. A la izquierda con el patrón de vientos presente el 28 marzo 2022 a las 11 am, y a la derecha con el presente a las 3 pm de ese mismo día.

APÉNDICE 3

La topografía local, así como las condiciones atmosféricas generalmente prevalecientes sobre el cráter hace difícil el recolectar muestras representativas de las frecuentes cortas erupciones freáticas que se han estado dando en los últimos años, generalmente asociadas a columnas de 1 a 2 kilómetros de altura.

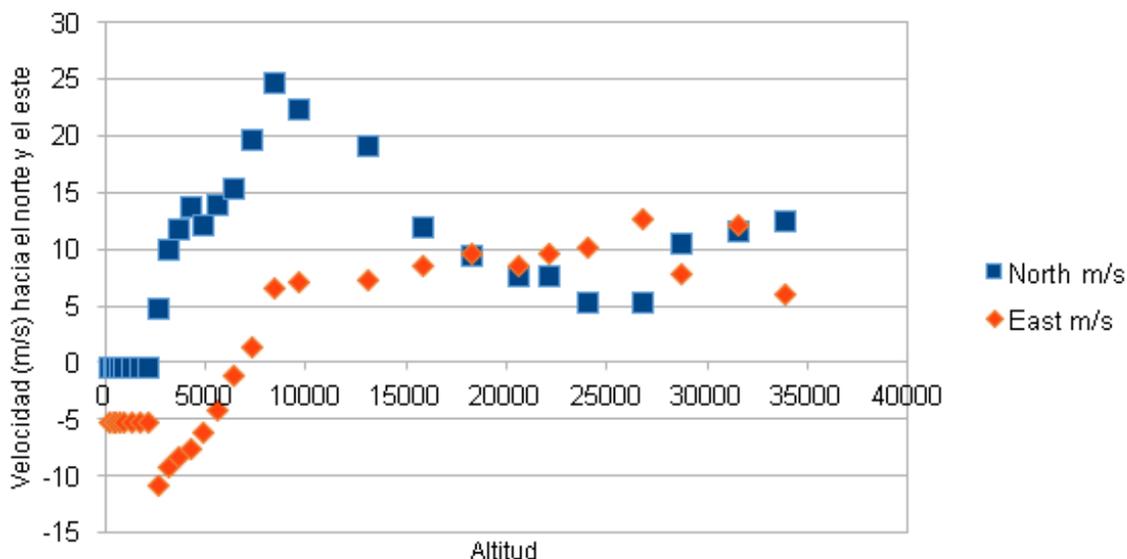
Como una primera aproximación se hará uso de la muestra MRV47, asociada a una pliniana recolectada en un punto alejado del cráter, para generar una simulación de una erupción de 3 km de altura, con el patrón de vientos presente el día 28 junio 2021 a las 6 a. m.

Para ello contratamos una granulometría de la muestra con el mayor detalle, obteniéndose los resultados mostrados en el cuadro siguiente. Las densidades fueron asignadas usando de guía algunas simulaciones de otros eventos.

Tamaño PHI	% en peso	Densidad kg m ⁻³
-5	1,04	2600
-4	2,08	2600
-3,5	5,21	2600
-3	3,13	2200
2,5	12,5	2200
2	6,25	2000
-1,5	15,63	2000
-1	7,29	1800
-0,5	21,88	1800
0	13,54	1600
0,5	8,33	1600
1	2,06	1400
1,5	1,04	1400

Aunque las freáticas observadas han durado unos pocos minutos, para la simulación se eligió una duración de 1 hora para asegurarnos que la relación señal/ruido fuese lo suficientemente alta como para que los efectos de la aleatoriedad de las trayectorias calculadas tengan poco impacto en el resultado.

El patrón de vientos en función de la altura, para el 28 de junio del 2021 es:



Nótese que nuevamente solo hay una componente hacia el W en los primeros 3 km de altitud, que induce a pensar que los vientos predominantes son hacia el oeste. Sin embargo, de los 6 km invierte sentido y de ahí para arriba es una componente E.

