

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE ZONAS DE INUNDACIÓN POR LAHARES

Fernando Henríquez G. ¹, Diego Caamaño A. ² y Robert W. King³

RESUMEN:

Los lahares son flujos gravitacionales que se forman en las laderas de un volcán, y corresponden a una mezcla de distintos sedimentos y agua. Su origen puede ser pluvial o glacial (Smith & Fritz, 1989), y es un fenómeno que corresponde a uno de los procesos volcánicos más destructivos y letales, debido a su alta energía y movilidad (González, 1995). Por lo tanto, la estimación de las zonas de inundación es de suma importancia para identificar y clasificar las zonas de riesgo.

En este estudio se modelan los lahares generados por la erupción del Volcán Villarrica ocurrida el año 1971. Esta erupción se caracterizó por un abundante derretimiento de nieve y hielo generando siete distintos flujos laharicos en la ladera nor-oeste del volcán. Cabe notar que la ciudad de Pucón, que alberga a cerca de 33.000 habitantes, se encuentra a una distancia de 15km del volcán lo que conlleva un alto nivel de riesgo para la población e infraestructura (Mapa de Riesgo Volcánico SERNAGEOMIN, 2000). En este estudio se utiliza un software de simple formulación matemática para cuantificar las zonas de inundación de flujos laharicos. Esta herramienta, diseñada por el USGS, se denominada LAHARZ y privilegia la velocidad del cálculo por sobre la precisión en la delimitación de la zona inundada. La simplicidad del modelo se basa en la utilización de parámetros que caracterizan la longitud y el área de la superficie inundada en función del volumen de flujo. Las magnitudes de estos parámetros se proponen en el manual de usuario del software (Iverson et al., 1998) y se estiman como el promedio de los valores obtenidos en calibraciones de eventos de lahares conocidos y documentados a nivel mundial.

Se ajustan los valores de los parámetros del modelo sobre la base de la información disponible de los lahares de 1971. Los parámetros obtenidos se correlacionan con la información topográfica disponible extraída de un modelo de elevación digital, y como resultado del análisis se obtienen expresiones matemáticas para estimar los parámetros sobre la base de información del relieve. Estas expresiones se utilizan para alimentar al modelo LAHARZ y simular el flujo laharico ocurrido en el volcán Calbuco en el año 1961. Se comparan las respuestas del modelo con los parámetros definidos a través de las expresiones propuestas, y también utilizando los valores promedio sugeridos por el manual del software. Se obtiene que utilizando LAHARZ con los parámetros obtenidos de la función propuesta se logra un resultado más cercano a la realidad, que sugiere que la estimación sobre la base de criterios in situ para ambos parámetros mejora los resultados esperados del modelo. Quedaría por verificar la transferibilidad de los datos a otros volcanes con relieves y geologías diferentes.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fhenriquez@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

ABSTRACT:

Lahars are gravitational flows that form on the slopes of volcanos, consisting of a mixture of sediments and water. They can originate from rain or ice (Smith & Fritz, 1989), and corresponds to one of most destructive and deadliest volcanic processes, due to its high energy and mobility (Gonzalez, 1995). Therefore, the estimation of areas of flooding is of importance in order to identify and classify areas of risk.

This study models lahars generated during the 1971 eruption of the Villarrica volcano. This eruption is characterized by an abundant melting of snow and ice, generating seven different lahar flows on the north-west slope of the volcano. It should be noted that the city of Pucón with a population of about 33,000 is located at a distance of 15 km from the volcano, which leads to a high level of risk for the population and infrastructure (Mapa de Riesgo Volcánico SERNAGEOMIN, 2000). This study uses a simple mathematical formulation software to quantify areas of flooding from lahar flows. This software, designed by the USGS, is called LAHARZ and prioritizes the speed of calculation over accuracy in the delimitation of the area of flooding. The simplicity of the model is based on the use of parameters that characterizes the length and area of the flooded surface in function on the volume of the flow. The magnitudes of these parameters are proposed in the software's user manual (Iverson et al., 1998) and are estimated from the average of values obtained in the calibration of known and documented global lahar events.

The values of the parameters of the model are adjusted on the basis of information available from the 1971 lahars. The parameters obtained are correlated with available topographic information extracted from a digital elevation model, and as a result of the analysis, mathematical expressions are obtained to estimate the parameters on the basis of information of the relief. These expressions were used to feed the LAHARZ model and simulate the lahar flow that occurred on the Calbuco volcan in 1961. Outputs of the model were compared with the parameters defined by the proposed expressions, and also using the average values suggested by the software manual. Using LAHARZ with the parameters obtained from the proposed function achieve results closer to reality, which suggests that the estimation on the basis of in-situ criteria for both parameters improves the results expected from the model. The next step is to verify the transferability of the data to other volcanoes with reliefs and geology.

1. INTRODUCCIÓN

La zona volcánica sur (ZVS), que se encuentra ubicada en la zona centro-sur de los Andes Chilenos, es un área donde se concentra cerca del 70% de la población chilena (Stern, 2004). Esta zona abarca más de 60 volcanes de los cuales la gran mayoría se encuentra en estado activo, siendo uno de éstos el volcán Villarrica. Los registros de los últimos 200 años señalan que los peligros volcánicos que han afectado a la ZVS han sido: flujos de lava, caída de cenizas, flujos piroclásticos y lahares (Stern, 2004).

El volcán Villarrica está ubicado en el límite de las Regiones de la Araucanía y de los Ríos, Chile, entre los lagos Villarrica y Calafquén, y abarca parte de las comunas de Villarrica, Pucón y Panguipulli. A sus pies se encuentran las localidades turísticas de Villarrica, Pucón, Licán Ray y Coñaripe, además de otros centros poblados. Corresponde a un estratovolcán cuyos eventos volcánicos se traducen principalmente en coladas de lava y piroclastos de caída de composición predominante andesítico- basáltica (Clavero y Moreno, 2004). Es uno de los volcanes más activos de Chile con 59 erupciones documentadas desde 1558 (Petit-Breuih y Lobato, 1994). Uno de sus mayores eventos eruptivos ocurre el año 1971, el que se caracterizó por un abundante derretimiento de nieve y hielo generando siete distintos flujos laháricos en la ladera nor-oeste del volcán. Éstos corresponden a flujos gravitacionales que están conformados por una mezcla de distintos sedimentos y agua, la cual puede ser de origen pluvial o glaciár (Smith & Fritz, 1989).

