

AMENAZA VOLCÁNICA A LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL ARENAL

Gerardo J. Soto¹ & Linda Sjöbohm²

RESUMEN

Los eventos volcánicos pueden tener efectos primarios directos (daños materiales) e indirectos (suspensión del transporte), y secundarios (impacto económico) en los corredores e infraestructura viales alrededor de los volcanes. El volcán Arenal, en erupción desde julio de 1968 al presente, está en un área que ha pasado de una modalidad de ocupación rural a urbana-rural, donde la población expuesta a las amenazas volcánicas se acerca a 12 000 personas, en la vecindad de una de las mayores plantas hidroeléctricas del país. Además, el área experimenta una creciente industria turística, por lo que la infraestructura vial (~30 km de carreteras, 10 puentes) es de primordial importancia para todas estas actividades. Los efectos directos posibles sobre la infraestructura vial serían causados por la caída de piroclastos y bombardeo balístico, flujos piroclásticos, lahares, lavas, deslizamientos, avalanchas y sismos volcánicos. Con base en el mapa de peligros volcánicos con escenario de corto plazo, se consideran varias situaciones posibles que generen daños temporales o irreversibles a la infraestructura vial en los alrededores del volcán Arenal. Los puntos o zonas más vulnerables donde pueden ocurrir daños a la red vial son: 1) Quebrada Guillermina, 2) Río Tabacón, 3) entre el cruce al volcán y el río Aguacaliente, y 4) río Aguacaliente. Los primeros dos se encuentran sobre la ruta principal La Fortuna – Sangregado, y podrían ser afectados principalmente por flujos piroclásticos o lahares, que obstruirían los drenajes, erosionarían terraplenes, causarían el derretimiento de asfalto, y la obstrucción o destrucción de caminos y puentes. Se consideran los puntos más vulnerables. Los dos sitios restantes se consideran que podrían ser afectados por caída de piroclastos, lavas, flujos piroclásticos, avalanchas, y sobre todo lahares en el caso del río Aguacaliente, con efectos similares. Como parte de la gestión del riesgo, se proponen rutas de escape posibles. Las estructuras viales en el sector norte del Arenal, a una distancia de 3-4,5 km, tienen un riesgo de bajo a moderado ante flujos piroclásticos, y en el cuadrante SW, un riesgo muy bajo a bajo por flujos piroclásticos, pero probablemente se eleva a moderado, si incluimos los lahares en el río Aguacaliente.

ABSTRACT

Volcanic events can produce primary direct (material damage) and indirect effects (transportation suspension), and secondary effects (impact to economy) in the vial corridors and infrastructure surrounding the volcanoes. Arenal volcano, in eruption since July 1968 to present, is an area that has evolved from a rural situation to an urban-rural situation, where the exposed population to volcanic hazards is around 12 000 people, in the vicinity of one of the most important hydroelectric plants, and under a growing tourist industry, where the vial infrastructure (~30 km of roads, 10 bridges) is of key importance for all these activities. The possible direct effects would be caused by tephra-fall and ballistic

¹ Geólogo consultor, Apdo. 360-2350 San Francisco de Dos Ríos, Costa Rica. Tel.: +506-280-0128; correo-e: katomirodriguez@yahoo.com.

² Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Apdo. 5258-1000 San José, Costa Rica. Actualmente geóloga consultora, Apdo. 608-2100 Guadalupe; correo-e: sjobohm76@yahoo.com.

bombardment, pyroclastic flows, lahars, lavas, rockslides, avalanches and volcanic earthquakes. According to the volcanic hazards map for the short-term scenario, several possible situations that would cause transient or irreversible damage to vial infrastructure in the surroundings of Arenal volcano have been considered. The most vulnerable spots are: 1) Guillermina creek, 2) Tabacón river, 3) between the crossroad to the volcano and Aguacaliente river, and 4) Aguacaliente river. The first two sites are on the main route La Fortuna – Sangregado, and could be affected mainly by pyroclastic flows and lahars, that would damage or obstruct the draining structures, erode embankments, melt pavements, and obstruct or destroy roads and bridges. They are considered as the two most vulnerable sites. The two latter ones could be affected by tephra-fall, pyroclastic flows, lavas, avalanches, and mainly lahars in the Aguacaliente river, with similar effects. As part of the risk management, possible escape routes are proposed. Vial structures in the northern side of Arenal, between 3-4.5 km, have a high to moderate risk for pyroclastic flows, and very low to low in the SW quadrangle, but it probably rises to moderate if we include lahars in the Aguacaliente river.

INTRODUCCIÓN

Los eventos volcánicos pueden tener efectos primarios directos e indirectos, y secundarios en los corredores e infraestructura viales alrededor de los volcanes. Los directos implican los daños materiales de la infraestructura vial (pavimentos, terraplenes, alcantarillas, puentes); los indirectos, la suspensión del servicio de transporte público, privado y de turismo, y los secundarios, el impacto sobre la economía local, que es principalmente en las actividades agrícolas, ganaderas, y en el turismo. A pesar de que las consecuencias indirectas y secundarias representarían un importante golpe a la economía local, regional y hasta nacional, su evalúo es difícil, pues usualmente abarca periodos de afectación prolongados después de los eventos que produjeron la disrupción. Los efectos directos posibles se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Posibles efectos directos de los eventos volcánicos sobre la infraestructura vial.