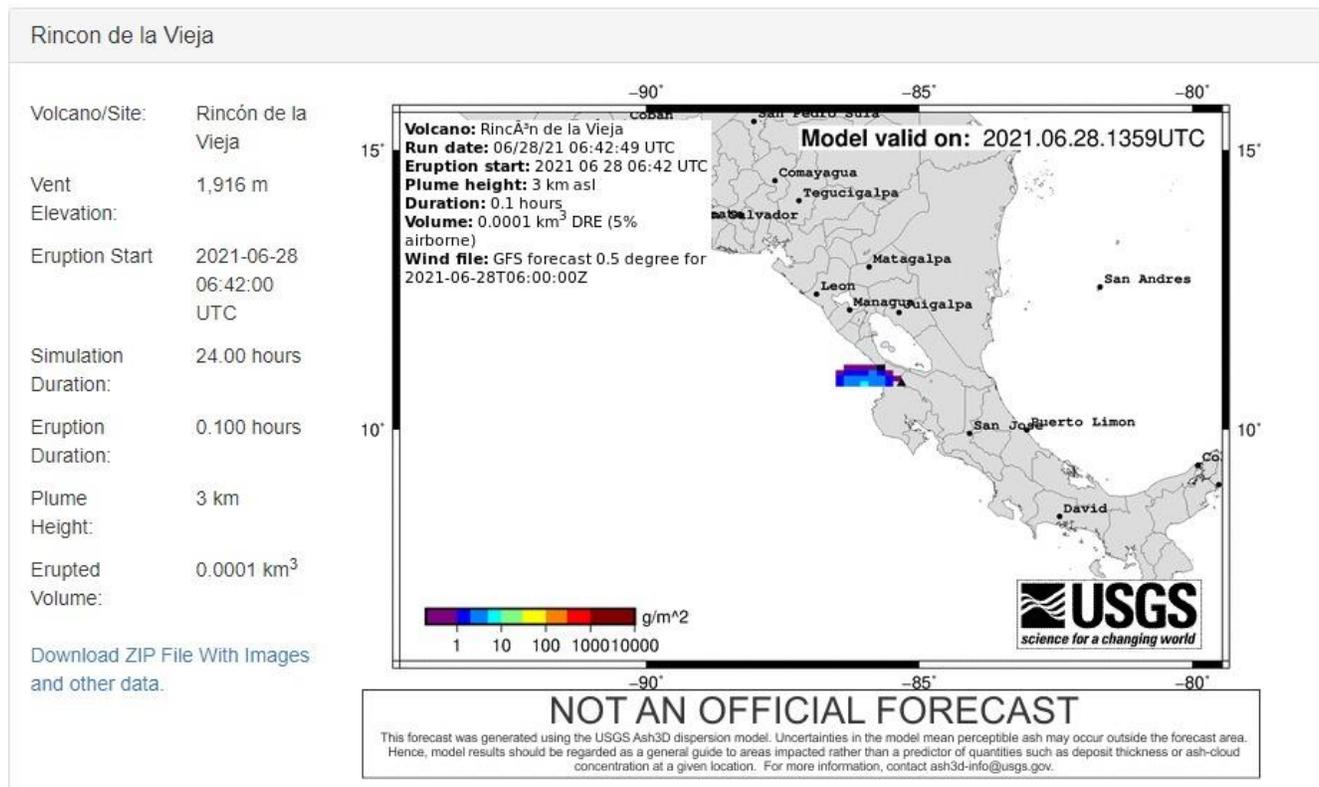
A alturas mayores a 3 km se mide una componente norte de 5 m/s que aumenta hasta los 25 m/s a una altitud de 9 km.

Este patrón de vientos coincide con lo reportado por el OVSICORI, al indicar que la pluma se desplazó hacia el N y el NW, a altitudes menores a 7 km sobre el nivel del mar.

Descripción de la erupción Dentro de este último ciclo eruptivo del volcán Rincón de la Vieja, la pasada erupción del 28 de junio es la más energética del ciclo. Las características de esta erupción se describen en el reporte del OVSICORI-UNA el 28 de junio. La erupción principal ocurrió a las 5:42 AM con una duración de 90 segundos, seguida a las 6:03 por una explosión menor. El evento principal generó una pluma densa que se levantó por 2000 m antes de caer, y una pluma “termalmente boyante” que subió hasta 5000 m por encima del cráter (7000 m snm). Esta pluma se dispersó principalmente hacia el norte y noroeste generando caída de ceniza sobre los pueblos de la zona. El material que arrojado generó lahares que bajaron por los ríos alrededor del cráter activo.