En este estudio analizaremos los métodos de estimación de parámetros para caracterizar los flujos laháricos, sobre la base de la erupción de 1971 que ocupó los cauces de los siguientes esteros y ríos: 1) Estero Chaillupén, 2) Estero Seco, 3) Río Voipir, 4) Estero Correntoso, 5) Zanjón Seco, 6) Río Pedregoso y 7) Río Turbio.

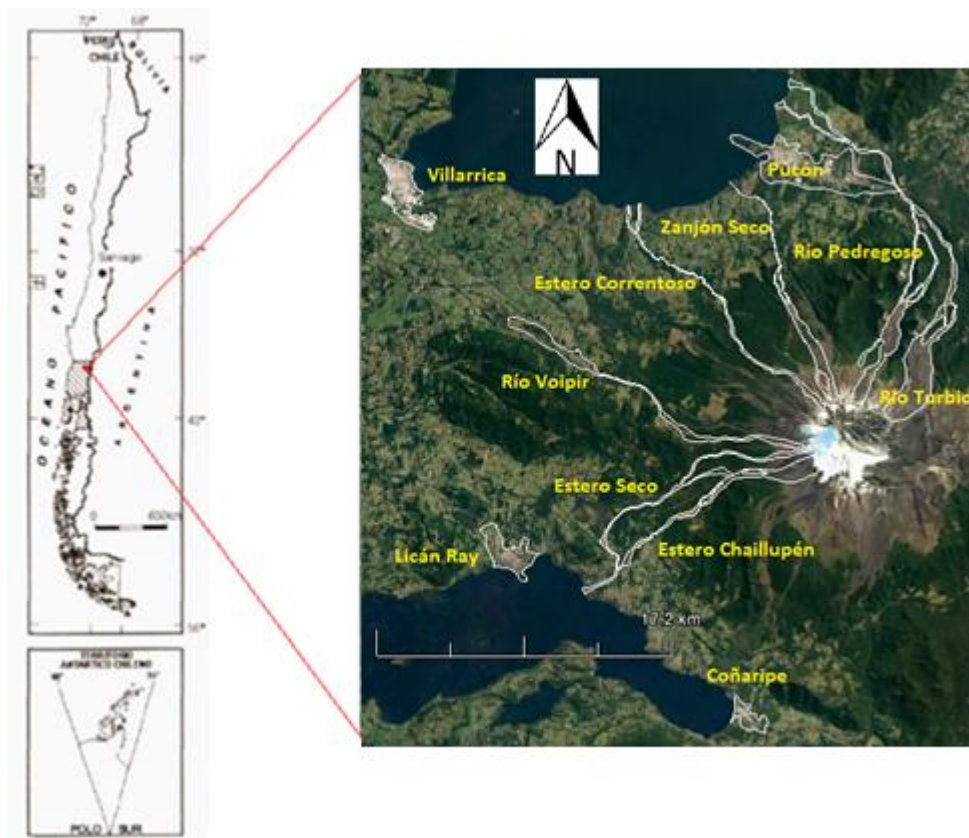


Figura 1: Mapa de ubicación nacional e imagen satelital del volcán Villarrica (Modificada de Google Earth)

2. MÉTODOS

Primero se simularon matemáticamente los siete lahares ocurridos luego de la erupción del Volcán Villarrica del año 1971. La herramienta matemática utilizada para llevar a cabo las simulaciones de cada uno de los flujos laháricos es un software denominado LAHARZ.

LAHARZ es un programa computacional desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1998 (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) que permite delinear zonas de peligro volcánico, asociadas a la posible inundación generada por flujos laháricos a través de un método semi-empírico. El software utiliza una combinación de análisis dimensional y estadístico para determinar las áreas de inundación transversal (A) y planimétricas (B) generadas por el flujo lahárico, en función del volumen que este posea (Figura 2). A través de una serie de ecuaciones en las cuales se asume que la masa y la densidad de los lahares son constantes, se llega a la relación de las variables A y B indicadas en las ecuaciones 1 y 2. Los detalles de cómo se obtienen tales relaciones se encuentran en Iverson et al. (1998).

$$A = K_1 \cdot V^{2/3} \quad (1)$$

$$B = K_2 \cdot V^{2/3} \quad (2)$$

Donde V es el volumen del lahar, K_1 y K_2 son dos los parámetros utilizados por el modelo (i.e. constantes adimensionales).

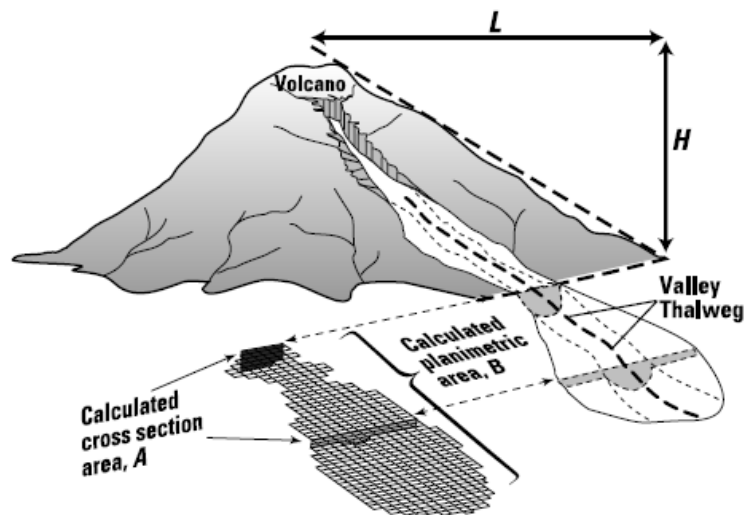


Figura 2: Área de inundación transversal (A) y planimetría (B) generadas por el flujo lahárico en LAHARZ. La razón H/L describe el alcance de la zona de peligro a partir de la cual comienza la depositación en la simulación (de Schilling, 1998).

Las magnitudes de los parámetros K_1 y K_2 son sugeridas en el protocolo de procedimiento descrito en el manual de usuario (Iverson et al., 1998), y se obtienen del análisis de datos históricos de 27 lahares en 9 volcanes a nivel mundial. Se determinaron los depósitos de dichos eventos y cuantificaron las respectivas variables A y B para cada uno de ellos. Los valores de las variables se relacionan matemáticamente con las magnitudes de los volúmenes respectivos, cuantificándose de esta forma los parámetros del modelo, $K_1 = 0,05$ y $K_2 = 200$, y que se representan en las ecuaciones 3 y 4.

$$A = 0,05 \cdot V^{2/3} \quad (3)$$

$$B = 200 \cdot V^{2/3} \quad (4)$$

Entonces, según lo sugerido, con estas dos ecuaciones se estiman las áreas de inundación de los lahares para eventos caracterizados por diferentes volúmenes.