Tipo de evento	Efectos	Componentes de la infraestructura vial vulnerable
Caída de piroclastos y bombardeo balístico	Baja visibilidad en la circulación de caminos, recubrimiento de ceniza y destrucción por impacto de puentes y caminos.	Caminos Puentes Estructuras de drenaje Terraplenes Pavimentos
Flujos piroclásticos	Sedimentación y obstrucción de desagües. Erosión de terraplenes. Derretimiento de asfalto. Obstrucción o destrucción de caminos y puentes.	
Lahares	Destrucción y arrastre de puentes, inundación. Falla estructural, obstrucción y destrucción de terraplenes y puentes.	
Lavas	Obstrucción de caminos, derretimiento del asfalto, destrucción de puentes.	
Deslizamientos volcánicos, avalanchas volcánicas	Obstrucción de caminos, destrucción de puentes.	
Sismos volcánicos	Fallas por deslizamiento en la base de caminos y puentes, obstrucción y destrucción de puentes.	

EL CASO DEL VOLCÁN ARENAL

El Arenal, un volcán joven de 7000 años de existencia, con una alta tasa de eruptividad [6], inició una nueva erupción en julio de 1968 que se prolonga al presente. Se localiza al noroeste de Costa Rica (Fig. 1), en un área que ha pasado de una modalidad de ocupación rural a urbana-rural, en la vecindad de una de las mayores plantas hidroeléctricas del país (el Proyecto Hidroeléctrico Arenal del Instituto Costarricense de Electricidad, finiquitado en 1978), y sometida a una creciente industria turística centrada principalmente en la actividad volcánica y las bellezas escénicas. La población expuesta –incluidos pobladores y turistas- a las amenazas se acerca a 12 000 personas.

Ha habido, por tanto, una preocupación por los peligros volcánicos, su cartografía y la zonificación del uso del suelo, una prioridad desde el decenio de los años 1990. En el 2001 aparecieron el reglamento “Uso de suelos en los alrededores del Volcán Arenal”, y las “Restricciones para el uso del suelo en los alrededores del Volcán Arenal” (*La Gaceta*, 11 de enero, pp. 41-47), suscritos por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). La propuesta de utilización de las áreas de mayor amenaza en el entorno de la región, toma en cuenta no solo las condiciones del riesgo (amenaza * vulnerabilidad), sino también los usos históricos del suelo en la región desde antes que se iniciara el actual periodo eruptivo.

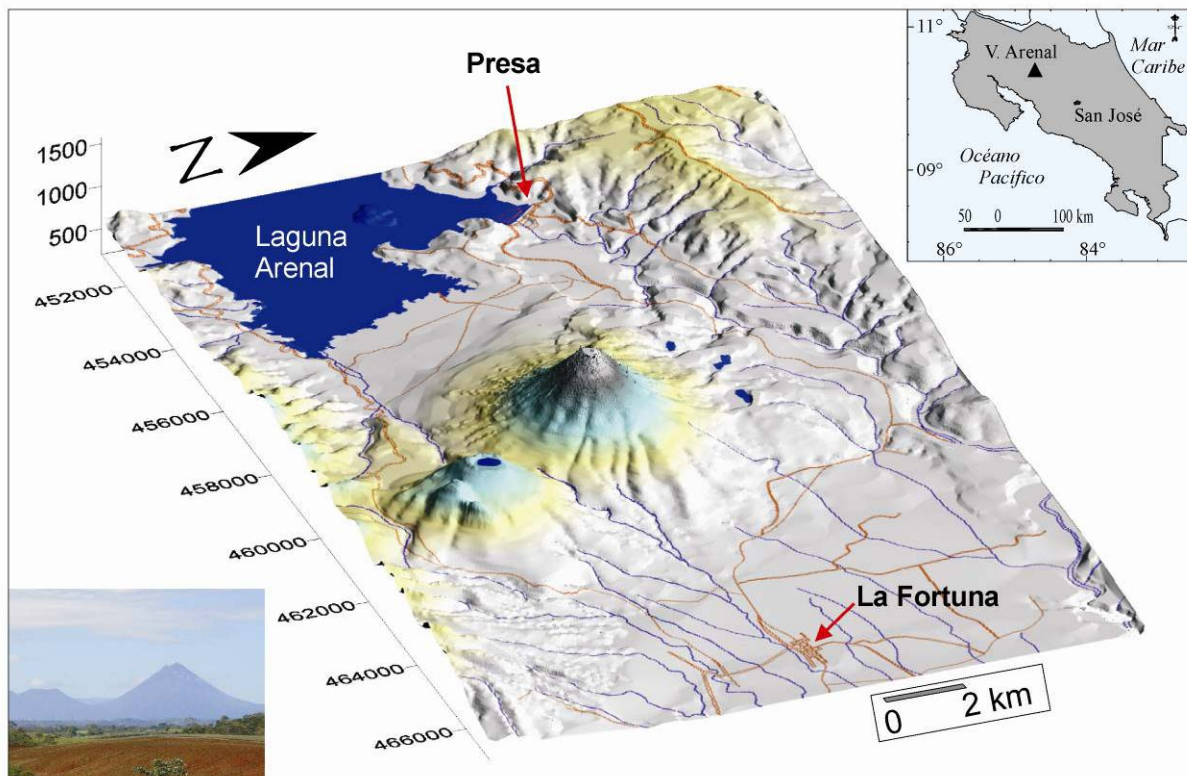


Figura 1. Ubicación regional del Arenal (inserto superior derecho), vista panorámica desde el noreste (inserto inferior izquierdo: el Chato a la izquierda y el Arenal a la derecha), y el mapa topográfico en 3D, con la red vial en marrón, mostrando la principal población (La Fortuna, al este) y la principal obra ingenieril (la presa de Sangregado) al oeste.

Los peligros volcánicos en el Arenal han sido recientemente reanalizados en detalle para el corto y largo plazo [5], y aunque esbozan algunos aspectos de la red vial, como parte integral del análisis de amenazas, no hay estudios de detalle respecto a los impactos de la actividad volcánica sobre la infraestructura vial. Los corredores e infraestructura viales, son de suma importancia como polos de desarrollo social y económico, y eventualmente como rutas de escape ante emergencias volcánicas, y por eso deben tomarse en cuenta en la evaluación de amenazas (Fig. 2).

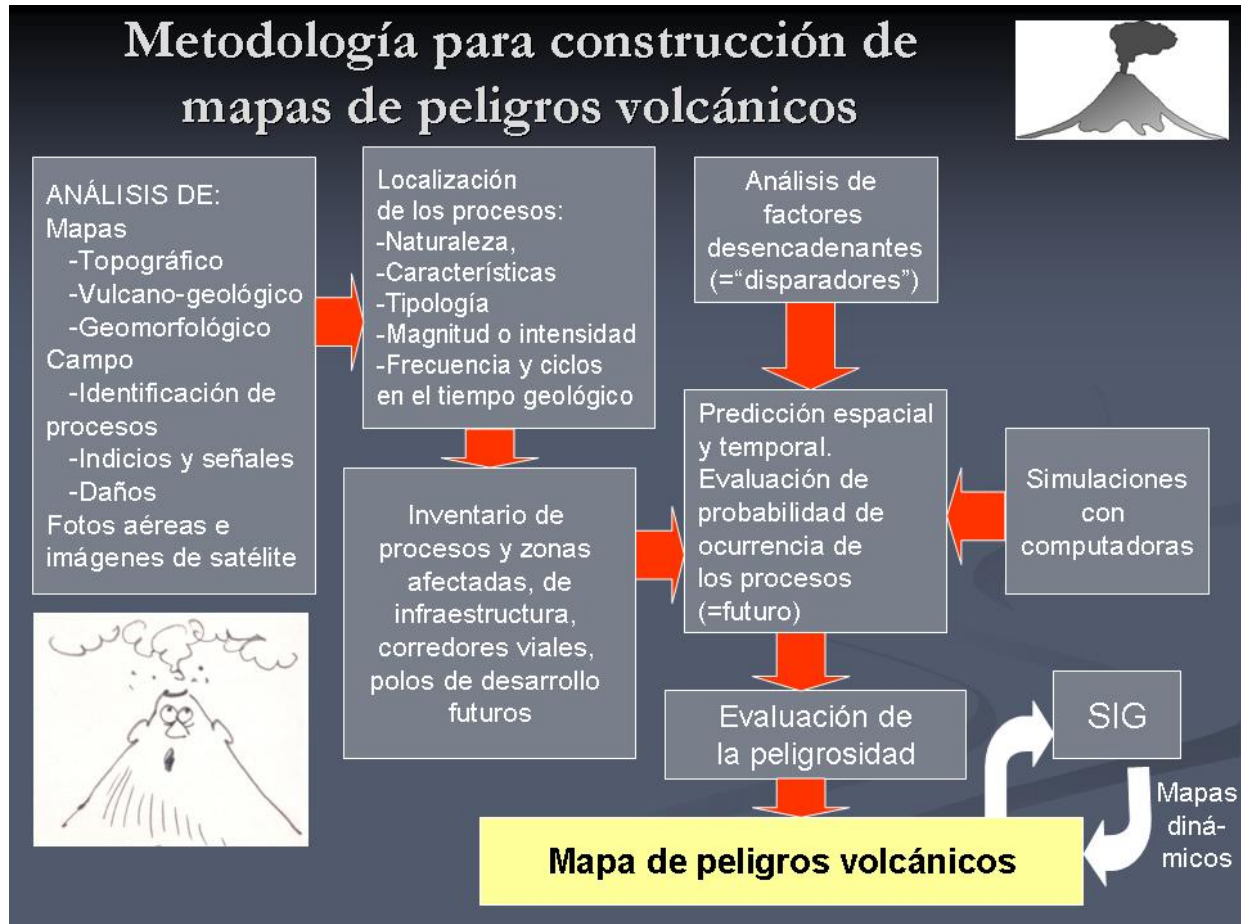


Figura 2: Mapa conceptual del proceso de análisis para la construcción de mapas de peligros volcánicos. El inventario de la infraestructura vial es de suma importancia como insumo para el análisis de la peligrosidad. Reformado a partir de [2].

PELIGRO VOLCÁNICO, LA RED VIAL VULNERABLE Y RUTAS DE ESCAPE

Se consideran varias situaciones posibles que generen daños temporales o irreversibles a la infraestructura vial en los alrededores del volcán Arenal, que incluye cerca de 30 km de carreteras y 10 puentes de diferentes tamaños. Con base en el mapa de peligros volcánicos con escenario de corto plazo (Fig. 3), se considera que los puntos o zonas más vulnerables donde pueden ocurrir daños a la red vial son: 1) Quebrada Guillermina, 2) Río Tabacón, 3) entre el cruce al volcán y el río Aguacaliente, y 4) río Aguacaliente (Fig. 4, puntos 1 a 4).

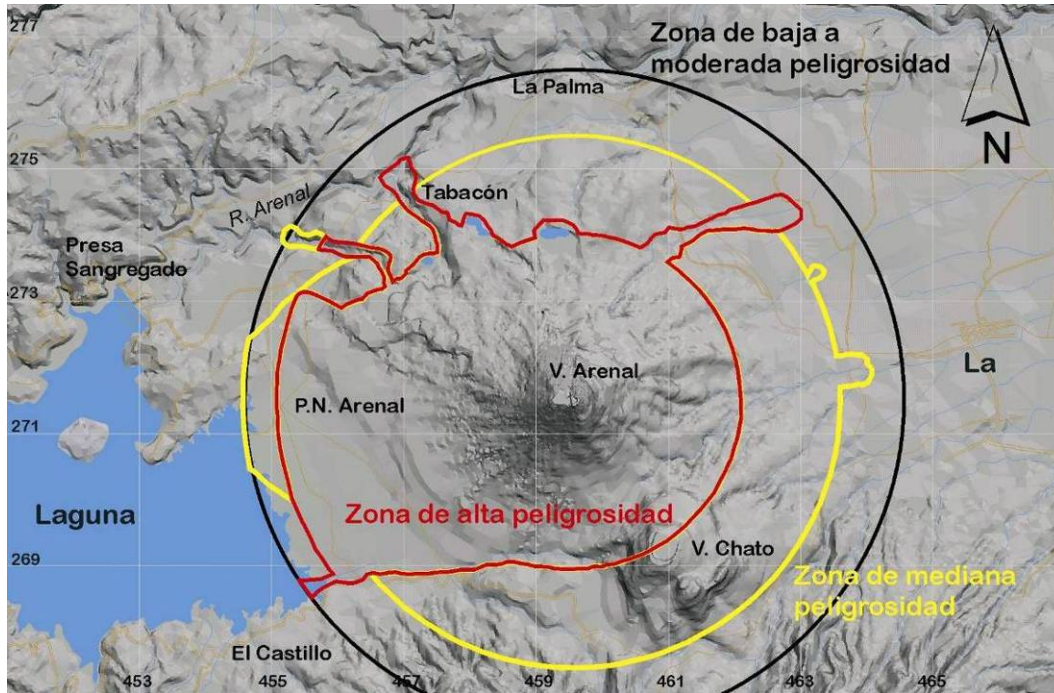


Figura 3: Mapa de peligros volcánicos del Arenal, escenario a corto plazo [5].

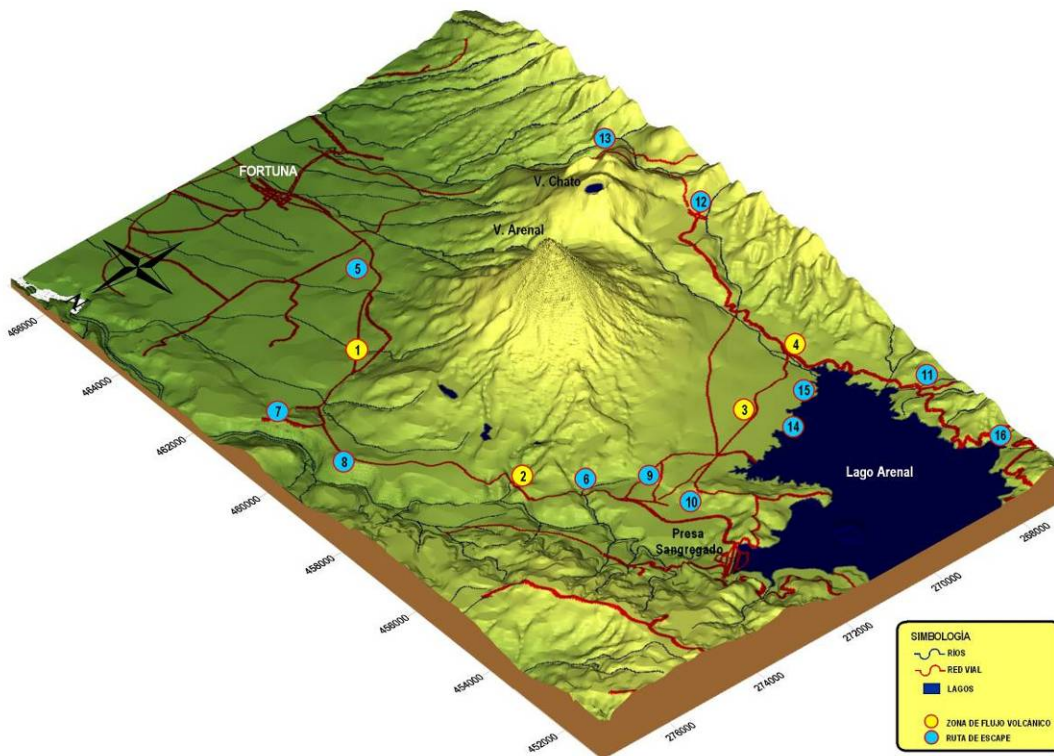


Figura 4: Vista del Arenal desde el noroeste, con la red vial (en rojo), las áreas más vulnerables de sufrir obstrucción debido a eventos volcánicos (1-4), y rutas de escape planteadas (5-16). Números explicados en el texto.

Los primeros dos puntos o zonas vulnerables se encuentran sobre la ruta principal La Fortuna – Sangregado, y son catalogados como de alto peligro en el corto plazo. Para los flujos piroclásticos más comunes, voluminosos y peligrosos en las últimas tres décadas, se ha publicado un análisis probabilístico [3], en el que se estipula “la probabilidad de que dado un colapso del cono, éste tendrá lugar en un sector específico”. Para el cuadrante NE del volcán (donde se encuentra el paso de quebrada Guillermina) la probabilidad es de 0,3, mientras que para el cuadrante NW del volcán (donde se encuentra el paso de río Tabacón) la probabilidad es de 0,5. El sitio del paso de la quebrada Guillermina es susceptible de ser afectado por flujos piroclásticos y por lahares (cf.[5]). Por ejemplo, allí se depositó un voluminoso flujo piroclástico durante la erupción que ocurrió en el año 1020 E.C. [6], y que hoy es explotado como cantera de materiales para construcción en el Tajo Los Laguitos, Fig. 5a). El sitio de paso es obligatorio entre La Fortuna y el sector de Sangregado (Fig. 5b). El puente es sencillo, de tubos de concreto para alcantarilla paralelos.



Figura 5: a) A la izquierda, el Tajo Los Laguitos, donde se explotan materiales depositados por un flujo piroclástico en el año 1020 E.C., en la quebrada Guillermina. b) A la derecha, el paso por quebrada Guillermina viendo hacia el oeste. El volcán está a la izquierda. La flecha roja indica el paso del puente de alcantarillas bajo la calle.

El sitio de paso por el río Tabacón, un área también calificada como de alto peligro en el corto plazo, (Fig. 6) también tiene un puente sencillo, de tubos de concreto para alcantarilla paralelos. Este sector ha sido afectado varias veces en el pasado geológico, por flujos piroclásticos y lahares. En el presente ciclo eruptivo fue afectado por lahares posteriores al inicio de la erupción en julio de 1968. Posteriormente, el 17 y el 21 de junio de 1975, fue afectado por flujos piroclásticos voluminosos (entre $1-2 \times 10^6 \text{ m}^3$) que depositaron materiales hasta la desembocadura del río Tabacón al río Arenal. En este sector el espesor de los depósitos alcanza entre 8 y 10 m con bloques hasta de 1,5 m de diámetro [1].

Los dos puntos señalados, de ser afectados por lahares o flujos piroclásticos, dependiendo del volumen depositado, podrían resultar principalmente en la obstrucción de los desagües, el socavamiento

de la fundación de los estribos de los tubos (daño frecuente en la infraestructura de puentes: cf. [4]), el sepultamiento de la estructura, o bien su destrucción y traslado aguas abajo.



Figura 6: Paso por el río Tabacón viendo hacia el oeste. El paso del agua es a través de tubos de alcantarilla, algunos metros debajo de la señal de tránsito, en la flecha roja.

Con la obstrucción o destrucción en alguno de estos dos puntos, las opciones de escape hacia La Fortuna (punto 5 de la Figura 4) o bien hacia Sangregado (punto 6), son factibles sin mayores problemas, y podrían verse obstaculizadas por caída de cenizas, o por condiciones meteorológicas adversas que converjan en ese momento, lo cual sería aplicable para todos los casos. Si sucediera la obstrucción o destrucción simultánea de ambos puntos, desde la quebrada Guillermina hacia el este se puede escapar hacia La Fortuna (5), y desde Tabacón hacia el oeste hacia Sangregado (6). Ante esto, el sector intermedio quedaría aislado por el camino principal. Ante estas circunstancias, se deberían prever sistemas de comunicación por radio con hoteles o cabinas o casas, para planificar las rutas posibles de evacuación y escape. El sector intermedio de La Palma, ofrece la opción de escape hacia ese caserío y las fincas al norte (7), a sitios más seguros en fincas, hasta la margen derecha del río Arenal. Otra ruta de escape posible es desde La Palma hacia el norte, para cruzar el río Arenal (8), donde hubo un puente (coordenadas 276800 N - 459600 E), que hace cerca de dos décadas fue arrasado por el río. El cruce actual se hace a pie o a caballo, vadeando el río. Como ante una emergencia es posible que también el río Arenal se vea afectado por lluvias o incluso lahares que hayan llegado desde el río Tabacón, esta posibilidad podría verse arriesgada.

El sector oeste del volcán es susceptible de ser afectado por flujos piroclásticos y coladas de lava [5]. Como se ha mencionado arriba, el análisis probabilístico [3], en el que se estipula “la probabilidad de que dado un colapso del cono, éste tendrá lugar en un sector específico”, para el cuadrante NW del volcán, la probabilidad es de 0,5, mientras para el cuadrante SW descende a 0,15. Con la obstrucción de

algún punto entre el cruce desde la carretera principal hacia el Parque Nacional (Fig. 7), y el río Aguacaliente, que es también una zona de alta peligrosidad (señalado como área vulnerable 3 en la Fig. 4), dependiendo de cuál punto, algunas vías alternas de escape son posibles.



Figura 7: Camino en el borde oeste del Parque Nacional y del volcán Arenal, en el sitio 3 de la Fig. 4, mirando hacia el norte. La laguna de Arenal se sitúa hacia la izquierda.

En caso de rutas de escape ante la obstrucción o destrucción del camino en el área 3, desde el punto de obstrucción hacia el norte, se llega al cruce de caminos (9 de la Fig. 4), y de allí hacia Sangregado o La Fortuna. Si también Tabacón o Guillermina estuvieran obstruidos, el escape es hacia Sangregado. Otra opción es salir desde la entrada del Parque Nacional hacia el oeste, en el camino viejo hacia Sangregado (10 de la Fig. 4), que ofrece cierta seguridad topográfica, y lleva hasta la presa. Al menos hasta la casa de guardaparques se encuentra en buen estado, y normalmente de allí hasta la presa también. La opción de salida hacia el sur es posible siempre y cuando el punto en el río Aguacaliente no haya sido afectado. Si El Castillo (11) no ha sufrido ningún problema ni hay fuerte caída de ceniza, las partes altas son seguras. Esto porque no hay paso viable accesible a través del río Caño Negro. En la actualidad hay un puente peatonal montado por un empresario de la zona. Esta ruta de escape no parece absolutamente prioritaria, en tanto que un escape por vía lacustre, con lanchas que atraquen en el área de El Castillo, podría ser más rápida para poner a salvo gente que quedara atrapada en ese sitio. Hay un par de atracaderos menores e informales, pero un plan en conjunto con el ICE podría fomentar la planificación de un embarcadero.

La otra opción de escape es hacia el *Observatory Lodge* y la Finca Cerro Chato (12) al este, que podrían ser áreas de refugio temporal. O bien dirigirse desde Jilguero, en el lado suroeste del Chato, hacia las vecindades de la catarata del río Fortuna, en el flanco sureste del Chato (13) cuyos senderos están cartografiados marcados en el mapa topográfico hoja Fortuna (1:50 000 del IGN). Los senderos existían, en efecto, pero desde hace años no se utilizan y se han perdido por la colonización de vegetación. Ante

una emergencia, es posible utilizar la ruta de evacuación que tenían estos trillos, con guías que conozcan la antigua ruta.

Si hubiera una obstrucción en dos puntos entre la casetilla de entrada al Parque Nacional y el río Aguacaliente, la gente que quede atrapada en el medio, solo podría ser evacuada vía lacustre (14), lo cual es difícil y peligroso, pues el terreno entre el camino y el lago es acharralado y pantanoso. O vía helicóptero (15), que se podría ver dificultado por ceniza y lluvia, o ambas.

En las zonas catalogadas como de alta peligrosidad, el puente más amplio, esbelto y desarrollado es el del río Aguacaliente (Fig. 8). Esta área ha sido afectada por lahares en la década de los ochentas del siglo pasado [7], que determinó el daño de estructuras anteriores, hasta que el Instituto Costarricense de Electricidad construyó (entre finales de la década de los años ochentas y principios de los años noventas) el puente actual, debido a que es una ruta de paso vital para el mantenimiento y monitoreo de la salida del Túnel Fortuna, en el sector sur del Arenal, al suroeste del Chato. El túnel trasvasa aguas desde el río Fortuna hacia el embalse de Arenal.



Figura 8: a) Puente Aguacaliente viendo hacia el Arenal, al este, desde la calle. b) Puente Aguacaliente viendo hacia el Arenal, desde aguas abajo. c) Puente Aguacaliente viendo hacia El Castillo, hacia el sur.

Originalmente, el paso en el Aguacaliente estaba diseñado como un vado de concreto, pero las crecidas y lahares o flujos de detritos interrumpían frecuentemente el paso. La estructura actual del puente sobre el río Aguacaliente está diseñada para que en caso de crecidas o de lahares hiperconcentrados, ocurra el menor daño por socavamiento de las estructuras de los estribos, de modo que encaucen los bloques y sedimento hacia la luz de las alcantarillas.

En el sector este del volcán, en el camino que conecta el caserío de Zeta 13 con la catarata del río Fortuna, existen un par de puentes que cruzan los ríos Calle de Arena y Burío (Fig. 9). Son ríos que corren por áreas de relleno aluvial-lahárico, y que podrían acarrear lahares, aunque están dentro de un área calificada actualmente como de peligro medio. Son dos puentes parcialmente desarrollados, en caminos de lastre.



Figura 9: Puente sobre el río Burío viendo hacia el sur. El volcán se encuentra hacia el lado derecho de la fotografía.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- Los fenómenos volcánicos pueden acarrear efectos primarios directos (daños materiales de la infraestructura) e indirectos (suspensión del servicio de transporte público, privado y de turismo), y secundarios (impacto sobre la economía local) en los corredores e infraestructura viales alrededor de los volcanes.
- El volcán Arenal, en erupción desde julio de 1968 al presente, está en un área con una población expuesta de 12 000 personas en la vecindad de una de las mayores plantas hidroeléctricas del país, donde se experimenta una creciente industria turística, por lo que la infraestructura vial (~30 km de carreteras, 10 puentes) es de primordial importancia para todas estas actividades.

- Los efectos directos posibles sobre la infraestructura vial serían causados por la caída de piroclastos y bombardeo balístico, flujos piroclásticos, lahares, lavas, deslizamientos, avalanchas y sismos volcánicos.
- Con base en el mapa de peligros volcánicos con escenario de corto plazo, se consideran varias situaciones posibles que generen daños temporales o irreversibles a la infraestructura vial en los alrededores del volcán Arenal. Los puntos o zonas más vulnerables donde pueden ocurrir daños a la red vial son: 1) Quebrada Guillermina, 2) Río Tabacón, 3) entre el cruce al volcán y el río Aguacaliente, y 4) río Aguacaliente. Los primeros dos se encuentran sobre la ruta principal La Fortuna – Sangregado, y podrían ser afectados principalmente por flujos piroclásticos o lahares, que obstruirían los drenajes, erosionarían terraplenes, causarían el derretimiento de asfalto, y la obstrucción o destrucción de caminos y puentes. Se consideran los puntos más vulnerables. Los dos sitios restantes se consideran que podrían ser afectados por caída de piroclastos, lavas, flujos piroclásticos, avalanchas, y sobre todo lahares en el caso del río Aguacaliente, con efectos similares.
- En el sitio del paso de la quebrada Guillermina se depositó un voluminoso flujo piroclástico durante la erupción que ocurrió en el año 1020 E.C. [6], y ha sido afectado por lahares pequeños en el presente ciclo eruptivo. El sitio de paso es obligatorio entre La Fortuna y el sector de Sangregado. El puente es sencillo, de tubos de concreto para alcantarilla paralelos.
- El sitio de paso por el río Tabacón (también de alto peligro en el corto plazo), tiene un puente sencillo de tubos de concreto para alcantarilla paralelos. El sitio ha sido afectado en el pasado geológico por flujos piroclásticos y lahares. En el presente ciclo eruptivo fue afectado por lahares posteriores al inicio de la erupción en julio de 1968, y en junio de 1975, por flujos piroclásticos voluminosos que depositaron materiales hasta la desembocadura del río Tabacón al río Arenal.
- Para los flujos piroclásticos más comunes en las últimas tres décadas, análisis probabilísticas publicados por Meloy [3] estipulan que la probabilidad de que dado un colapso del cono, éste tendrá una probabilidad de 0,3 de ocurrir en el cuadrante NE del volcán (donde se encuentra el paso de quebrada Guillermina), mientras que para el cuadrante NW del volcán (donde se encuentra el paso de río Tabacón) la probabilidad es de 0,5.
- El sector oeste del volcán es susceptible de ser afectado por flujos piroclásticos y coladas de lava. La probabilidad de que dado un colapso del cono, éste tendrá lugar en el cuadrante SW del volcán, es de 0,15. Con la obstrucción de algún punto entre el cruce desde la carretera principal hacia el Parque Nacional, y el río Aguacaliente, que es también una zona de alta peligrosidad, dependiendo de cuál punto, algunas vías alternas de escape son posibles.
- Los cálculos de Meloy [3] indican que las probabilidades de que un flujo piroclástico (los eventos más notoriamente peligrosos y probables de ocurrir en el Arenal en el corto plazo) alcance más de 3 km del sitio de origen (esto es: cerca de las carreteras en el sector norte del volcán: puntos 1 y 2) son del 2%. Como el periodo de observación abarca los últimos 38 años, entonces nuestra extrapolación es que podría suceder un evento que dañe los corredores viales en el sector norte cada ~20 años, si el volcán continúa en erupción. De hecho, ya sucedió un par de veces en el paso de Tabacón (julio de 1968 y junio de 1975).
- Los mismos cálculos probabilísticos establecen que muy probablemente una persona alcanzada por un flujo piroclástico, encontrará la muerte, y entonces un residente tendría un moderado riesgo de muerte si vive a más de 3 km del cráter en los cuadrantes NW y NE del volcán [3]. Una vez más, si extrapolamos estos datos a la infraestructura (Fig. 10), asumiendo que cualquier estructura experimentarían daños al ser alcanzada por un flujo piroclástico, y puesto que las estructuras permanecen 24 horas en el sitio, y son comparables a la calidad de “residente”, se puede concluir que las estructuras viales en el sector norte del Arenal, a una distancia de 3-4,5 km, tienen un riesgo de bajo a moderado, y con esta misma perspectiva, las estructuras en el cuadrante SW, un riesgo muy

bajo a bajo por flujos piroclásticos, pero probablemente se eleva a moderado, si incluimos los lahares en el río Aguacaliente.

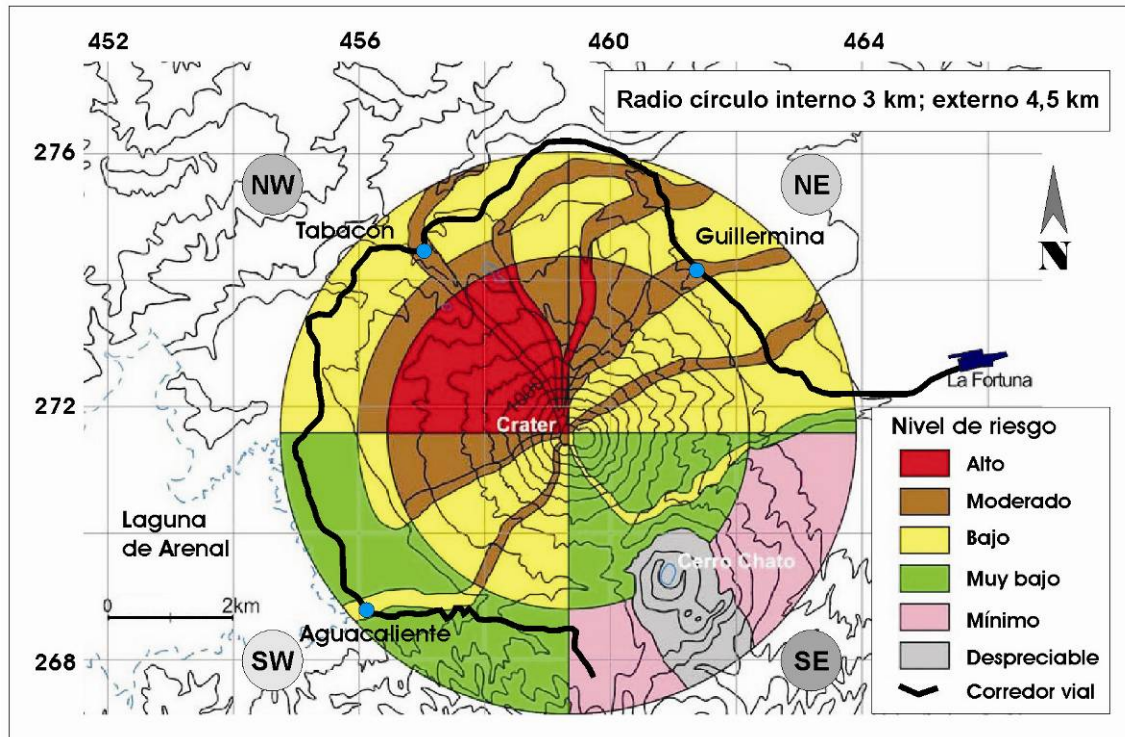


Figura 10: Mapa desarrollado por Meloy [3] para mostrar el riesgo individual de muerte por afectación de flujos piroclásticos, de un residente a tiempo completo en la periferia del Arenal. Ha sido reformado para mostrar el riesgo del corredor vial principal alrededor del volcán. Se muestran los cuadrantes y los valores cualitativos, así como el corredor vial y los tres puntos principales con puentes en la quebrada Guillermina y los ríos Tabacón y Aguacaliente. Detalles en el texto.

AGRADECIMIENTOS

La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) financió la investigación de evaluación de peligros volcánicos del Arenal, de la cual este trabajo es un corolario. Se agradece a Natasha Mitchell (*Australian Broadcasting Corporation*) por facilitar la foto de la figura 5a. Lidier Esquivel (CNE) amablemente colaboró con sugerencias al trabajo.

REFERENCIAS

1. Alvarado, G.E. & Soto, G.J., (2002), "Pyroclastic flow generated by crater-wall collapse and outpouring of the lava pool of Arenal Volcano, Costa Rica". *Bulletin of Volcanology*, 63: 557-568.
2. González, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C., (2002), "Ingeniería Geológica". Pearson Educación S.A., Madrid, 715 pp.
3. Meloy, A., (2006), "Arenal-type pyroclastic flows: A probabilistic event tree risk análisis". En: Gill, J., Reagan, M., Tepley, F. & Malavassi, E. (Eds): *Arenal Volcano Special Volume, Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157(1-3): 121-134 [doi 10.1016/j.jvolgeores.2006.03.048].
4. Muñoz, E. & Valbuena, E., (2006), "Socavación de puentes". *Infraestructura Vial*, VIII (15): 25-39.

5. Soto, G.J. & Sjöbohm, L., (2005), “Sobre el mapeo de los peligros volcánicos del Arenal (Costa Rica) como una herramienta para la planificación del uso del suelo y la mitigación de desastres.”, *Memoria VIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica*, San José, Costa Rica, septiembre 2005, 26 pp.
6. Soto, G.J. & Alvarado, G.E., (2006), “Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present”. En: Gill, J., Reagan, M., Tepley, F. & Malavassi, E. (Eds): *Arenal Volcano Special Volume, Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157(1-3):254-269 [doi 10.1016/j.jvolgeores.2006.03.041].
7. Zapata, M.I. & Soto, G.J., (1991), “Lahares antiguos y recientes en el Volcán Arenal, Costa Rica”. *Boletín Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 3(5): 4-28.