

Mapa de peligros del volcán Poás

Gustavo Barrantes Castillo*

Eduardo Malavassi Rojas**

Universidad Nacional, Heredia - Costa Rica

Resumen

El volcán Poás presenta una serie de amenazas a la vida y a las actividades de las comunidades que habitan a su alrededor, tales como caída de cenizas, gases volcánicos, proyección balística, flujos piroclásticos, lahares y coladas de lava. En la investigación, motivo del presente artículo, se zonificaron e integraron los riesgos en mapas de peligros combinados, con el propósito de que se utilicen posteriormente en procesos de ordenamiento territorial. La metodología se basó en una aproximación heurística, apoyada en criterios cartográficos, geomorfológicos, geológicos y de afectaciones históricas, con el fin de lograr un producto adecuado a su escala y facilidad de interpretación. Estos mapas presentan mayor detalle e integración con respecto a otros trabajos y cartografías de peligros volcánicos existentes en Costa Rica.

Palabras clave: amenazas volcánicas, peligro volcánico, valoración del riesgo, volcán Poás, vulcanismo.



DOI: [dx.doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50219](https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50219)

RECIBIDO: 6 DE MAYO DEL 2014. ACEPTADO: 28 DE OCTUBRE DEL 2014.

Artículo de investigación que aborda la zonificación de los peligros más importantes del volcán Poás, sobre la base de métodos heurísticos. Se trata de una primera aproximación unificada de mapas de peligros, desarrollados para su posterior incorporación en el ordenamiento territorial.

COMO CITAR ESTE ARTICULO: Barrantes Castillo, Gustavo y Eduardo Malavassi Rojas. 2015. "Mapa de peligros del volcán Poás". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 24 (2): 157-172. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50219

* Dirección postal: Apartado Postal 86-3000 Heredia, Costa Rica.

Correo electrónico: gbarrantes@una.cr

** Correo electrónico: emalavassi@una.cr

Mapa de perigos do vulcão Poás

Resumo

O vulcão Poás apresenta uma série de ameaças à vida e às atividades das comunidades que habitam ao seu redor, tais como queda de cinzas, gases vulcânicos, projeção balística, nuvens piroclásticas, avalanches (*lahares*) e lamas vulcânicas. Na pesquisa, motivo do presente artigo, determinaram-se as zonas e integraram-se os riscos em mapas de perigos combinados, com o propósito de que se utilizem posteriormente em processos de ordenamento territorial. A metodologia foi baseada numa aproximação heurística, apoiada em critérios cartográficos, geomorfológicos, geológicos e de afetações histórica a fim de atingir um produto adequado à sua escala e facilidade de interpretação. Esses mapas apresentam maior detalhe e integração em comparação a outros trabalhos e cartografias de perigos vulcânicos existentes na Costa Rica.

Palavras-chave: ameaças vulcânicas, perigo vulcânico, avaliação do risco, vulcão Poás, vulcanismo.

Hazard Map of the Poás Volcano

Abstract

The Poás volcano presents a series of hazards to the lives and activities of the communities in its surroundings; these hazards include ash fall, volcanic gases, ballistic projection, pyroclastic flows, lahars and lava flows. In the study described in this article, risks were zoned and integrated to form combined hazard maps for later use in territorial planning processes. With respect to methodology, the study was based on a heuristic approximation, which was supported with cartographic, geomorphological, and historical impact criteria to achieve a suitable product in terms of scale and ease of interpretation. These maps present greater detail and integration than other works and cartographies of volcanic hazards in Costa Rica.

Keywords: volcanic hazards, volcanic danger, risk assessment, Poás volcano, volcanism.

Introducción

La identificación de las amenazas naturales ha cobrado relevancia debido a la necesidad de reconocer el riesgo asociado a los usos de la tierra, para el ordenamiento territorial. En este sentido, la Política Nacional de Ordenamiento Territorial de Costa Rica señala lo siguiente: “En los Planes de Ordenamiento Territorial, se dará especial atención a la determinación y ubicación de zonas de riesgo no aptas para la localización de asentamientos humanos, ya sea por vulnerabilidad y amenaza ambiental, o por salubridad” (Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos 2013, 37).

Los estudios sobre amenazas naturales suelen comenzar por investigaciones generales que paulatinamente van mejorando su detalle, hasta llegar a estudios específicos. La principal razón de este orden radica en el costo que implican los estudios a detalle, así como la falta de datos para desarrollar dichos trabajos; no obstante, los estudios generales tienen su valor en la planificación territorial (Predecán 2009).

En el caso del volcán Poás existen mapas de peligro generales que se han utilizado como una primera aproximación; tal es el caso del mapa de reconocimiento de los peligros volcánicos de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica (Paniagua y Soto 1986). Dos décadas después, con base en los trabajos de los observatorios, tanto del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica —en adelante, OVSICORI— como de la Red Sismológica Nacional de Costa Rica (RSN), se definieron criterios para una segunda aproximación que ha sido integrada en la base de datos de amenazas de que dispone la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias —en adelante, CNE—. En la cartografía emitida por la CNE se delimitan áreas potenciales de caída de ceniza, afectación por gases y proyección balística de piroclastos (CNE 2009).

Sin embargo, dichos mapas dejan por fuera varios peligros volcánicos, como los flujos piroclásticos y los lahares; adicionalmente no fueron diseñados para su incorporación en la planificación territorial al no diferenciar niveles de peligro en algunas amenazas, aspecto central en la toma de decisiones en materia de restricción del uso de la tierra.

A continuación se presenta un mapa de peligros volcánicos para el volcán Poás, que sigue una metodología heurística, con base en información cartográfica, geológica y geomorfológica y del uso de Sistemas de Información

Geográfica (SIG). El aporte principal de estos mapas es el haber sido diseñados con el propósito de servir de insumos en procesos de planificación territorial y gestión del riesgo.

El volcán Poás y sus peligros

El volcán Poás se localiza en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica; su mayor elevación es de 2.708 m y su cráter principal se ubica en coordenadas 10°11'54" latitud norte y 84°13'51" longitud oeste (figura 1). Se trata de un estrato volcán complejo de forma subcónica irregular (Alvarado 2000). Un rasgo notorio es el alineamiento volcánico del Poás, que comprende los conos monogenéticos de Sabana Redonda, en la vertiente SW del macizo, así como Botos, von Frantzius y el cráter activo de la zona sumital; finalmente, detrás del Poás por el cerro Congo, el maar Laguna Hule y el maar de río Cuarto (Malavassi, Gill y Trimble 1990).

De acuerdo con el registro histórico, el volcán Poás ha presentado actividad moderada de forma casi continua, con emisiones de gases y ocasionales erupciones freáticas; además se han producido explosiones vulcanianas y estrombolianas leves (Prosser y Carr 1987). La mayor erupción histórica, según Mora (2010) ocurrió en el periodo eruptivo 1953-1955 con una columna eruptiva de poco menos de 5.000 m, este mismo autor le otorga un valor de 3 en el Índice de Explosividad volcánica (IEV).

Entre los peligros reportados para dicho volcán se encuentran (Mora 2010): caída de cenizas, proyección balística, gases volcánicos, lluvia ácida, oleadas piroclásticas y lahares. No obstante, se deben considerar las coladas de lava y los flujos piroclásticos, como fue el caso de los tres flujos de lava provenientes del cráter principal identificados por Prosser y Carr (1987) y los flujos piroclásticos reportados por Malavassi, Gill y Trimble (1990).

Un aumento en la actividad eruptiva del cráter principal, podría afectar directamente la parte alta de los cantones de Poás, Valverde Vega, Alajuela y Grecia y, de manera indirecta o en menor grado, los cantones de Alfaro Ruiz, Naranjo y una pequeña sección del cantón de San Carlos (véase figura 1). Los daños para el primer grupo de cantones podrían estar relacionados con caída de tefra, y en caso de unas erupciones mayores, de coladas de lava y flujos y oleadas piroclásticas. Para el otro caso, el segundo grupo de cantones podría verse afectado por lluvia ácida como ocurrió en 1968, 1989 y 1994 (Universidad de Costa Rica 2014) y por cenizas como sucedió en 1834, 1910, 1914-1915 y 1955 (Casertano, Borgia y Cigolini 1983; Vargas 1979).

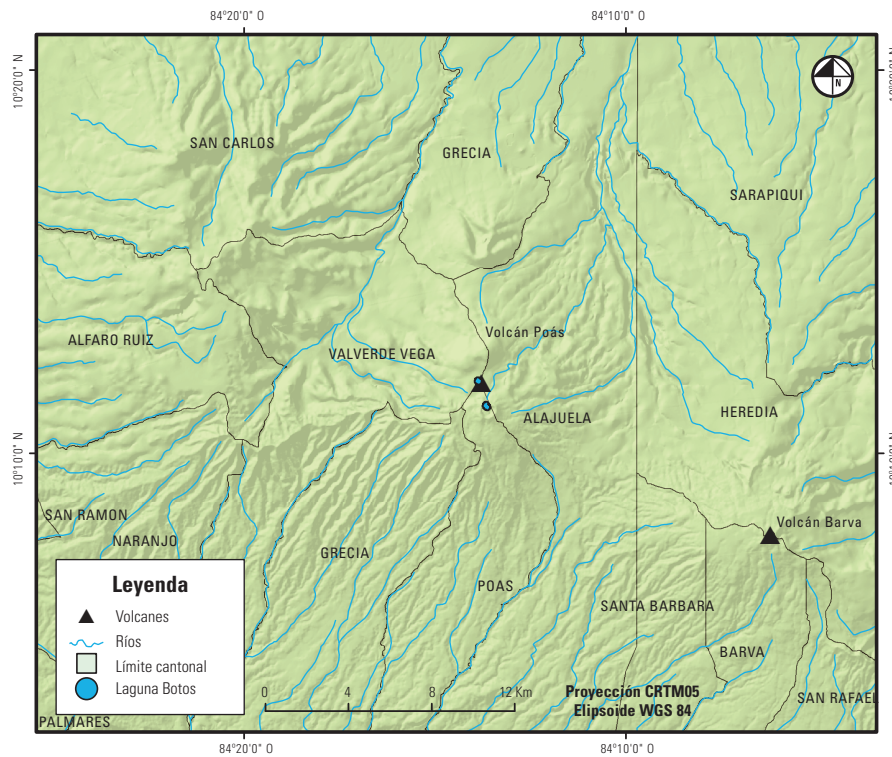


Figura 1. Ubicación del volcán Poás.

Datos: base cartográfica *Atlas digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).

Dado que los cantones de Alajuela, Poás y Grecia forman parte de la Gran Área Metropolitana, sector que concentra más del 60% de la población del país y alrededor del 75% de todas las actividades económicas productivas (Astorga 2008); que el Parque Nacional Volcán Poás, ubicado en su cima, es el segundo parque más visitado del país, y que en las faldas del volcán se encuentran importantes campos de cultivo de fresas, helechos, café y tomate, entre otros, así como pastizales, surge la necesidad de contar con una cartografía de sus peligros, con el fin de incorporar dicha información en los procesos de ordenamiento territorial y planes de manejo del parque. Se requiere de una cartografía que recopile, agrupe y facilite transmitir la información sobre riesgos, para que los tomadores de decisiones la apliquen en la gestión del riesgo (Cepal y BID 2000).

Peligros volcánicos del Poás

Se consideran los peligros volcánicos mencionados por Paniagua y Soto (1986) y Mora (2010), adicionalmente se incorporan peligros que, si bien no se han presentado, sí se encuentran presentes en el registro geológico, como las coladas de lava (Gazel y Ruiz 2005) y los flujos piroclásticos (Malavassi, Gill y Trimble 1990).

Caída de ceniza

Durante una erupción volcánica de tipo explosivo, el magma pierde presión conforme asciende por el conducto volcánico; como resultado, cerca de la superficie, se separan los gases de la fase líquida y semisólida, provocando una fragmentación conforme se liberan violentamente. Los materiales lanzados por las erupciones se clasifican en función de su tamaño, como ceniza, lapilli, bloques y bombas.

Estos piroclastos (material volcánico lanzado al aire) salen a través de una columna eruptiva, impulsada inicialmente por la descompresión de los gases (zona de jet); posteriormente continúa su ascenso por células convectivas debido a la incorporación del aire circundante dentro de la columna (zona convectiva) y, finalmente su transporte es determinado por la velocidad y la dirección del viento (zona de difusión); las partículas que alcanzan esta última zona son las que sufren un mayor transporte, en función de su peso, tamaño, forma y de las condiciones atmosféricas imperantes.

La caída de ceniza es el peligro más extendido, derivado de una erupción volcánica, así por ejemplo superficies de 103 km² pueden quedar cubiertas por capas mayores de 10 cm y el material fino se distribuye por extensas áreas que podrían tener incluso orden continental (Scott 1993).

Los daños que provoca la ceniza varían desde el colapso de estructuras cercanas a la fuente (principalmente techos), la eliminación de la cobertura forestal y de cultivos agrícolas, hasta la suspensión de las comunicaciones radiales y aéreas, así como la contaminación de fuentes de agua potable.

Proyección balística

Cuando ocurre una erupción violenta, los materiales sólidos son lanzados al aire desde el cráter; los gruesos abandonan el cráter a velocidades que varían de decenas a centenares de metros por segundo, siguiendo una trayectoria balística (Scott 1993). Cuando esto sucede, los materiales caen en la superficie del suelo, formando cráteres de impacto en proporción con su tamaño y densidad.

Acidificación

Un volcán activo puede liberar gases ácidos a altas temperaturas desde el cráter activo (Delmelle y Stix 2000). Los gases volcánicos más abundantes son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el dióxido de azufre, el hidrógeno, el sulfuro de hidrógeno y el monóxido de carbono (Williams y Rymer 2000). De acuerdo con estos autores, el dióxido de azufre liberado en la actividad volcánica reacciona con la atmósfera para formar trióxido de azufre que, posteriormente, reacciona con el agua de las nubes para formar ácido sulfúrico, que finalmente se precipita en forma de lluvia ácida, la cual, junto con otros gases y partículas volcánicas sigue la dirección principal del viento en su distribución.

Tanto los compuestos de azufre como los cloruros y fluoruros reaccionan con el agua para formar ácidos irritantes para las plantas y los animales, los cuales son nocivos (Scott 1993) y promueven la lixiviación de los suelos aún en bajas concentraciones. Sin embargo, en condiciones de baja humedad atmosférica y alta emisión de gases en fumarolas de alta temperatura, es posible tener precipitación ácida seca, que se trata de aerosoles que son químicamente reactivos y que, al hidratarse, pueden producir ácidos irritantes sobre los seres vivos.

Como resultado de la lluvia ácida y la depositación ácida seca, las plantas inhiben su crecimiento, pueden llegar a perder sus hojas y hasta morir (necrosis parcial o total). Por su parte, los suelos presentan lixiviación acelerada de los nutrientes de las plantas y estas se intoxican por absorción de aluminio a través de sus raíces. Tanto la precipitación ácida húmeda como la seca, producen oxidación acelerada de las superficies metálicas y

constituyen uno de los ambientes más oxidantes conocidos (Álvarez y Pridybailo 2005).

Flujos de lava

Son derrames de rocas fundidas, provenientes de cráteres, central o secundarios, o de fisuras, que se expanden a través del terreno (Peterson y Tilling 2000). De acuerdo con estos autores, el comportamiento específico de un flujo de lava es controlado por la tasa de emisión desde la fuente y su duración, la pendiente y la topografía del terreno, así como de la viscosidad de la lava; esta última, a su vez, es determinada por la composición química, el contenido de cristales y el de gas, así como por la temperatura de la lava. En general, puede afirmarse que los flujos de lava viajan, pendiente abajo, siguiendo la morfología del terreno y que, a pesar de su baja velocidad, pueden destruir o sepultar toda infraestructura que se encuentre a su paso (Macías y Capra 2005).

Oleadas y flujos piroclásticos

Son nubes secas y calientes de escombros piroclásticos y gases, que se movilizan velozmente a ras de la superficie o cerca de esta. Un flujo se compone normalmente de dos partes: 1) un flujo basal, denso y ceñido al suelo, que es el flujo piroclástico propiamente dicho; y 2) una oleada en forma de nube turbulenta de ceniza que precede o cabalga sobre este (Scott 1993).

Los flujos tienden a transitar por los barrancos que circundan el edificio volcánico pudiendo rellenarlos en minutos, mientras que, las oleadas, debido a su menor contracción de sólidos, son capaces de sobrepasar barreras topográficas a gran velocidad (Macías y Capra 2005). Este tipo de actividad volcánica ha provocado más muertes que ninguna otra amenaza volcánica (Keller y Blodgett 2004), ya que los flujos son capaces de destruir e incinerar todo lo que se encuentre a su paso.

Lahares

Término indonesio que equivale a '*debrisflow*'. Se trata de una mezcla de detritos y agua con alta concentración de sedimentos, que se mueve, pendiente abajo, por la influencia de la gravedad (Vallance 2000). Estos pueden estar asociados a episodios eruptivos o no, pero en ambos casos se relacionan con la disponibilidad de grandes volúmenes de agua que podría provenir del deshielo de glaciales, de lluvias intensas o del vaciamiento de lagunas.

A causa de su elevado contenido de material fino, son viscosos y densos, semejándose a coladas de concreto, lo que les permite transportar objetos de gran tamaño

(por ejemplo grandes rocas, casas, árboles o autobuses); además, tienden a seguir los cauces de los ríos, incluso en condiciones de poca pendiente, lo que les da un amplio alcance (Macías y Capra 2005).

Metodología

La metodología propuesta se desarrolla a partir de la crítica que hiciera Barrantes (2012) a la forma de valorar las amenazas naturales en el índice de fragilidad ambiental, método oficial para incorporar estas amenazas en los planes reguladores o planes de ordenamiento territorial municipal, en Costa Rica. En su artículo, Barrantes deja clara la necesidad de robustecer los métodos para el cálculo de la amenaza.

En este artículo se proponen métodos para evaluar la amenaza volcánica en escala de 1:50.000, que puede considerarse una escala general de carácter cualitativo, que corresponde a un mínimo de aproximación, para ser luego incorporada en el ordenamiento territorial (Predecán 2009).

Se trata de un enfoque alternativo al tratamiento estadístico, basado en un abordaje cualitativo que categoriza cada amenaza (Kappes et ál. 2012). La estandarización por clasificación es frecuentemente utilizada para comparar diferentes amenazas, donde umbrales de intensidad o frecuencia son definidos para estandarizar las respectivas amenazas en un predefinido número de clases.

De este modo, se asume que, independientemente del evento o peligro, las clases de un mismo tipo son comparables; por ejemplo, la clase “alto peligro” para flujos piroclásticos y de gases volcánicos, son equivalentes. Así, cada clase de amenaza (en este caso volcánica), es el resultado de la superposición de las clases de cada amenaza individual en cada área, donde se sobreponen amenazas distintas y la más alta de ellas es adoptada como el valor de la amenaza resultante (Heinimann et ál. 1998).

Luego de hacer una revisión de metodologías y aplicaciones de la valoración multiamenaza del riesgo, Kappes et ál. (2012) concluyen que este enfoque es valioso, no obstante su alcance estar relacionado con un propósito o grupo metaespecífico, para el cual se desarrollan, por ejemplo la planificación territorial. En el caso de Costa Rica, la escasez de estudios específicos, el pobre registro histórico y la falta de datos instrumentales, hacen del método cualitativo por clasificación una alternativa viable.

En síntesis, el mapa de peligro volcánico para el volcán Poás estará constituido por la sobreposición de las clases de peligro (muy alta, alta, moderada, baja y muy

baja) analizadas individualmente y su valor será determinado por el tipo de mayor peligro que se encuentre en cada espacio.

A continuación se describe cada uno de los métodos empleados para valorar los peligros, individualmente:

Proyección balística

Debido a que los materiales gruesos siguen una proyección balística generalmente en todas direcciones, a partir de la fuente o cráter de emisión, es posible establecer círculos de amenaza en función del diámetro de los piroclastos. En la tabla 1 se presentan los radios establecidos con base en criterios generales y los trabajos de Mora (2010) y Paniagua y Soto (1986).

Tabla 1. Clasificación del peligro por proyección balística de piroclastos

1	3	5
5-7 km	2,5-5 km	0-2,5km

Caída de ceniza

La distribución de la tefra de caída está fuertemente influenciada por la dirección del viento, así como por la masa de ceniza emitida. Por esta razón se consideran las principales direcciones del viento, así como la intensidad de la erupción como indicador del volumen de la ceniza.

El procedimiento propuesto para determinar el peligro por caída de ceniza sigue los siguientes pasos:

1. Recopilar la historia eruptiva del volcán, de la cual debe deducirse el índice de explosividad volcánico máximo —en adelante, VEI por sus siglas en inglés—.
2. Determinar las principales direcciones del viento, de acuerdo con las altitudes de las plumas medidas o estimado a partir de su VEI. Para construir el perfil de vientos en altura se utilizan los registros de vientos provenientes del radiosondeo que se realiza en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.
3. Para representar las áreas que podrían verse más afectadas por diferentes intensidades de erupción, se dibujan conos de 5 km de largo para un VEI 1, 10 km para VEI 2, 25 km para VEI 3 en las direcciones más probables, de acuerdo con el registro de vientos, en altura.
4. Se unen todos los conos en un solo polígono, lo que delimita el área de peligro, considerando el efecto conjunto de todas las intensidades y el perfil de vientos en altura.
5. Para considerar la deflación y los rotores de viento resultados del paso del viento por el sistema montañoso,

así como las brisas montaña-valle, mar-tierra y los oeste-ecuatoriales (Zárate 1988), se extendió el inicio de los conos 10 km hacia el noreste, para alcanzar el límite de la distribución de ceniza para el mayor evento histórico ocurrido en 1953 según Mora (2010).

6. Por último, para delimitar los niveles de peligro, se dibujan zonas en forma de elipses en la dirección predominante del viento (SO como resultado de la deflación del viento al cruzar las montañas), cuyo diámetro está determinado por las zonas y sus grados de afectación registrados por el OVSICORI para las erupciones ocurridas entre 1989 y 1990, según la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del peligro caída de ceniza

1	2	3	4	5
Área restante a partir del límite de la zona 2	Un eje mayor de 31,5 km	Un eje mayor de 22,5 km	Un eje mayor de 13,5 km	Un eje mayor de 3 km

Lluvia ácida

Las zonas de peligro se establecieron, de forma similar, a los procedimientos seguidos con la ceniza; sin embargo, en este caso solo se consideraron los vientos predominantes en la capa de la atmósfera correspondiente a la altura del volcán ya que, generalmente, la comuna de gases se levanta menos de un kilómetro.

Para las principales direcciones encontradas se elaboran conos de afectación de 17 km, distancia determinada a partir del área más lejana de afectación de los registros disponibles en la CNE y que corresponde a 1994. Esta distancia considera el efecto disolvente que tiene la velocidad y la turbulencia del aire, así como las precipitaciones para el caso de la Cordillera Volcánica Central (Zárate 1989).

La incorporación del efecto, que sobre la distribución de los gases pueden tener las brisas montaña-valle, mar-tierra y los oeste-ecuatoriales (Zárate 1988), que son incorporados por medio de un cono en la dirección ENE, cuya máxima extensión corresponde con la distribución de los eventos máximos reportados por OVSICORI para el periodo 1989-1990.

La delimitación de las zonas, por niveles de peligro, se realizó con base en las áreas y grados de afectación, registrados para los eventos de 1984, 1989-1990 y 1994, según los mapas aportados por la CNE y el OVSICORI. Sobre esta base se dibujaron elipses y polígonos, cuyas dimensiones se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del peligro por acidificación del volcán Poás

1	2	3	4	5
Área restante de los conos demarcada a partir del límite de la zona 2	Polígono que incluye el área de máxima extinción de los eventos reportados	Elipse con eje mayor de 14 km	Elipse con eje mayor de 11 km	Elipse con eje mayor de 3,7 km

Flujos de lava

A partir de la topografía se asume que las futuras coladas de lava serán canalizadas por los actuales sistemas fluviales. Para la delimitación de las zonas potencialmente afectadas por flujos de lava, se supone que la siguiente erupción puede tener lugar en cualquier punto de las áreas fuente identificadas por los especialistas (Hoyuela, Gómez y Martínez 2012). Para esta investigación se consideró el cráter activo, la laguna Botos y los conos monogenéticos de Sabana Redonda (más precisamente la depresión vulcano-tectónica).

A partir de estas fuentes se creó una superficie de costo que consideró, en primer lugar, la distancia a los ríos, y en segundo lugar, la pendiente. En otras palabras, se parte del supuesto de que la lava fluiría por los cauces actuales y su extensión lateral estaría determinada por las pendientes de los valles.

Una vez identificadas las rutas posibles, a partir de las fuentes de lava, se clasificó el peligro en función de la distancia a la fuente; de acuerdo con los criterios establecidos en la tabla 4, dichas distancias parten del recorrido de las lavas de Sabana Redonda, según el mapa geológico levantado por la Escuela Centroamericana de Geología (2005).

Tabla 4. Clasificación del peligro por flujo de lava

1	2	3	4	5
8 a 10 km de la fuente de emisión	6 a 8 km de la fuente de emisión	4 a 6 km de la fuente de emisión	2 a 4 km de la fuente de emisión	0 a 2 km de la fuente de emisión

Flujos piroclásticos

Existen varias clasificaciones para los flujos piroclásticos, según la modalidad del fluido o el depósito resultante. De acuerdo con su tamaño, los pequeños o

moderados son rápidamente conducidos por la topografía, en particular por los valles, en contraposición a los violentos, capaces de sobrepasar las barreras topográficas de tamaño moderado, como sucedió en la erupción del Monte Santa Elena (Scott 1993). En el caso de los identificados para el Poás, resultan pequeños, posiblemente relacionados con colapsos de columna eruptiva.

El método propuesto en esta investigación es exclusivo para flujos piroclásticos moderados o pequeños y parte de los mismos principios empleados para identificar el peligro por lavas; la diferencia se encuentra en el criterio utilizado para determinar la extensión de cada nivel de peligro, el cual se obtuvo siguiendo un coeficiente de fricción o cono de energía; debido a la falta de registro geológico detallado en la zona, su formulación es la siguiente (Sheridan y Macías 1995):

$$f = H/L$$

Donde:

f: coeficiente de fricción de Heim

H: altura del edificio volcánico

L: distancia recorrida por el flujo

A partir de este coeficiente, la distancia máxima de recorrido de los materiales (L) puede aproximarse al modificar la fórmula de la siguiente forma:

$$L = H/f$$

En la tabla 5 se brindan los criterios seguidos para establecer las distancias que determinan las zonas de peligro, estos valores se deducen de varios estudios realizados en otros volcanes (Gardner et ál. 1995; Macías y Capra 2005; OVSICORI-UNA 2003; Saucedo et ál. 2005; Waythomas y Miller 1999).

Tabla 5. Valores de f para distintos niveles de peligro

1	3	5
f = 0,2	f = 0,3	f = 0,4

Oleadas piroclásticas

Las oleadas piroclásticas tienen una duración relativamente corta y su área de impacto se limita a la zona alrededor del cráter o siguiendo el área de flujos piroclásticos; generalmente se trata de menos de unos pocos kilómetros (Nakada 2000); así, por ejemplo, los depósitos reportados por Mora (2010) para los eventos de 1834, 1910 y 1953-1955, se ubican muy próximos al cráter principal. El criterio seguido fue establecer un corredor de 200 m

de ancho alrededor de cada zona de peligro establecida para los flujos piroclásticos, siguiendo el mismo principio utilizado en el mapa de amenazas del volcán Galeras en Colombia (Ingeominas 1997).

Lahares

Se asume que los lahares se originarían en la cima, más específicamente, a los alrededores del cráter activo, y que estos serían conducidos por los cauces de montaña.

Para determinar la sección de los cauces que serían afectados por este tipo de eventos se procede de la siguiente forma:

1. Por medio de fotointerpretación y análisis digital del terreno se identifican posibles áreas de aporte de materia, acordes con la actividad histórica del volcán.
2. Se digitaliza la red fluvial.
3. Se crea una superficie de costo, a partir de mapa de las pendientes, al reclasificarla en cinco categorías.
4. Se crea una superficie de costo por distancia euclidiana, que parte de la red fluvial.
5. Se crea un mapa de costo ponderado, que considera el mapa de costo de la pendiente y el costo por distancia de la red fluvial. De esta forma se determina el trazo que podrían seguir los lahares.

Se asume que la máxima extensión del lahar es alcanzada al llegar a una pendiente inferior a 1° (Van Westen 2000). La distancia recorrida por cada flujo se divide en 3 clases, al considerar que cada tipo de lahar es mayor que el anterior y, por consiguiente, alcanzaría una mayor altura en los valles y un mayor alcance longitudinal.

Resultados

A continuación se presentaran los resultados para cada amenaza de manera individual; posteriormente la información se combinará para cada celda (5 m x 5 m). Cuando en una misma celda se presentan varios peligros, se tomará como valor representativo el valor más alto de amenaza presente en ella.

Mapa de peligro por proyección balística

Las áreas de afectación por proyección balísticas fueron establecidas con base en criterios generales sobre el tema, como por ejemplo un radio de afectación de 5 km a partir del cráter activo (Blong 1984, reseñado por Williams 1986), de hasta 8 km para la Codillera Volcánica Central (Soto y Paniagua 1992), así como el trabajo de Mora (2010) realizado para el volcán Poás,

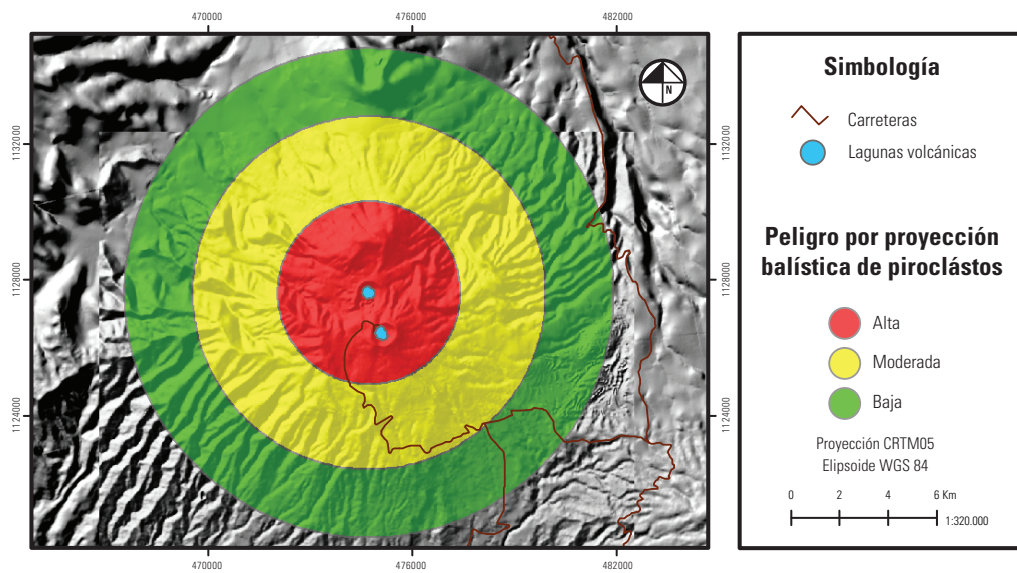


Figura 2. Peligro por proyección balística de piroclastos.
 Datos: base cartográfica *Atlas digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).

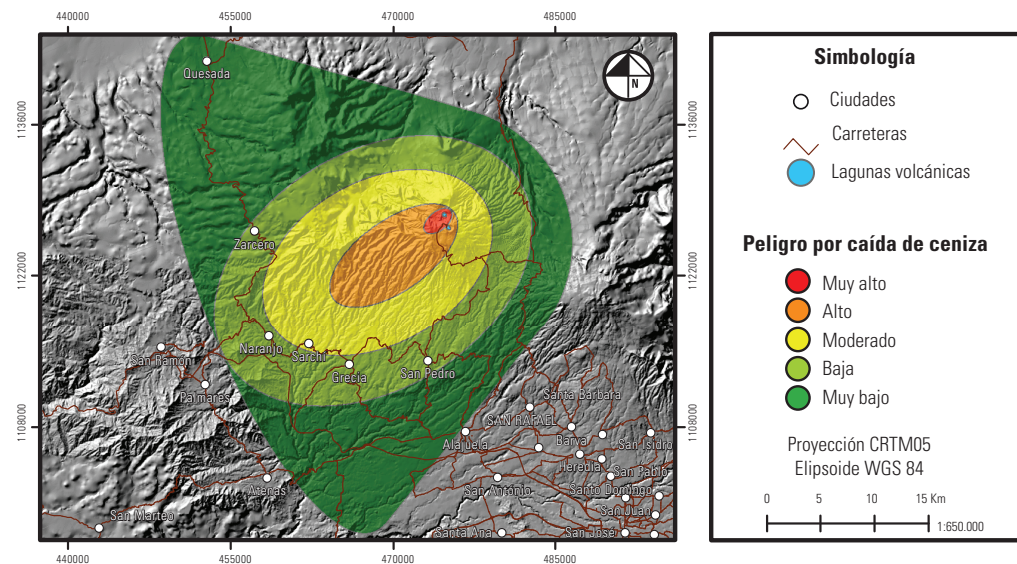


Figura 3. Peligro por caída de ceniza.
 Datos: base cartográfica *Atlas digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).

en el que establece un radio de 6,6 km para materiales volcánicos de entre 2 mm y 6,4 cm y de 2,5 km para caída de fragmentos mayores a 6,4 cm. A partir de esta revisión se establecieron áreas circulares con tres grados de peligrosidad, que van de alta a moderada y baja, definidos por radios de 2,5; 5 y 7 km, respectivamente (figura 2).

Mapa de peligro por caída de ceniza

Las direcciones de caída de cenizas fueron calculadas con base en el registro de vientos promedios, en altura de la estación Juan Santamaría (Alvarado y Fernández 2001), información que fue relacionada con las alturas de columnas (msnm), estimadas por Mora (2010) para eventos históricos.

El mapa resultante incorpora las direcciones de los conos para VEI 1, 2 y 3. En la práctica los conos correspondientes al VEI 3 se superponen a los conos de los otros VEI, por lo que se trazó una envolvente alrededor de estos últimos. Las zonas de peligro fueron definidas con elipses que siguen la dirección predominante del viento (vientos alisios), y su extensión está determinada por las zonas de afectación para los eventos ocurridos en 1989-1990 según los registros del OVSICORI (figura 3).

Mapa de peligro de acidificación por gases volcánicos

La emanación de gases volcánicos entraña dos peligros: los gases propiamente dichos y la lluvia ácida. Los efectos de los gases están directamente ligados a su concentración, la cual decrece, rápidamente con la distancia, desde el punto de emisión; normalmente el efecto nocivo está restringido al radio de unos 10 km desde del foco de emisión (Scott 1993). Para el caso del Poás, lo usual es que la depositación ácida se restrinja a un área de 3 km de longitud o menos, en la dirección principal del viento desde el cráter; no obstante, en 1988 alcanzó 15 km hacia el suroeste, cuando el lago estaba seco (Martínez et ál. 2000).

Al igual que en el caso de la caída de ceniza, para la definición de las zonas propensas a acidificación, se consideraron las direcciones predominantes del viento (vientos alisios del noroeste), próximas a la cima, no obstante, por la escasez de datos meteorológicos de esta área se utilizaron los registros de radiosondeo meteorológico correspondientes a los 700 hPa. El resultado final se observa en la figura 4.

Mapa de peligro por coladas de lava

En nuestro contexto vulcanológico, las lavas suelen ser de composición intermedia (andesíticas y andesíticas basálticas) de avance lento y recorridos inferiores a 14 km (Paniagua y Morales 1987). En el caso del Poás, en 1953 se produjeron emisiones de lava que estuvieron restringidas al cono de escorias (domo) del cráter principal y a una corta colada intracraterica que recorrió una distancia menor que 150 m (Mora 2010; Prosser y Carr 1987). Pequeñas coladas de lava son observables en la carretera hacia el volcán, entre Poasito y Los Pajareros, relacionadas con la fractura vulcanotectónica del Poás.

En la elaboración de este mapa se consideraron tres zonas de origen de lava: 1) el cráter activo, 2) la laguna Botos y 3) las zona de fractura vulcanotectónica en las proximidades de los conos piroclásticos de Sabana

Redonda, zona, esta última, que posiblemente sea la responsable de al menos 4 coladas de lava, por medio de un vulcanismo fisural (Gazel y Ruiz 2005). La figura 5 muestra la distribución del peligro en función de las distancias a las zonas de origen del magma.

Mapa de peligro por flujos piroclásticos

Varios trabajos sobre amenazas volcánicas que incluyen o se realizan en el Poás no hacen referencia a la ocurrencia de flujos piroclásticos en este volcán (Alvarado 2000; Alvarado, Pérez y Sigarán 2000; Mora 2010; Paniagua y Soto 1986). Sin embargo, de acuerdo con Malavassi, Gill y Trimble (1990) en el Poás se han originado dos flujos piroclásticos que rebasaron el borde SW de la zona confinada por fallas normales considerada anteriormente como una caldera cuspidal, ambos muy posiblemente originados en la base sur del cono Botos, el último flujo piroclástico está cubierto por un suelo húmico desarrollado y que tiene una edad de 9.570 ± 110 años y el anterior tiene un suelo desarrollado y es sobreyacido por depósitos del evento 1, el mismo tiene una edad de 9.840 ± 75 años.

El nivel de peligro se determinó a partir de la distancia al cráter principal, el cual se estableció con base en un coeficiente de fricción ($f = H/L$) como se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6. Estimación de la distancia de flujos piroclásticos obtenidos a partir del coeficiente de fricción

Valor del indicador	f	H	L
1	0,2	900	4500
3	0,3	900	3000
5	0,4	900	2250

El resultado se observa en la figura 6. En su delimitación se consideró que el cráter de Botos, así como el edificio del Von Frantzius, limitarían la expansión norte-sur de eventuales flujos, orientándolos hacia el este o el oeste.

Mapa de peligro por oleadas piroclásticas

Mora (2010) documenta la presencia de depósitos de oleadas piroclásticas ocurridas en al menos dos erupciones en los alrededores del cráter activo, pero los confina a la zona próxima al cráter. En esta investigación se limitó el término 'oleada piroclástica' a la nube acompañante de los flujos piroclásticos, por lo que su distribución estaría determinada por la de extensión estos últimos. La zonificación se aprecia en la

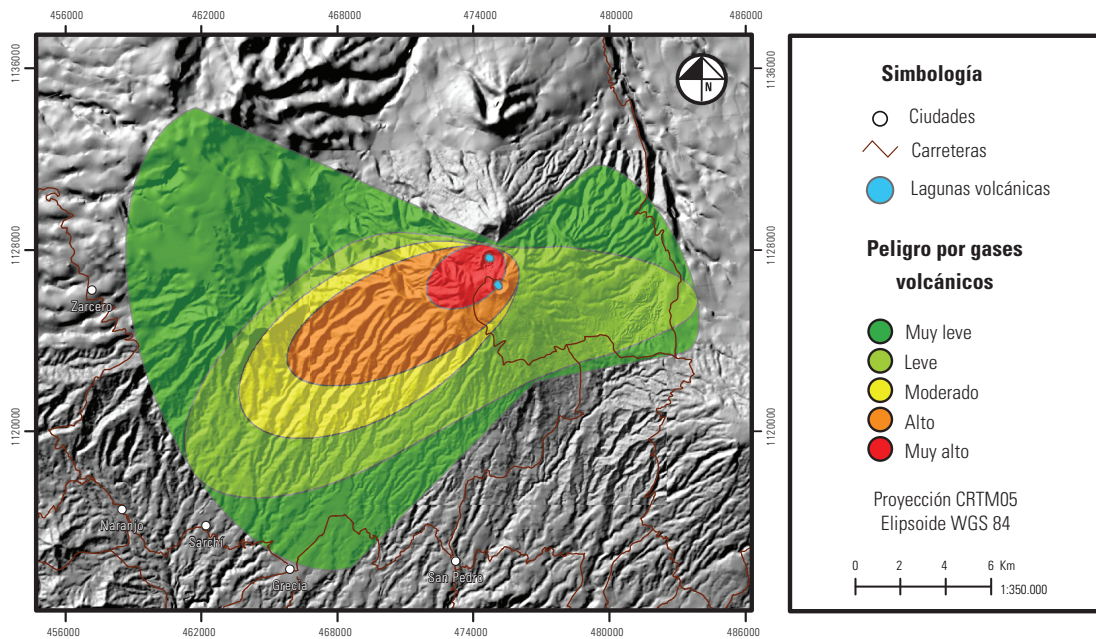


Figura 4. Peligro de acidificación por gases volcánicos.

Datos: base cartográfica *Atlas digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).

Nota: el cráter principal es el que se encuentra emanando gases (laguna ubicada más al norte) y el cráter Botos no presenta actividad de este tipo (laguna sur).

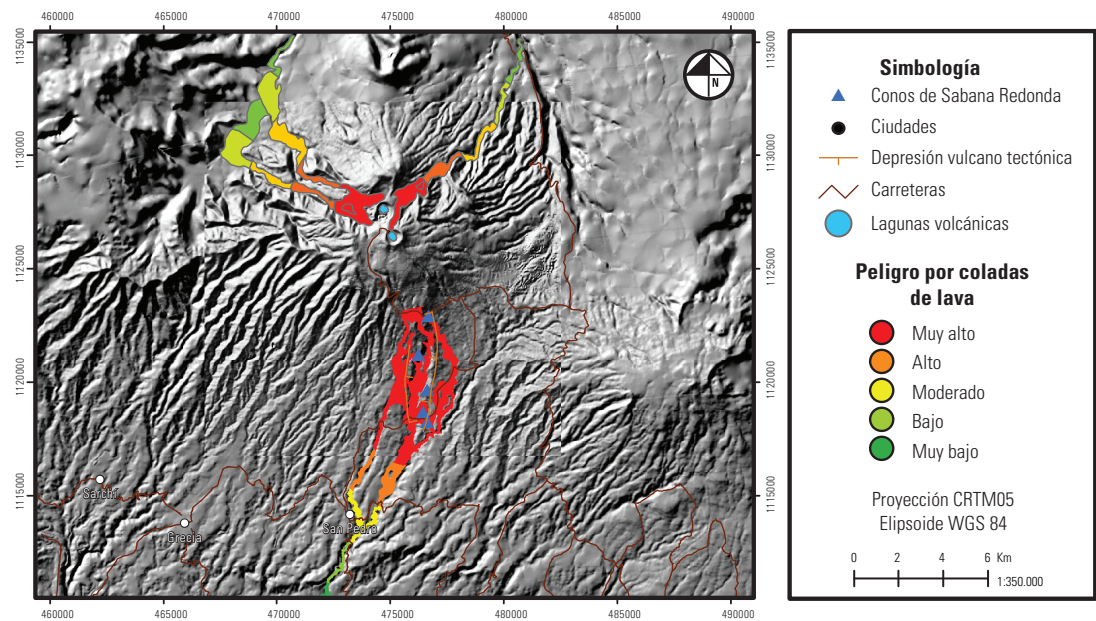


Figura 5. Peligro por coladas de lava.

Datos: base cartográfica *Atlas digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).

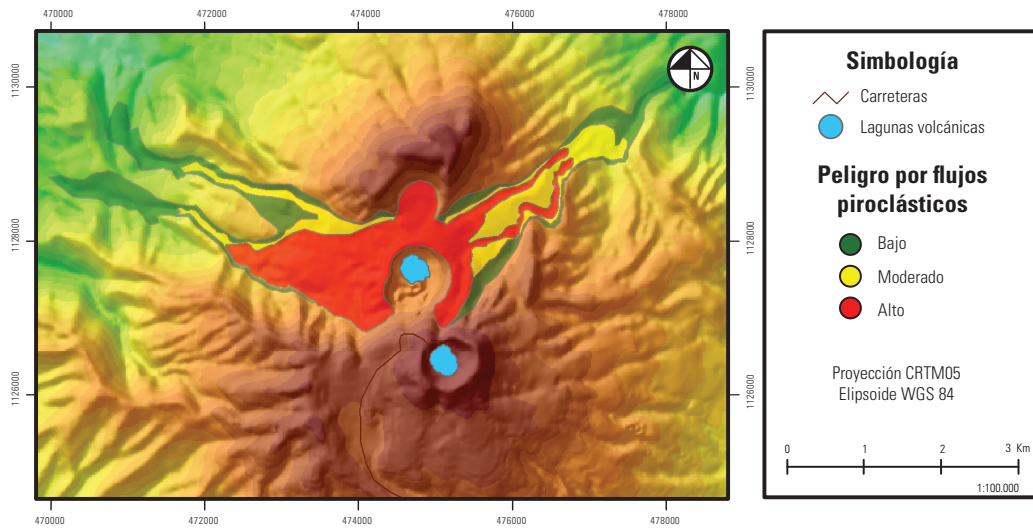


Figura 6. Peligro por flujos piroclásticos.
 Datos: base cartográfica *Atlas digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).
 Nota: los colores sobre el modelo de sombras representan la altitud, nótese el efecto de confinante que representan el cerro Von Frantzius y el cráter Botos (en café) para el tránsito de los flujos piroclásticos.

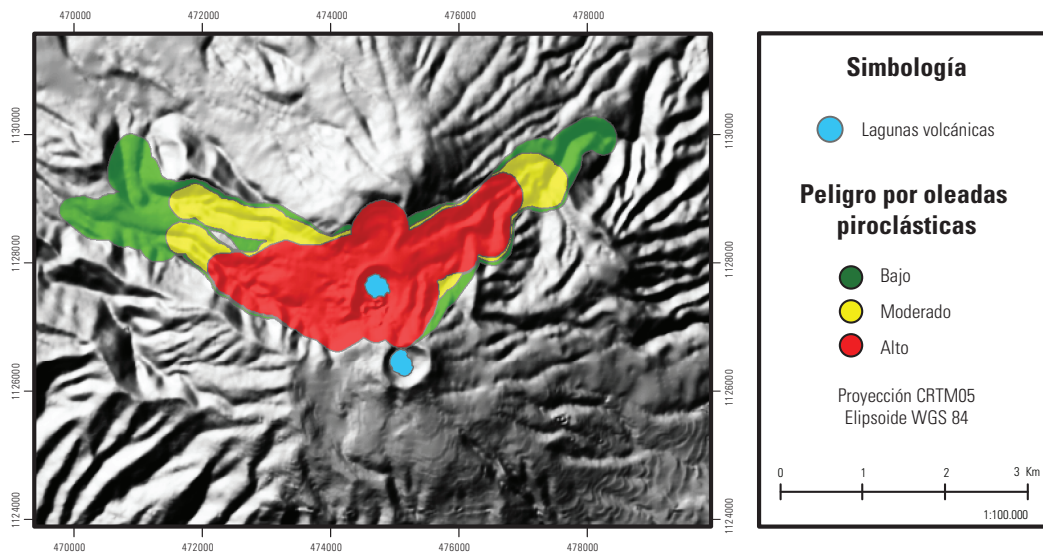


Figura 7. Peligro por oleadas piroclásticas.
 Datos: base cartográfica *Atlas Digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).

figura 7; nótese que los flujos ascienden por las laderas de los valles, por lo cual resultan en una extensión de las zonas de peligro de los flujos piroclásticos.

Mapa de peligro por lahares

En la figura 8 se propone la ruta a seguir por futuros lahares, con base en los cauces que alcanzan la cúspide del volcán, y cuyas cabeceras están sobre áreas que

se verían afectadas por acumulaciones importantes de materiales piroclásticos, los cuales, en condiciones meteorológicas extremas, como frentes fríos o influencia indirecta de ciclones tropicales, pueden generar flujos hiperconcentrados.

El trazado divide la amenaza en función a la proximidad del curso fluvial y a la topografía del terreno. Se asume que los flujos se detendrían al alcanzar sitios de

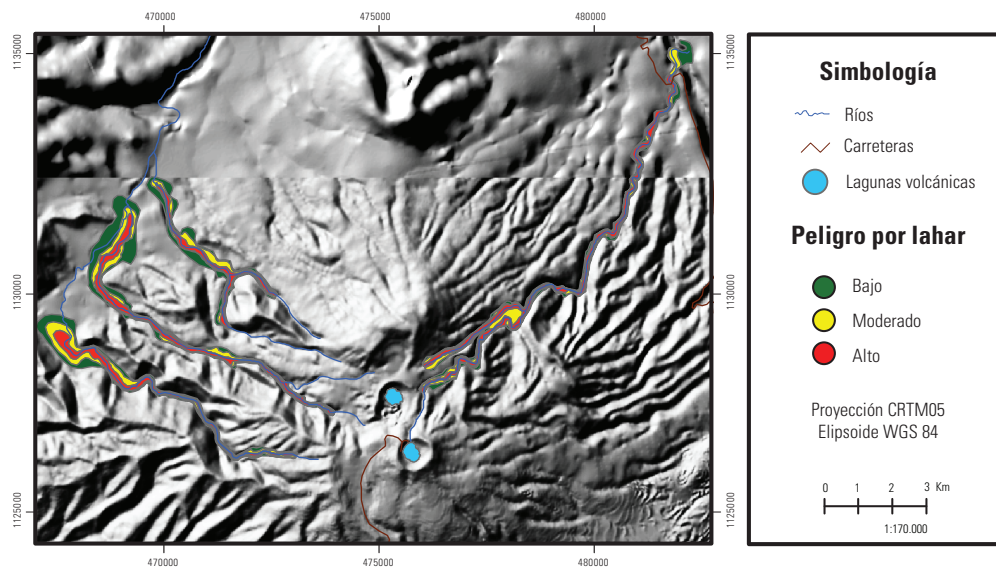


Figura 8. Peligro por lahares.
 Datos: base cartográfica *Atlas digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).