La hipótesis de este trabajo plantea que la determinación de los parámetros a través de variables in situ, ofrecería una mayor precisión en la estimación de las zonas de inundación en LAHARZ. Consecuentemente, se propone utilizar el relieve como variable para la determinación de los parámetros K_1 y K_2 . A través de un modelo de elevación digital (DEM) de 30mx30m de resolución se miden las pendientes de la ladera del volcán y del valle subyacente para cada uno de los siete lahares documentados en 1971 (Figura 3). Los datos obtenidos se combinan para encontrar la mejor relación con los parámetros de cada flujo. Un ejemplo de determinación de pendientes para el estero Chaillupén se indica en la Figura 4, un proceso análogo se realiza para los otros seis cauces.



Figura 3: Trayectoria de los siete lahares registrados en el Volcán Villarrica para el evento de 1971.

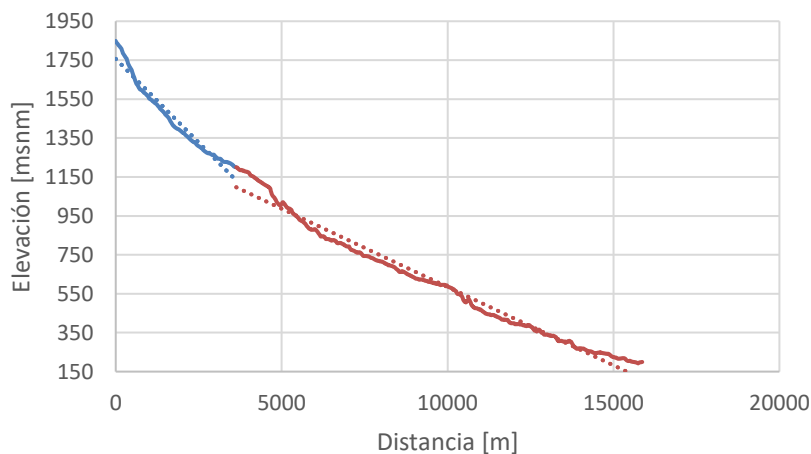


Figura 4: Línea de tendencia para las pendientes del volcán y del valle subyacente para el estero Chaillupén

3. RESULTADOS

El DEM se obtuvo de la página de la NASA (reverb.echo.nasa.gov), correspondiente a una base de datos ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). La representación gráfica del resultado se aprecia en la Figura 5.

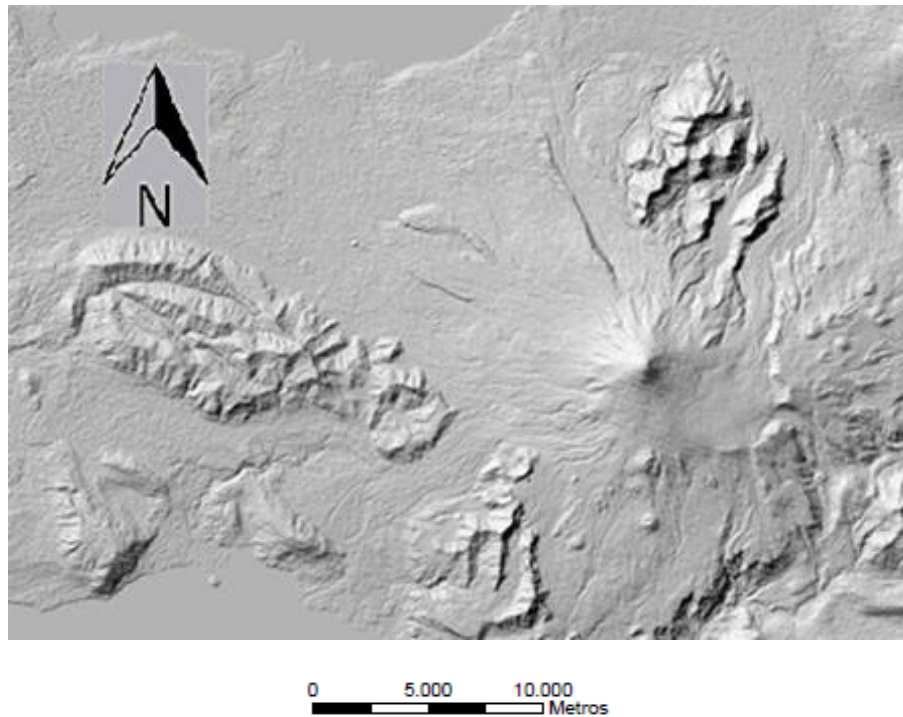


Figura 5: Modelo de elevación digital del Volcán Villarrica, resolución 30mx30m

Utilizando la herramienta Create Surface Hydrology Raster, del modelo LAHARZ, se construyó la red de drenaje del Volcán Villarrica (Figura 6).

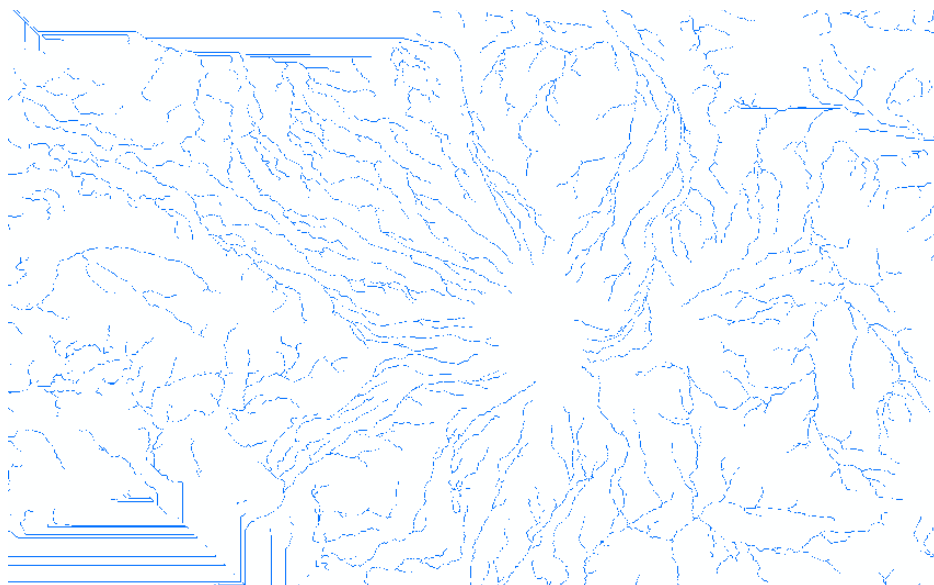


Figura 6: Red de drenaje generado con LAHARZ en el volcán Villarrica

Los volúmenes del flujo se obtienen de una recopilación de investigaciones cuyos resultados y autores se resumen en la Tabla 1. El punto de origen de los lahares se considera localizado en la isoterma cero que se encuentra a una cota de aproximadamente 1800msnm, puesto que representa el comienzo del escurrimiento superficial sobre la ladera. Cabe notar que la estimación de los volúmenes en cada uno de los trabajos considerados utiliza el mismo método descrito en Pierson (1998).

Tabla 1: Volúmenes utilizados en la modelación

Cauce	Evento	Fuente	Volumen [x10 ⁶ m ³]
Río Voipir	Villarrica 1971	Castruccio (2009)	16.7
Zanión Seco	Villarrica 1971	INH (2014)	16.3
Río Turbio	Villarrica 1971	Naranjo y Moreno (2004)	32.6
Río Pedregoso	Villarrica 1971	Naranjo y Moreno (2004)	32.6
Estero Seco	Villarrica 1971	GEOESTUDIOS (2013)	8.7
Estero Correntoso	Villarrica 1971	GEOESTUDIOS (2013)	7.1
Estero Chaillupén	Villarrica 1971	Naranjo y Moreno (2004)	50.1

La comparación de las zonas de inundación de los lahares se realiza a través de la superposición de las áreas documentas (Figura 7) y las áreas simuladas en LAHARZ, y cuyo resultado se indica en la Figura 8.

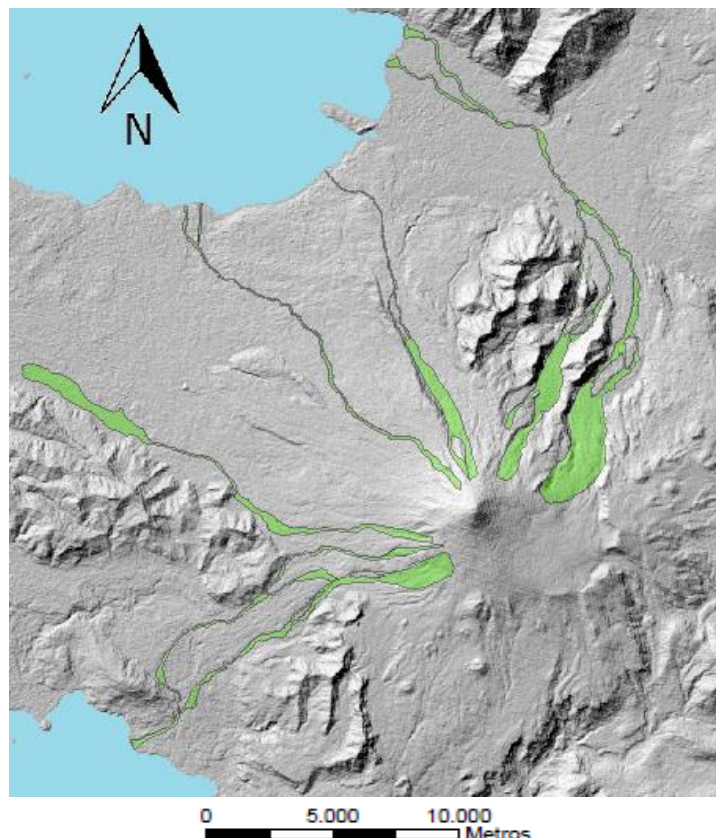


Figura 7: Área de los lahares documentados en el volcán Villarrica proyectados sobre el DEM

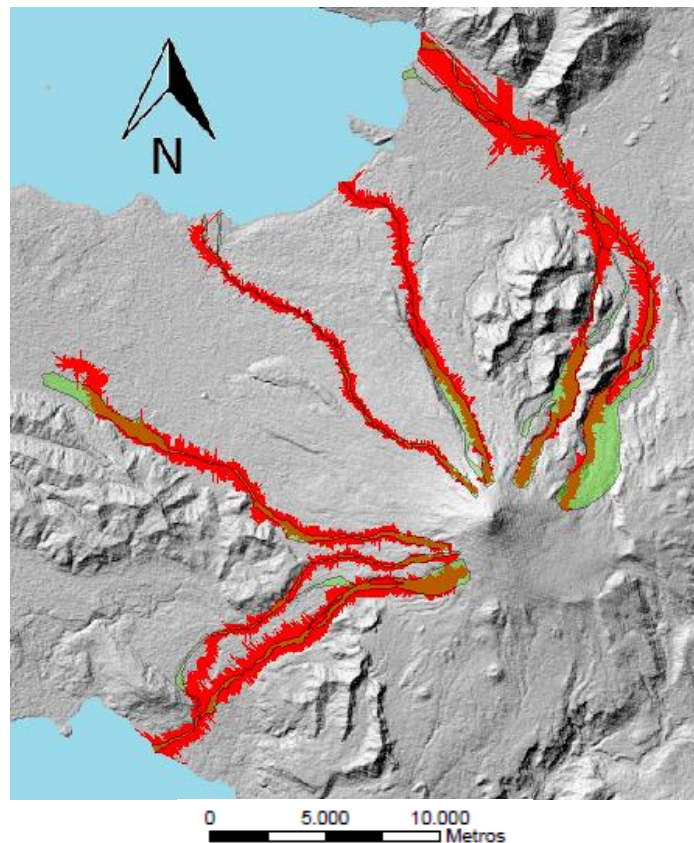


Figura 8: Resultados de las áreas simuladas con LAHARZ (en rojo) superpuestas sobre las áreas de inundación documentas y representadas en la Figura 7.

Se puede observar que, utilizando las ecuaciones 3 y 4 propuestas por defecto en el software, se sobre estima el área de inundación de los lahares ocurridos en 1971. Consecuentemente se ajustan los valores de los parámetros K_1 y K_2 a través de un proceso de calibración del tipo prueba y error, con el fin de acercar las áreas de inundación a aquellas presentadas en la Figura 7.

Lo valores obtenidos se muestran en la Tabla 2, en que B es el área proyectada para cada uno de los lahares de la Figura 7.

Tabla 2: Valores de las constantes adimensionales K_1 y K_2

Cauce	Volumen [x10 ⁶ m ³]	B [m ²]	K_2	K_1
Río Voipir	16.7	6179755.08	94.59	0.014
Zanjón Seco	16.3	3623737.291	56.37	0.01
Río Turbio	32.6	12677040.03	124.22	0.016
Río Pedregoso	32.6	14429715.07	141.40	0.02
Estero Seco	8.7	2876461.44	68.00	0.0085
Estero Correntoso	7.1	2206711.832	59.74	0.006
Estero Chaillupén	50.1	5311195.078	39.08	0.004

Siete nuevas modelaciones se llevaron a cabo considerando esta vez los parámetros calibrados e indicados en la Tabla 2, obteniendo los resultados que se aprecian en la Figura 9.

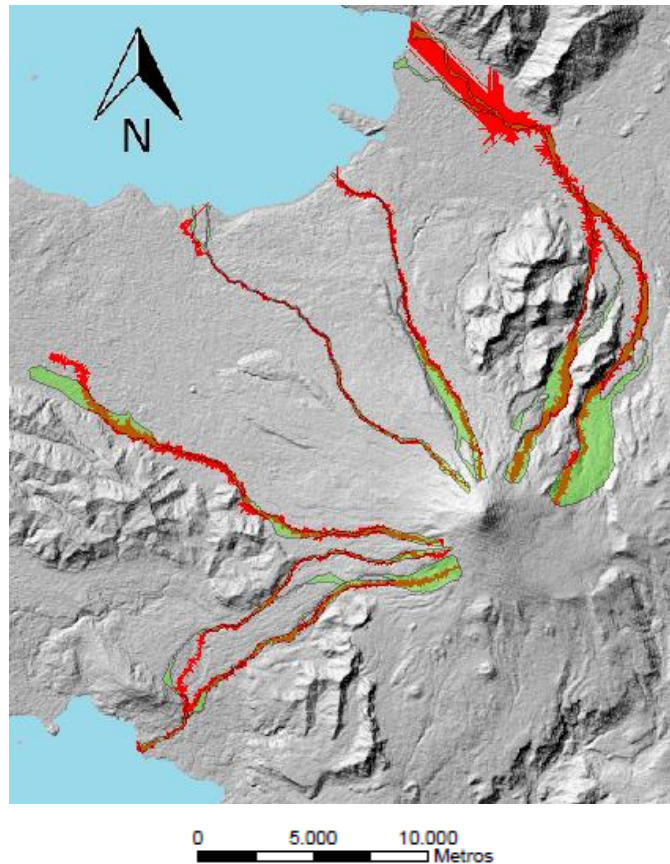


Figura 9: Resultados de las áreas simuladas con LAHARZ (en rojo) utilizando los parámetros de la Tabla 2 y superpuestas sobre las áreas de inundación en la Figura 7

Tabla 3: Valores obtenidos de la pendiente del volcán (S_{vo}) y Pendiente del Valle (S_{va}) para los diferentes cauces de los lahares ocurridos en el volcán Villarrica en el año 1971

Cauce	S_{vo}	S_{va}	S_{va}/S_{vo}
Río Voipir	0.173	0.046	0.265
Zanjón Seco	0.243	0.073	0.301
Río Turbio	0.223	0.038	0.170
Río Pedregoso	0.302	0.042	0.139
Estero Seco	0.198	0.062	0.312
Estero Correntoso	0.216	0.067	0.309
Estero Chaillupén	0.172	0.081	0.468

Las constantes adimensionales K_1 y K_2 de la Tabla 2 se grafican con la variable adimensional obtenida del relieve y definida como S_{va}/S_{vo} (Tabla 3). Los resultados gráficos se muestran en las figuras 10 y 11, respectivamente.

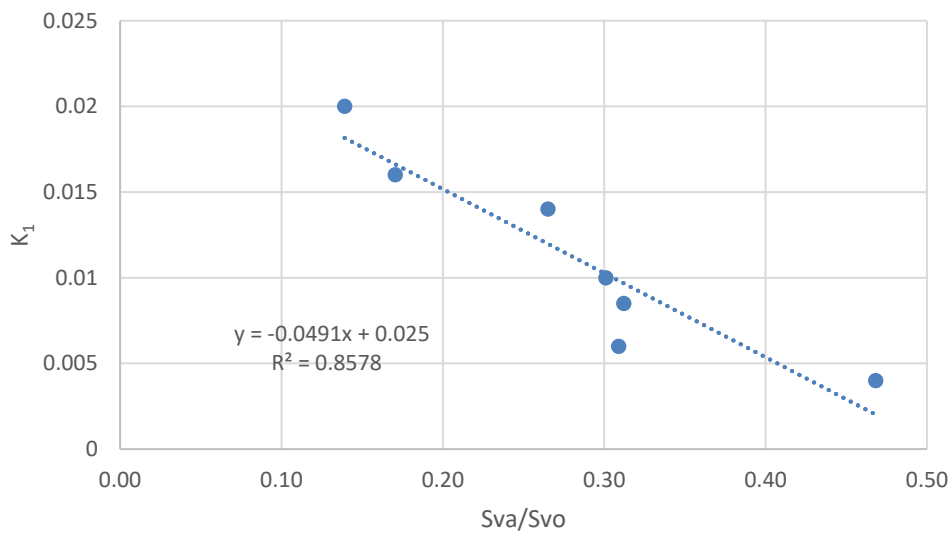


Figura 10: Relación entre K_1 y Sva/Svo

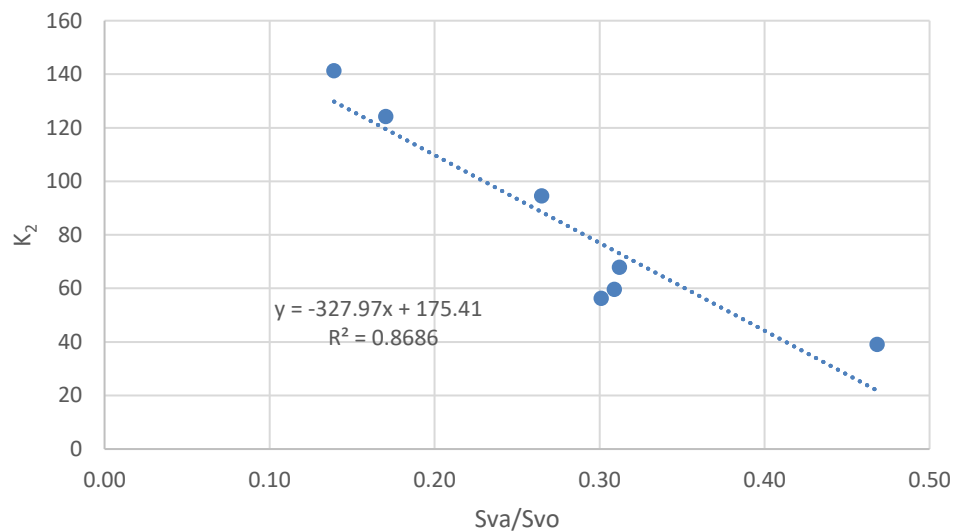


Figura 11: Relación entre K_2 y Sva/Svo

Al obtener la línea de tendencia de las Figuras 10 y 11 se puede estimar el valor de las constantes K_1 y K_2 sin la necesidad de iterar, solo utilizando la información de las pendientes del volcán (Svo) y del valle (Sva).

Esta tendencia está asociada a los lahares del volcán Villarrica, entonces para validar este método se aplicará el mismo análisis a un flujo de lahar ocurrido en el volcán Calbuco en el año 1961.

Validación

El volcán Calbuco está ubicado en la X Región de los Lagos ($41^{\circ}19'58''S$ $72^{\circ}36'40''O$, 2002 msnm), en el límite de las comunas de Puerto Varas y Puerto Montt, entre los lagos Llanquihue y Chapo (Figura 12).

Este estratovolcán andino también forma parte de la ZVS, tiene forma irregular troncocónica y alcanza una altura de 2002 m.s.n.m. Está formado por lavas y piroclastos de composición andesítica (Moreno, 1979) y su registro histórico revela un comportamiento eruptivo violento, con eyección de piroclastos, tanto de caída como de flujos de bloques y cenizas y flujos piroclásticos (Petit-Breuilh, 1999).

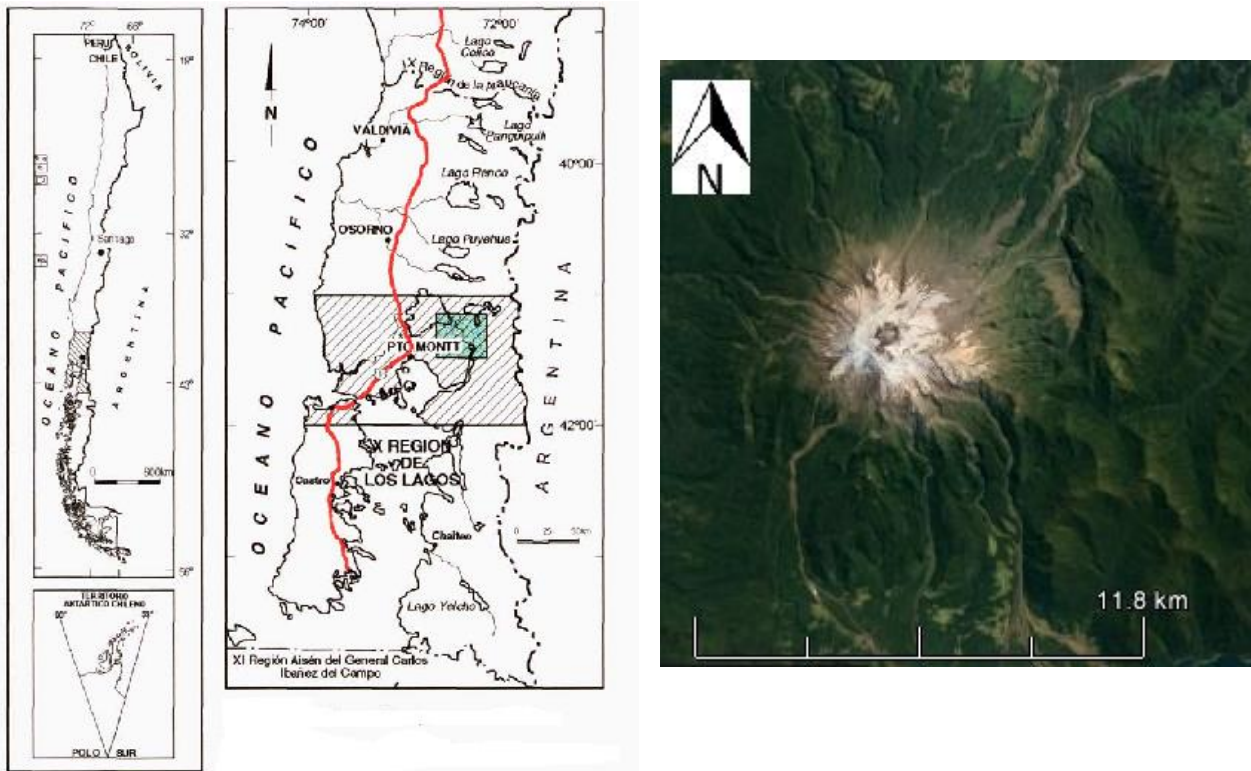


Figura 12: Mapa de ubicación nacional e imagen satelital del volcán Villarrica (extraída de google earth)

El lahar donde se realizará el análisis de validación es el perteneciente al cauce del río Tepú, y la delimitación del área de inundación de éste se aprecia en la Figura 13.

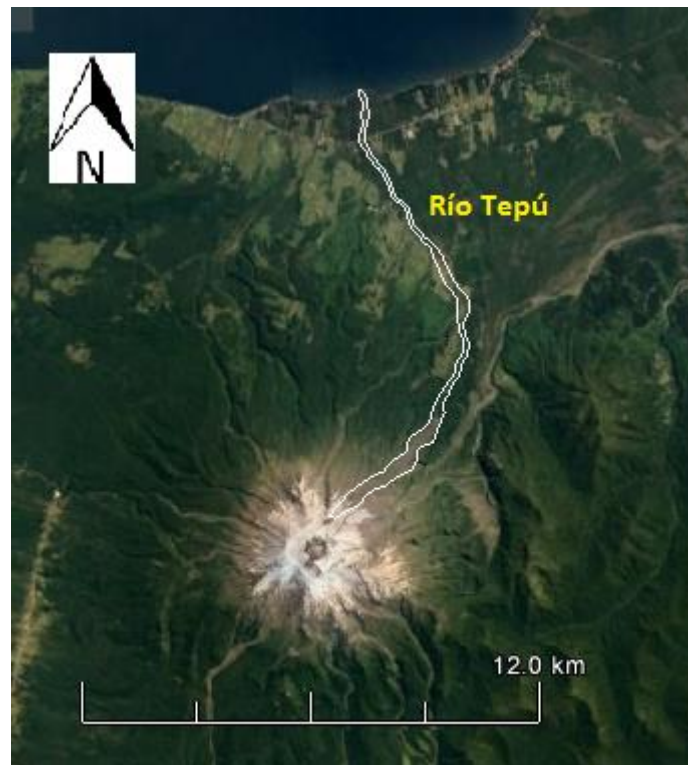


Figura 13: Cauce en estudio río Tepú

El DEM utilizado es de la misma fuente que el del volcán Villarrica el cual posee una resolución de 30m x 30m (Figura 14).

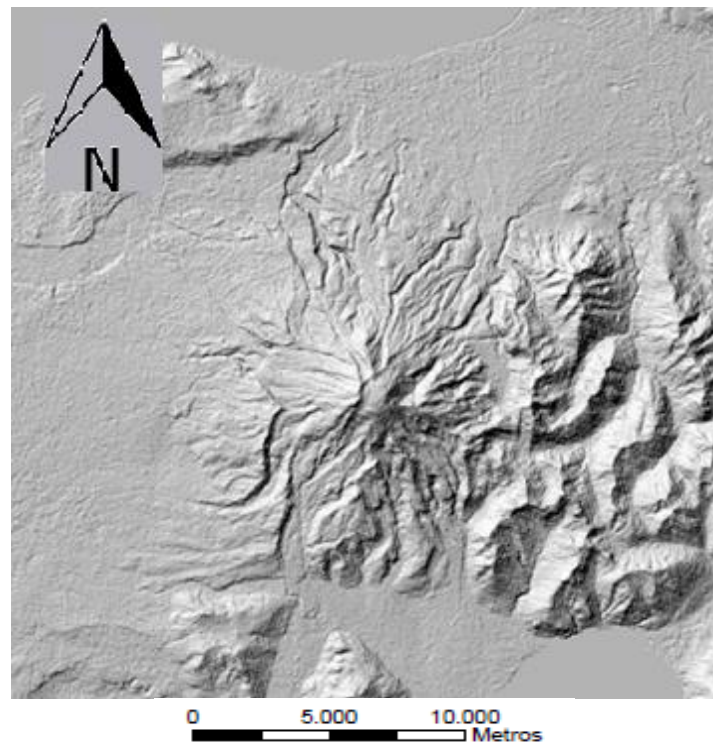


Figura 14: Modelo de elevación digital de resolución 30mx30m de volcán Calbuco

La red de drenaje modelada por LAHARZ se presenta en la Figura 15.

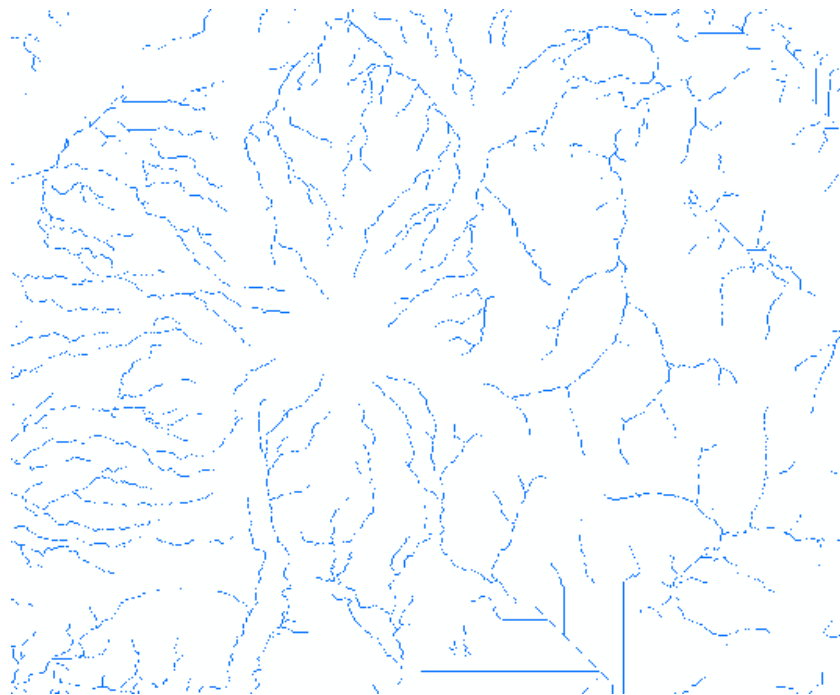


Figura 15: Red de drenaje generada con LAHARZ en el volcán Calbuco

Con fines comparativos la modelación se realizará con los parámetros establecidos por defecto en el software, el volumen del lahar y la fuente de información se indican en la Tabla 4. El punto en el cauce en el cual el flujo laharico dará inicio es la isoterma 0°C en este caso alrededor de los 1500 m.s.n.m.