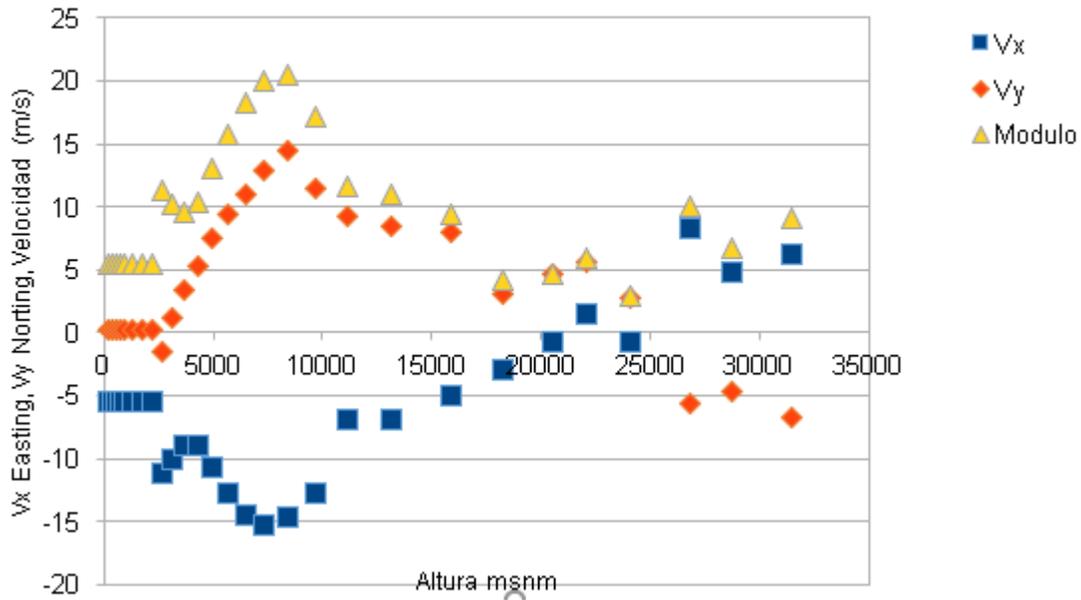
(Erupción en el Volcán Rincón de la Vieja del 28 de junio del 2021, 5:42 am Actualización el 2 de julio del 2021)

Esta dispersión de ceniza observada en campo no parece concordar con la dispersión calculada por medio del ASH3D.



Se piensa que esta falta de concordancia puede atribuirse a que en el manual de uso de ASH3D se advierte que el modelo solo abarca 1.3 veces la altura de la columna, o sea solo altitudes menores a 4 km sobre el nivel del mar, y solo considera 7 capas de viento a partir del nivel del mar. Así prácticamente solo se considera una capa con 0 m/s en componente N y 10 m/s en componente W. De haber incluido las 16 capas de viento que utilizamos desde el nivel del mar hasta los 7300 m s.n.m., la altitud de la pluma “termalmente boyante” que OVSICORI informó, se hubiera tomado en cuenta el aumento de la componente N así como la disminución de la componente W con la altitud. Es razonable pensar que las partículas que generaron la caída de 0.1 a 1 gm⁻², al ser pequeñas y posiblemente alcanzar la parte más alta de la pluma, por lo que se hubieran desplazado marcadamente hacia el norte y nunca hacia el W como se calculó con el modelo ASH3D, y menos de manera perpendicular y no paralelamente a la costa.

Comparando con el patrón de vientos medido a las 11 a. m. el 28 marzo 2022 se observa en ambos la componente N aumenta con la altura para luego decrecer. La componente este del 28 junio, por su parte, empieza hacia el W, va decreciendo hasta invertir el sentido y aumentar, muy diferente a lo que se midió el 28 marzo 2022



El correspondiente mapa generado al utilizar FALL3D se presenta a continuación:

