

Protocolo de evaluación de los peligros asociados a la actividad volcánica mediante modelos numéricos: aplicación a los volcanes Isluga y Láscar (Chile)

Alfredo Esquivel^{1,2}, Felipe Aguilera^{1,2}

¹ Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Chile – aec005@ucn.cl

² Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN), CONICYT-FONDAP 15110017, Chile

Palabras clave: Peligros volcánicos, Modelos numéricos, Mapas de peligro.

1. Introducción

Evaluar y cuantificar los peligros de los sistemas volcánicos activos es uno de los desafíos prioritarios en la vulcanología actual. Generalmente, esta evaluación se realiza al peligro considerado la mayor amenaza tanto para las personas como área afectada; sin embargo, el enfoque a un sólo fenómeno representa un problema, ya que simplifica y desestima la variedad de procesos que típicamente desencadena una erupción volcánica, siendo más íntegro un planteamiento multi-peligro del volcán estudiado (Kappes et al.; 2012).

En los últimos años, el desarrollo y perfeccionamiento del modelamiento de procesos volcánicos se ha convertido en una herramienta útil para la evaluación de estos fenómenos y se han obtenido mapas de peligros volcánicos a partir de las simulaciones numéricas de posibles escenarios eruptivos que contribuyen a la definición y gestión de planes de emergencia orientados a la mitigación del impacto por erupciones volcánicas, así como también planificación territorial. La evaluación debe ser desarrollada necesariamente en base al conocimiento de la historia eruptiva del volcán y considerar el crecimiento de la población en las áreas volcánicas activas (Martí; 2017).

2. Características de los volcanes Isluga y Láscar

Los volcanes Isluga y Láscar se encuentran localizados en el segmento volcánico conocido como Zona Volcánica Central (ZVC) que corresponde a la zona de convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana entre los 16-28° S, donde existen 32 volcanes activos en territorio chileno.

Localizado en la Región de Tarapacá a los 19°09' S y 68°50' O, el volcán Isluga se encuentra a 24 km al NO de Colchane, alcanza los 5.550 m s.n.m. de altura máxima y presenta 3 cráteres alineados en dirección E-O, incluido el cráter activo de unos 400 m de diámetro. El volcán Isluga se caracteriza por la presencia de fumarolas permanentes, donde su última actividad conocida fue en 1960 (Cascante, 2015).

El volcán Láscar se ubica en los 23°22' S y 67°44' O en la Región de Antofagasta, a aproximadamente 70 km al SE de San Pedro de Atacama y a unos 17 km al E de Talabre. Tiene una altitud de 5.590 m s.n.m. y 5 cráteres, de los cuales el central corresponde al cráter activo con un diámetro y profundidad aproximada de 800 y 400 m respectivamente. Es actualmente el volcán más activo de la ZVC, con más de 30 eventos eruptivos de diferente magnitud desde el siglo XIX (Gardeweg et al., 2011).

3. Propuesta de escenarios eruptivos

Con el propósito de parametrizar contextos eruptivos para el volcán Láscar e Isluga, cuantificar la peligrosidad volcánica de estos, y posteriormente poder comparar los resultados obtenidos, se proponen cuatro escenarios eruptivos. La definición y caracterización de los escenarios eruptivos se desarrolló en base a criterios de primer orden que evalúan una erupción volcánica, estos son los siguientes: Índice de Explosividad Volcánica (IEV), volumen de tefra erupcionada en km³, altura de la columna eruptiva en km sobre el nivel del cráter y la duración de la fase eruptiva principal.

Escenario 1: Definido con un IEV 2, la altura de la columna eruptiva de 5 km sobre el cráter, se considera un volumen total de material erupcionado de 0.001 km³ y una duración de erupción de 2 horas.

Escenario 2: Determinado con un IEV 3, la columna eruptiva presenta una elevación de 10 km sobre el centro eruptivo, un volumen de tefra total de 0.01 km³ y duración de 4 horas de la erupción.

Escenario 3: Caracterizado por un IEV 4, con una altura de la columna eruptiva de 25 km desde el cráter, volumen de material erupcionado total de 0.1 km³ y una duración de la actividad eruptiva principal de 8 horas.

Escenario 4: Definido como el peor escenario de los cuatro propuestos, con un IEV 5, presenta una altura de 35 km de columna eruptiva sobre el cráter,

volumen de tefra erupcionada de 1 km^3 y fase eruptiva principal con duración de 12 horas.

4. Modelado de los escenarios eruptivos

Los softwares que se emplearon para simular y evaluar cada proceso, se describen a continuación:

ASH3D: Modelo de volumen finito Euleriano 3-D que predice el movimiento y dispersión de la concentración de cenizas volcánicas transportadas por el aire y la deposición de tefra durante erupciones volcánicas. El programa fue desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos y sus fundamentos son descritos en detalle por Schwaiger et al. (2012). Las variables que ingresa el usuario son el nombre del volcán que entrega la ubicación de este, la fecha, hora y duración de la erupción, la altura de la pluma, volumen erupcionado como roca densa equivalente (RDE) del magma y la duración de la simulación. Los archivos resultantes que entrega el modelo se encuentran la carga, concentración y altura de la nube de cenizas, espesor de los depósitos, tiempo de arribo de la nube y el depósito luego de la erupción, así como los aeropuertos afectados.

Los parámetros eruptivos utilizados en el modelo Ash3D corresponden a los cuatro escenarios presentados en la sección anterior. La selección de las fechas en las cuales se simularon las erupciones explosivas se basa en la modelación de direcciones de viento “no tradicionales” características en el fenómeno conocido como invierno altiplánico, se consideran días correspondientes al año 2015 en los meses que se caracteriza este fenómeno con direcciones SW, W y NW. Para el volcán Isluga se consideraron los días 31 de Enero, 4 de Febrero y 14 de Febrero. En el volcán Lásca se simuló en los días 21 de Enero, 9 de Marzo y 20 de Marzo.

LAHARZ: Modelo computacional semi-empírico desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos, descrito en profundidad por Schilling (2014). Permite delinear posibles zonas de inundación producto de flujos laháricos a través de una combinación de análisis dimensional y estadístico. Entre los parámetros de entrada para el programa se encuentra el modelo de elevación digital (DEM), el volumen del lahar, las coordenadas del inicio de descarga y el valor de la pendiente (H/L). Para la obtención de los volúmenes de agua potenciales de producir cada evento lahárico, se consideró el menor y el mayor volumen de agua de lluvia en dos meses diferentes para un año estándar en cada volcán, correspondiendo para el Isluga en el mes de Febrero a 121 mm y en Junio a 0,5 mm, mientras que para el Lásca se produjo en Febrero 46 mm y el mínimo fue en Noviembre con 0,8 mm. En el desarrollo de los volúmenes de depósitos de caída, el área de cada drenaje es multiplicado por los espesores de depósito de caída resultantes de la simulación de Ash3D en la zona correspondiente a la

ubicación del drenaje individual, dicho procedimiento se lleva a cabo para el escenario 1 y 4, siendo equivalentes a erupciones explosivas de volumen bajo y alto, respectivamente. Una vez obtenido esto es posible calcular el volumen total del lahar, considerando como flujo de detritos con una proporción de volumen de sólidos de 60% y volumen de agua disponible de 40%.

Q-LAVHA: Complemento que simula la probabilidad de inundación de flujos de lava canalizada a partir de una o varias chimeneas eruptivas distribuidas regularmente en un modelo de elevación digital (DEM) y sus principios son explicados por Mossoux et al. (2016). Los parámetros de entrada que requiere son el DEM, las coordenadas de la chimenea eruptiva o fisura origen de la colada, factores correctivos topográficos, umbral de probabilidad y cantidad de iteraciones. Los parámetros de simulación introducidos para ambos volcanes fueron: factor correctivo H_c , que representa el espesor de la lava y el cual se ingresó 30 m tomado como referencia la erupción del Puyehue-Cordón Caulle del año 2011 caracterizado con un IEV 5. El emplazamiento de la lava se controla mediante la tasa de efusión, la cual se usó también como referencia la erupción del Puyehue-Cordón Caulle, ingresando un valor de $80 \text{ m}^3/\text{s}$; la viscosidad inicial de lava se consideró para una composición andesítica promedio de 1000 Pascal*segundo; la fracción inicial de masa de fenocristales de 0,3 y una proporción del canal (ancho/profundidad) de 1.

TITAN2D: Simula flujos granulares tales como avalanchas de detritos, flujos piroclásticos y deslizamiento de tierra sobre un DEM, es descrito en profundidad por Patra et al. (2005). Combina simulaciones numéricas de un flujo con datos de un DEM sobre una interfaz de un GIS y se puede ejecutar de forma online en la plataforma Vhub (<https://vhub.org/tools/titan2d>). Los parámetros que se ingresan en la interfaz son el DEM, las dimensiones de una pila inicial de material, incluyendo la forma, dirección, altura, volumen, posición y velocidad inicial; ángulo de fricción interna y basal; tiempo límite de simulación. Lo que se obtiene como resultado final son la distribución, altura del material depositado sobre el terreno, velocidades del flujo y alcance. Se modela como flujo piroclástico al producido por el colapso de la columna eruptiva generada en cada escenario propuesto, por lo que la velocidad inicial fue considerada 0. Definido como un paraboloide, los parámetros de simulación para la pila corresponden a los volúmenes establecidos para los 4 escenarios.

BALLISTIC: Modelo numérico tridimensional para la dinámica de los proyectiles balísticos volcánicos, considerándolas partículas elipsoidales. Este programa y sus fundamentos son detallados por Bertin (2017). Para los cuatro escenarios eruptivos se

establecieron los siguientes parámetros: la densidad del bloque con un rango entre 1420 y 2540 kg/m³, ángulo de lanzamiento entre 40 y 50°, azimut de lanzamiento considerando todas las direcciones posibles entre 0 y 360°, la velocidad del viento al momento que afecta la trayectoria entre 0 y 30 m/s y la dirección del viento entre 0 y 360°. Se asignó un rango de valores para velocidad de lanzamiento en cada escenario de acuerdo a la magnitud eruptiva.

5. Resultados

PROYECTILES BALÍSTICOS: El alcance de los proyectiles balísticos en el volcán Isluga (ver Fig. 1a) para el escenario 4, el área afectada se expande hacia el NW y SW hasta los 3,5 km de distancia. En el volcán Láscar (ver Fig. 1b) se visualiza con el escenario 4 que la zona de peligro se caracteriza por una longitud de 4 km al flanco occidental y NW.

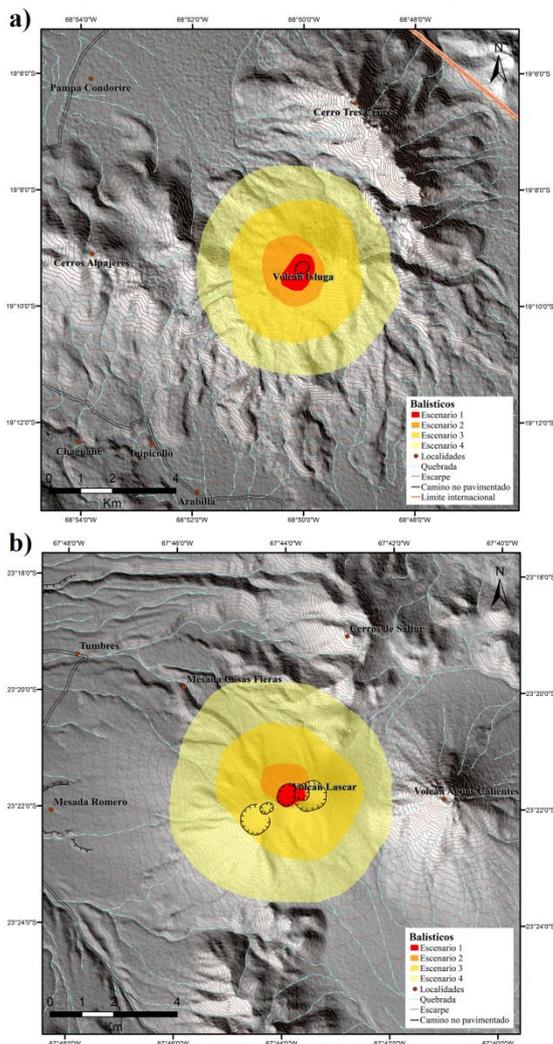


Fig. 1 – Mapas de peligro para proyectiles balísticos a escala 1:75.000. a) Volcán Isluga, b) Volcán Láscar.

FLUJO DE LAVA: Los alcances de los flujos de lava en el volcán Isluga (ver Fig. 2a) para el escenario 4 la distancia del flujo llega a 2,8 km por la pendiente

S. En el área de peligro de flujos de lava para el volcán Láscar (ver Fig. 2b) la longitud del flujo llega hasta los 2,5 km por el flanco N del volcán. Ningún poblado o caserío cercano a ambos volcanes en estudio se verían afectados por flujos de lava, al igual que los caminos secundarios que conectan estas localidades.

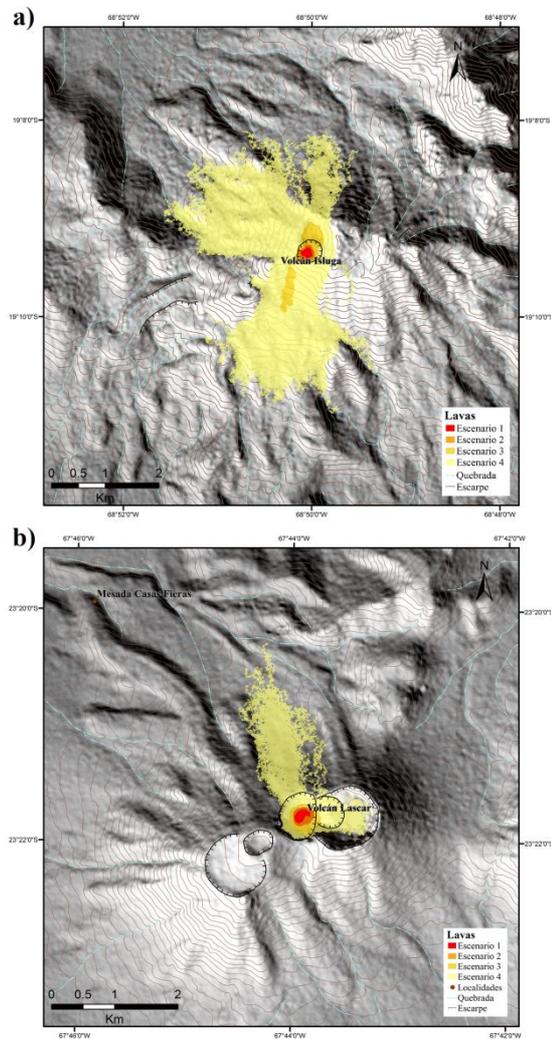


Fig. 2 – Mapas de peligro para flujos de lava a escala 1:50.000. a) Volcán Isluga, b) Volcán Láscar.

LAHARES: El alcance máximo de los eventos laháricos en el escenario 4 del volcán Isluga con valores mínimos y máximos de lluvias (ver Fig. 3a) es de 10,8 km desde el cráter. Los lahares tendrían impacto en las cercanías del caserío de Payacollo, la laguna Arabilla, a 1,2 km del caserío Arabilla, el caserío Chapicollo, vías de comunicación y las cercanías a la localidad de Enquelga. En el escenario 4 con mínimas y máximas precipitaciones para el volcán Láscar (ver Fig. 3b) alcanzarían hasta 12 km, los cuales podrían afectar caminos secundarios y la localidad de Tumbres.

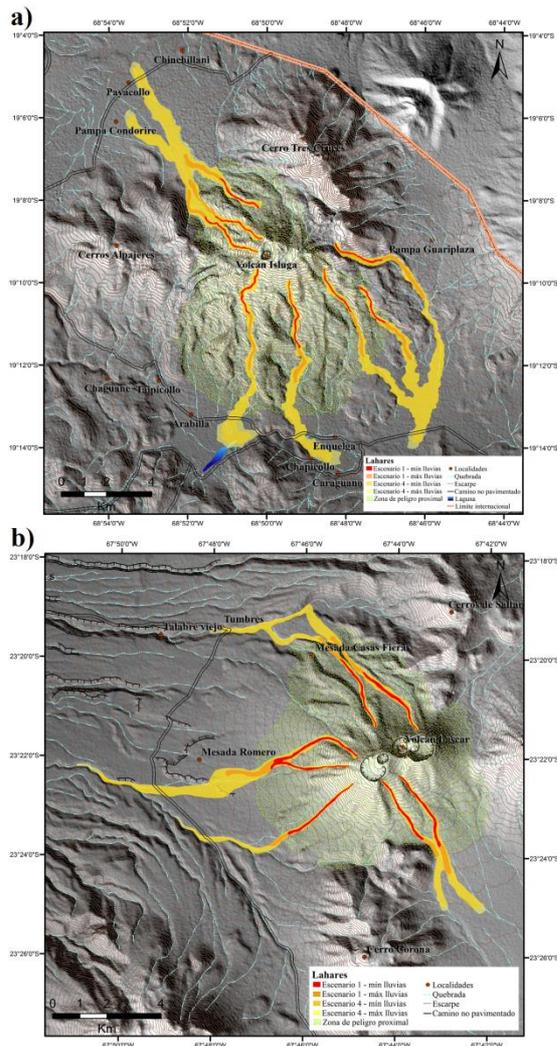


Fig. 3 – Mapas de peligro para flujos de lahares a escala 1:100.000. a) Volcán Isluga, b) Volcán Láscar.

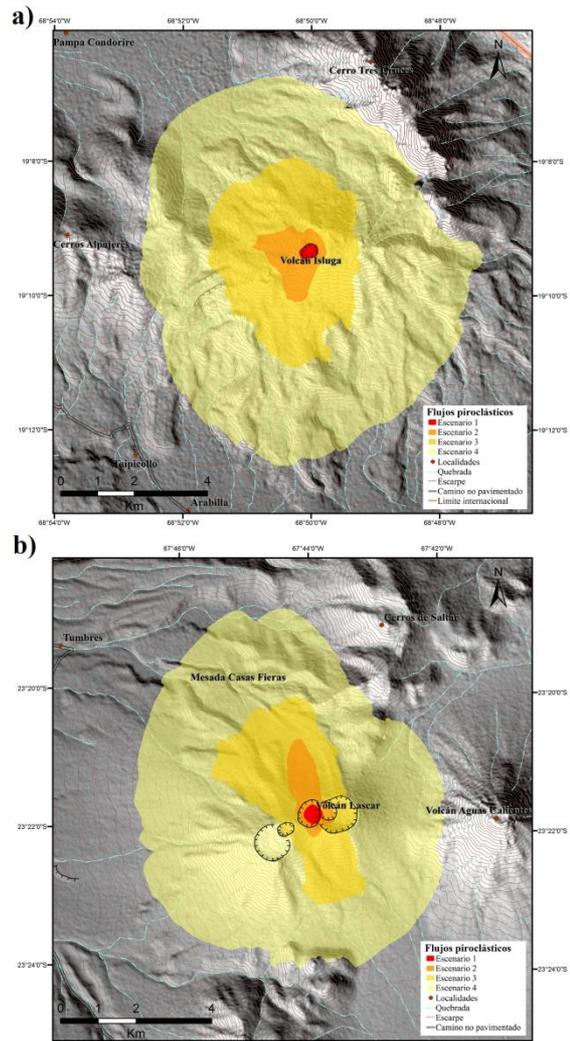


Fig. 4 – Mapas de peligro para flujos piroclásticos a escala 1:75.000. a) Volcán Isluga, b) Volcán Láscar.

FLUJOS PIROCLÁSTICOS: El alcance máximo en el escenario 4 de los flujos piroclásticos corresponde para el volcán Isluga (ver Fig. 4a) a 5,7 km. En el volcán Láscar (ver Fig. 4b) la distribución del alcance del flujo en el escenario 4 alcanzaría hacia el N su máxima distancia con 5,7 km.

CAÍDA DE CENIZA: En los mapas de caída de ceniza, la extensión en un radio máximo de peligro alrededor de los cráteres activos corresponden en el escenario 4 entre 440 y 610 km (ver Figs. 5a y 5b) para ambos volcanes. Las ciudades situadas a más de 150 km de distancia de los cráteres activos, tales como Iquique, Pozo Almonte, Pica y Antofagasta aparecen afectadas por depósitos de caída de tefra de hasta 1 mm. En consecuencia, las erupciones en concordancia con las direcciones de los vientos "no tradicionales", podrían afectar considerablemente tanto a las ciudades más pobladas (ciudades normalmente costeras) en el norte de Chile, como aeropuertos y rutas de vuelos locales.

5. Conclusiones

Los mapas de peligro volcánico resultantes fueron presentados de forma individual para cada proceso volcánico. Al realizar una comparación en ambos volcanes de la zonificación de peligros para el peor escenario (ver Figs. 6 y 7), lo que resultó en el de proyectiles balísticos, es que la mayor distancia que alcanzaría el área de peligro corresponde al volcán Láscar con 4 km, en el volcán Isluga llegaría a los 3.5 km, en ninguno de los dos casos impactaría algún asentamiento humano. En el caso de flujo de lava, el volcán Isluga presentaría el mayor alcance con 2.8 km, el volcán Láscar llegaría a 2.5 km, no afectarían a ningún poblado. Con respecto a los lahares, en el volcán Láscar se alcanzaría la mayor distancia con 12 km, en el volcán Isluga impactaría hasta 10.8 km, los lahares podrían dañar caminos secundarios y la localidad de Tumbres para la zona del Láscar y afectaría las vías de comunicación, las proximidades del poblado Enquelga, los caseríos Payacollo,

Arabilla, Chapicollo y la laguna Arabilla. El máximo alcance de flujos piroclásticos para ambos volcanes sería de 5.7 km hacia el S en el volcán Isluga y hacia el N en el Láscar. En la dispersión de cenizas, la extensión del radio de peligro alcanzaría su máxima en el volcán Isluga con 610 km, en el volcán Láscar sería 440 km, afectaría ciudades como Arica, Iquique, Calama y Antofagasta.

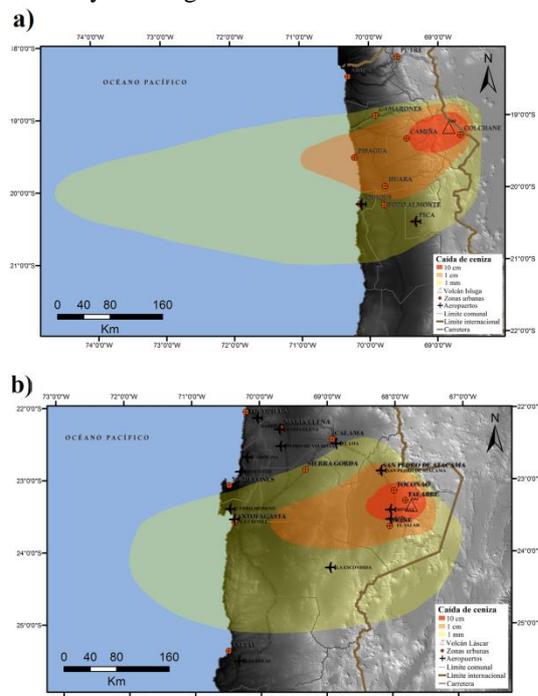


Fig. 5 – Mapas de peligro para caída de ceniza. a) Escenario 4 en volcán Isluga a escala 1:4.000.000, b) Escenario 4 en volcán Láscar a escala 1:4.000.000.

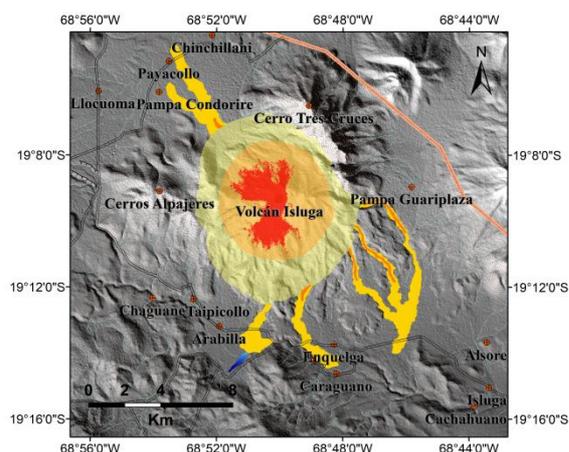


Fig. 6 – Mapa de peligros del volcán Isluga a escala 1:125.000. El área en tono rojizo corresponde al flujo de lava, en tono anaranjado los proyectiles balísticos y en tono amarillo los flujos piroclásticos. Los peligros más distales como lahares se diferencian en probabilidad de ocurrencia alto (anaranjado) e intermedio (amarillo).

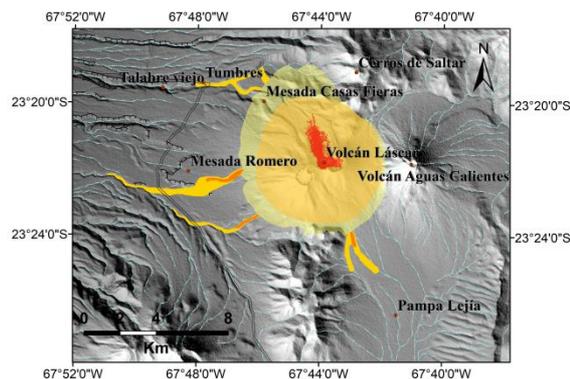


Fig. 7 – Mapa de peligros del volcán Láscar a escala 1:125.000. El área en tono rojizo corresponde al flujo de lava, en tono anaranjado los proyectiles balísticos y en tono amarillo los flujos piroclásticos. Los peligros más distales como lahares se diferencian en probabilidad de ocurrencia alto (anaranjado) e intermedio (amarillo).

Referencias

Bertin, D., 2017. 3- D ballistic transport of ellipsoidal volcanic projectiles considering horizontal wind field and variable shape- dependent drag coefficients. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, 1126-1151.

Cascante M., 2015. Evolución geológica y magmática del volcán Isluga, 19° S, región de Tarapacá, Chile. Tesis de magister en ciencias, mención geología. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 197p.

Gardeweg, M., Amigo, A., Matthews, S., Sparks, R., Clavero, J., 2011. Geología del volcán Láscar, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 131, 43 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

Kappes, M., Keiler, M., von Elverfeldt, K., Glade, T., 2012. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural hazards*, Vol. 64, 1925-1958.

Martí, J. 2017. Assessing Volcanic Hazard: A Review. *Oxford Handbooks Online*. From <http://www.oxfordhandbooks.com/view/10.1093/oxfordhb/9780190676889.001.0001/oxfordhb9780190676889-e-32>.

Mossoux, S., Saey, M., Bartolini, S., Poppe, S., Canters, F., Kervyn, M., 2016. Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers & Geosciences*, Vol. 97, 98-109.

Patra, A., Bauer, A., Nichita, C., Pitman, E., Sheridan, M., Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Stinton, A., Namikawa, L., Renschler, C., 2005. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 139, 1-21.

Schilling, S., 2014. Laharz_py: GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones. US Geological Survey.

Schwaiger, H., Denlinger, R., Mastin, L., 2012. Ash3d: A finite- volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 117.