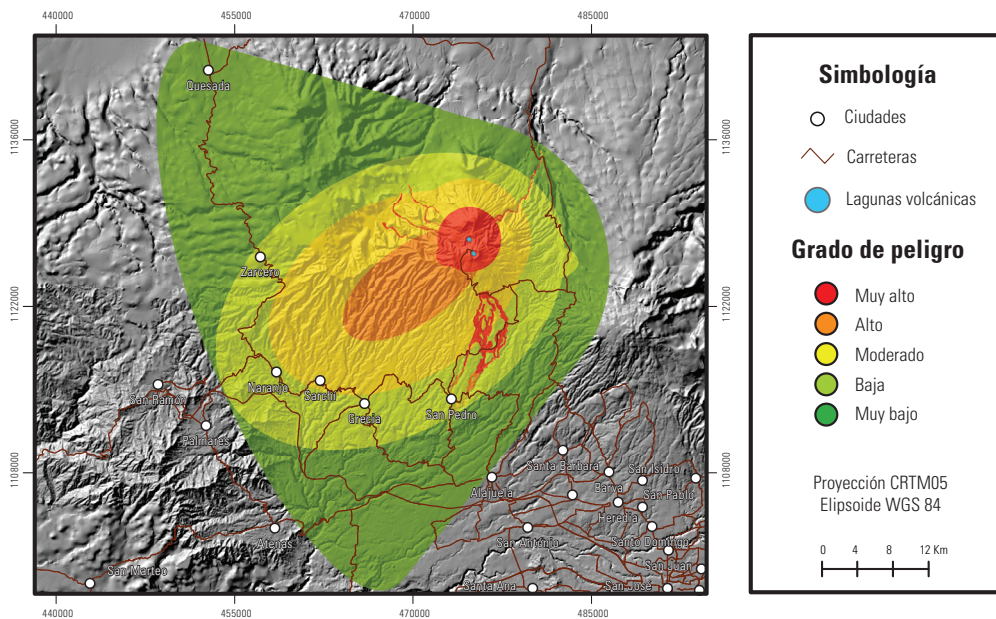


Figura 9. Peligros combinados del volcán Poás.
 Datos: base cartográfica *Atlas digital de Costa Rica* (Escuela de Ingeniería Forestal 2008).

muy baja pendiente ($> 1^\circ$), no obstante, al no considerar el volumen del material que podría verse involucrado no se delimita el posible recorrido de lahares pequeños (que quedarían contenidos en las áreas en rojo, pero con un menor recorrido) o de lahares muy grandes (que podrían abarcar la coalescencia de los conos aluviales, como el

que se presenta al N NE de edificio volcánico (figura 8), y en el sector este entrarían al cañón del río Saraquíquí).

Mapa de peligros combinados del volcán Poás

A continuación se presenta el mapa de peligros del volcán Poás, que resume todos estos y los clasifica de

acuerdo con los niveles de intensidad (figura 9). Su integración se basa en la superposición de dichas clasificaciones de los eventos individuales, asignando el mayor valor cuando se sobreponen dos o más peligros en un mismo espacio.

Como es de esperarse, la zona de muy alto peligro (en rojo) corresponde al área próxima al cráter activo y es extendida por los valles de los ríos que alcanzan dicha cima, debido a la posibilidad de que sean utilizados como vías para el tránsito de lahares, flujos piroclásticos y coladas de lava. La otra zona roja corresponde al sector de depresión vulcanotectónica, que diera origen a los conos piroclásticos de Sabana Redonda y a varias coladas de lava (Gazel y Ruiz 2005), es posible que puedan volverse a extruir magmas muy fluidos que originen coladas de lava; sin embargo, es poco probable, por tratarse de una zona de conos monogenéticos.

En cuanto a la distribución de las demás zonas de peligro, son el resultado principalmente de la dirección preferencial de los vientos (alisios), predominantemente hacia el suroeste, de esta forma transportarían los gases y tefras, principalmente hacia los poblados localizados en esta última dirección; sin embargo, es posible que tomen otras direcciones por lo que las zonas de muy bajo peligro se extienden en las direcciones noroeste. Asimismo, la brisa montaña valle y los vientos ecuatoriales se suman a las zonas circulares de peligro por proyección balística, para formar una granja circular de norte a este, de muy bajo peligro.

Discusión de resultados

El resultado de esta investigación se resume en un mapa de peligros para el volcán Poás, el cual tiene entre sus méritos haber sido desarrollado a una escala 1:50.000, con la intención de servir de referencia en estudios de ordenamiento territorial, como es el caso del Plan de Ordenamiento Territorial (plan regulador del uso del suelo) que está elaborando la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional en el Cantón de Poás. A diferencia de trabajos previos que responden a escalas regionales o solo identifican algunos peligros, como es el caso del mapa de peligros volcánicos de la Cordillera Volcánica Central (Soto y Paniagua 1992) o de los mapas elaborados por Mora (2010), en esta investigación se desarrollaron zonas de peligro de manera unificada, para culminar en un solo mapa de peligro aplicable al ordenamiento territorial.

Este estudio también representa un avance con respecto a las coberturas de amenaza de que dispone la CNE, debido a que en esa geodatabase se combinan diversos estudios y escalas, mientras que esta investigación se realizó con un propósito específico y a una misma escala.

El mapa de peligros combinados del volcán Poás resulta de fácil comprensión por parte de políticos y técnicos en información espacial que poseen escaso conocimiento sobre vulcanología, lo que facilita su uso en la planificación territorial y, con ello, en la reducción del riesgo.

Gustavo Barrantes Castillo

Geógrafo, Magíster en Computación y candidato a Doctor en Ciencias Naturales. Especialista en Gestión de Riesgos de Desastre. Subdirector de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional de Costa Rica.

Eduardo Malavassi Rojas

Geólogo, Magíster en Geología y Geofísica, y Ph. D. en Ciencias de la Tierra. Especialista en Vulcanología. Cofundador del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) en la Universidad Nacional de Costa Rica.

Referencias

- Alvarado, Guillermo. 2000. *Los volcanes de Costa Rica: geología, historia y riqueza natural*. 2^{ed}. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED).
- Alvarado, Guillermo, Wendy Pérez y Carolina Sigarán. 2000. "Vigilancia y peligro volcánico". En *Geología de Costa Rica*, editado por Percy Denyer y Siegfried Kussmaul, 251-272. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Alvarado, Luis Fernando y Walter Fernández. 2001. "Climatología de la atmósfera libre sobre Costa Rica". *Tópicos en Meteorología y Oceanografía* 8 (2): 89-115. <http://www.imn.ac.cr/publicaciones/revista/Luis%20Fer%201%20Fin1201.pdf>
- Álvarez, Juan y Galina Pridybailo. 2005. "Corrosión atmosférica en el volcán Poás, proyecto TROPICORR". *Tecnología en Marcha* 18 (2): 126-133.
- Astorga, Allan. 2008. *Análisis de alcance ambiental del Plan GAM*. Parte II. San José: Gran Área Metropolitana (GAM) del Valle Central de Costa Rica.
- Barrantes, Gustavo. 2012. "Deficiencias del índice de fragilidad ambiental en la valoración de las amenazas naturales para la planificación territorial". En *Torno a la Prevención* 9:1-9. <http://www.relaciger.org/revista/>
- Casertano, Lorenzo, Andrea Borgia y Corrado Cigolini. 1983. "El volcán Poás, Costa Rica: cronología y características de la actividad". *Geofísica Internacional* 22 (3): 215-236. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/view/39263/35702>
- Cepal (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) y BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2000. *Un tema del desarrollo: la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres*. México: Cepal, BID. <http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/4451/Un%20tema%20del%20desarrollo%3a%20la%20reducci%C3%B3n%20de%20la%20vulnerabilidad%20frente%20a%20los%20desastres.pdf?sequence=1>
- CNE (Centro Nacional de Atención y Prevención de Emergencias). 2009. *Mapa de amenazas naturales potenciales: hoja Poás*. Escala 1: 50.000. San José: CNE.
- Delmelle, Pierre y John Stix. 2000. "Volcanic Gases". En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 803-815. San Diego: Academic Press.
- Escuela Centroamericana de Geología. 2005. *Geología del cantón de Poás y estudios adicionales*. San José: Addendum Convenio AYA-FUNDEVI.
- Escuela de Ingeniería Forestal. 2008. *Atlas digital de Costa Rica. Base de datos georreferenciada*. CD-ROM. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Gardner, Cynthia, Kevin Scott, Dan Miller, Bobbie Myers, Wes Hildreth y Patrick Pringle. 1995. "Potential Volcanic Hazards from Future Activity of Mount Baker, Washington". *Open-File Report* 95-498. http://pubs.usgs.gov/of/1995/0498/pdf/of95-498_text.pdf
- Gazel, Esteban y Pablo Ruiz. 2005. "Los conos piroclásticos de Sabana Redonda: componente magmático enriquecido del volcán Poás, Costa Rica". *Revista Geológica de América Central* 33:45-60. DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.voi33.4235>.
- Heinimann Hans, Kurt Hollenstein, Hans Kienholz, Bernhard Krummenacher y Peter Mani. 1998. *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren*. Umwelt-Materialien 85. Berna: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Hoyuela, José, Francisca Gómez y Roberto Martínez. 2012. *Plan territorial espacial de ordenación para la prevención de riesgos*. Madrid: Centro de Observación y Teledetección Espacial (COTESA). http://www.tenerife.es/planes/PTEO-PrevRiesgos/adjuntos/Memo_Ordenoo.pdf
- Ingeominas (Instituto Colombiano de Geología y Minería). 1997. *Mapa de amenaza volcánica de Galeras: tercera versión*. Pasto: Ingeominas.
- Kappes, Melanie, Margreth Keiler, Kirsten von Elverfeldt y Thomas Glade. 2012. "Challenges of Analyzing Multi-hazard Risk: A Review". *Natural Hazards* 64 (2): 1925-1958. DOI: 10.1007/s11069-012-0294-2.
- Keller, Edward y Robert Blodgett. 2004. *Riesgos naturales*. Madrid: Prentice-Hall.
- Macías, José Luis y Lucía Capra. 2005. *Los volcanes y sus amenazas*. México: Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Educación Pública (SEP), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).
- Malavassi, Eduardo, J. B. Gill y D. Trimble. 1990. "Nuevas dataciones radiométricas del alineamiento volcánico del Poás (Costa Rica): contribución a la evaluación de peligros volcánicos". Resúmenes de ponencias y afiches presentados al VII Congreso Geológico de América Central, 19 al 23 de noviembre, 28-29. Heredia: Universidad Nacional de Costa Rica.
- Martínez, María, Eduardo Fernández, Juan Valdés, Vilma Barboza, Rodolfo Van der Laet, Eliécer Duarte, Eduardo Malavassi, Lisseth Sandoval, Jorge Barquero y Tomás Marino. 2000. "Chemical Evolution and Volcanic Activity of the Active Crater Lake of Poás Volcano, Costa Rica, 1993-1997". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 97 (1-4): 127-141. DOI:10.1016/S0377-0273(99)00165-1.

- Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. 2013. *Política nacional de ordenamiento territorial 2012 a 2040*. San José: Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos.
- Mora, Raúl. 2010. "Peligrosidad volcánica del Poás basada en las principales erupciones históricas de 1834, 1910 y 1953-1955". Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, Heredia.
- Nakada, Setsuya. 2000. "Hazards from Pyroclastic Flows and Surges". En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 945-956. San Diego: Academic Press.
- OVSICORI-UNA (Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica). 2003. *Mapa de restricciones al uso del suelo y libre tránsito de personas, volcán Arena, Costa Rica*. Escala 1:25.000. Heredia: OVSICORI-UNA.
- Paniagua, Sergio y Luis Diego Morales. 1987. "Peligro sísmico y volcánico en Costa Rica: consideraciones para su prevención". *Geostmo* 1 (2): 11-24.
- Paniagua, Sergio y Gerardo Soto. 1986. "Reconocimiento de los riesgos volcánicos potenciales de la Cordillera Central de Costa Rica, América Central". *Ciencia y Tecnología* 10 (2): 49-72.
- Peterson, Donald W. y Robert I. Tilling. 2000. "Lava Flow Hazards". En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 957-972. San Diego: Academic Press.
- Predecán (Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina). 2009. *Incorporando la gestión del riesgo de desastres en la planificación y gestión territorial: guía técnica para la interpretación y aplicación del análisis de amenazas y riesgos*. Lima: Secretaría General de la Comunidad Andina. <http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/Incorporando%20la%20gestion%20del%20riesgo%20de%20desastres%20en%20la%20planificacion%20y%20gestion%20territorial.pdf>
- Prosser, Jerome T. y Michael J. Carr. 1987. "Poás Volcano, Costa Rica: Geology of the Summit Region and Spatial and Temporal Variations among the most Recent Lavas". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 33 (1-3): 131-146. DOI: 10.1016/0377-0273(87)90057-6.
- Saucedo, Ricardo, José Luis Macías, Michael F. Sheridan, Marcus I. Bursik y Jean-Christophe Komorowski. 2005. "Modeling of Pyroclastic Flows of Colima Volcano, Mexico: Implications for Hazard Assessment". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 139 (1-2): 103-115. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2004.06.019.
- Scott, William. 1993. "Los peligros volcánicos". En *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos*, editado por Robert Tilling, 9-24. Traducido por Bernardo Beate. Santa Fé: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos.
- Sheridan, Michael F. y José Luis Macías. 1995. "Estimation of Risk Probability for Gravity-driven Pyroclastic Flows at Volcan Colima, Mexico". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 66 (1): 251-256.
- Soto, Gerardo y Sergio Paniagua. 1992. "Cordillera Volcánica Central (Costa Rica): sus peligros y prevenciones". *Revista Geográfica de América Central* 1 (25-26): 291-304. <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2915>
- Universidad de Costa Rica. 2014. "Poás". *RSN: UCR-ICE (Red Sismológica Nacional)*. <http://www.rsn.ucr.ac.cr/index.php/vulcanologia/informacion-general/31-poas>.
- Vallance, James. 2000. "Lahares". En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 601-616. San Diego: Academic Press.
- Van Westen, Cees. 2000. *Estudio preliminar de amenazas naturales en la cuenca del río Turrialba, cantón de Turrialba, Costa Rica*. Turrialba: International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC).
- Vargas, Carlos. 1979. *Antología el Volcán Poás*. San José: EUNED.
- Waythomas, Christopher y Thomas Miller. 1999. *Preliminary Volcano Hazard Assessment for Iliamna Volcano, Alaska*. Open-File Report 99-373. Reston: United States Geological Survey (USGS). <http://pubs.usgs.gov/of/1999/0373/pdf/of99-373text.pdf>
- Williams, Glyn y Hazel Rymer. 2000. "Hazards of Volcanic Gases". En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 997-1004. San Diego: Academic Press.
- Williams, S. N. 1986. Reseña de *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions* de Russell J. Blong, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 30 (3-4): 379-380. DOI: 10.1016/0377-0273(86)90062-4.
- Zárate, Eladio. 1988. "Factores meteorológicos asociados a desastres causados por erupciones volcánicas en Costa Rica". *Ciencia y Tecnología* 12 (1-2): 41-52.
- Zárate, Eladio. 1989. *Elementos meteorológicos importantes para la toma de decisiones con respecto a las emanaciones contaminantes del volcán Poás*. San José: Instituto Meteorológico Nacional.

Bibliografía

- Tarbuk, Edward y Frederick Lutgens. 1999. *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física*. 6^{ed}. Traducido por Ana María Rubio. Madrid: Prentice Hall.