Tabla 4: Valor del volumen del lahar en el cauce del río Tepú y su respectiva fuente de información

Cauce	Evento	Fuente	Volumen [x10 ⁶ m ³]
Río Tepú	Calbuco 1961	Klohn (1963)	7.2

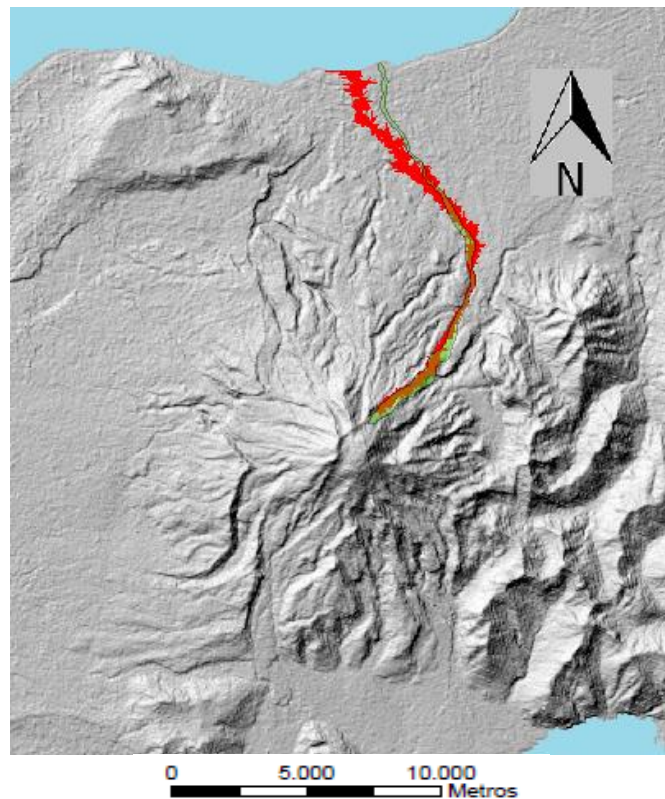


Figura 17: Área documentada del lahar en el cauce del río Tepú proyectada sobre el DEM y en rojo el área de inundación del lahar modelado con las constantes adimensionales K_1 y K_2 que vienen por defecto en LAHARZ

Para la calibración del modelo se obtuvieron los valores de la pendiente del volcán y la pendiente del valle para reemplazarlos en las ecuaciones definidas en las Figuras 10 y 11 (Figura 18)

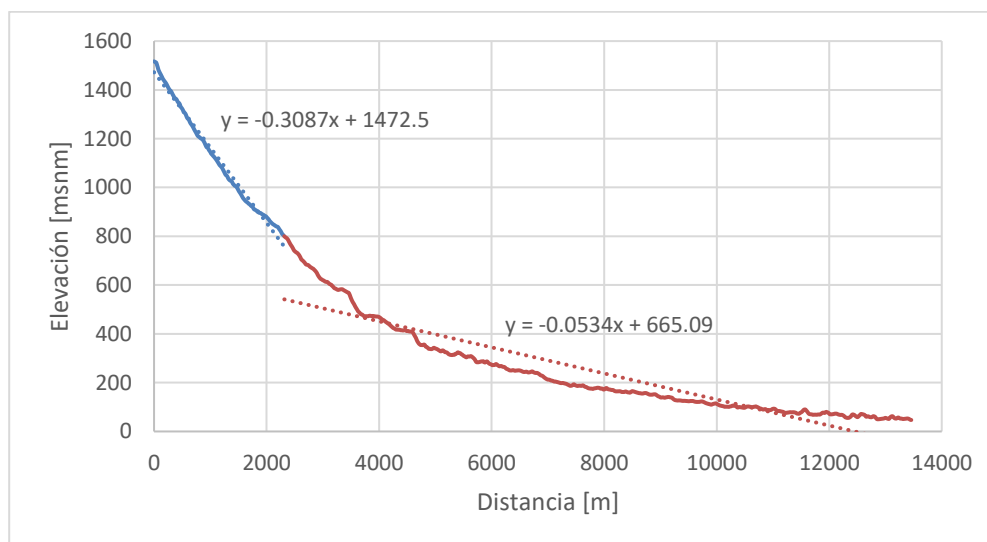


Figura 18: Línea de tendencia de las pendientes del volcán (azul) y del valle (rojo) en el cauce del río Tepú

Para el cauce del río Tepú la pendiente del volcán (S_{vo}) y la pendiente del valle (S_{va}) tienen un valor de 0.3087 y 0.0534 respectivamente, por lo tanto, la variable adimensional S_{va}/S_{vo} tiene un valor de 0.1729.

Reemplazando S_{va}/S_{vo} en las ecuaciones de las líneas de tendencia de la Figura 10 y 11 se obtiene un K_1 y K_2 de 0.0165 y 118.67, respectivamente.

El resultado de la modelación con los parámetros K_1 y K_2 estimados por el método propuesto se indica en la Figura 19.

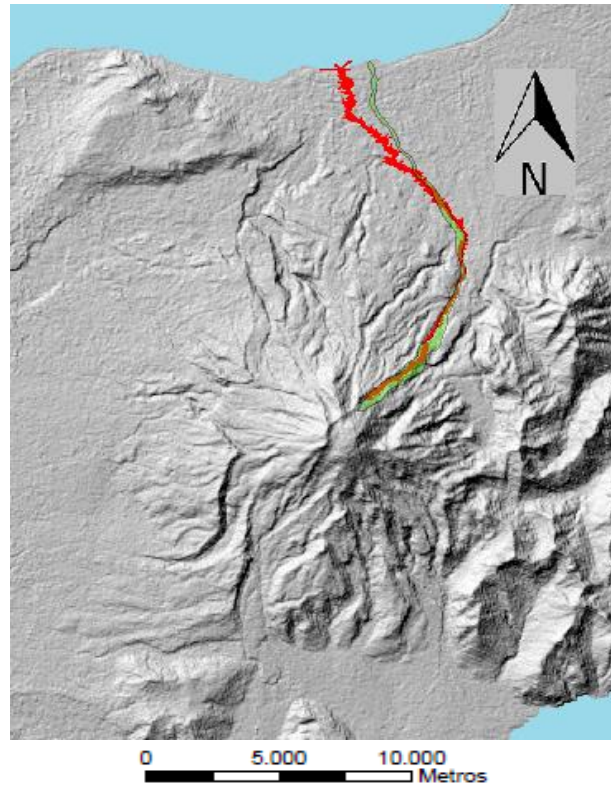


Figura 19: Área documentada del lahar río Tepú proyectada sobre el DEM y en rojo el área de inundación del lahar modelado con las constantes adimensionales K_1 y K_2 modificadas

4. CONCLUSIONES

Se puede apreciar en la Figura 8 que los lahares de los cauces Estero Seco y Río Voipir presentan diferencias en la trayectoria del flujo lahárico y esto se debe a que en esas zonas la red de drenaje no se ajustó correctamente a las reales y puede consignarse como una consecuencia de la resolución del DEM. Una situación similar ocurre con los resultados de los flujos correspondientes a los lahares de los cauces del Río Pedregoso y del Río Turbio dado que se observa que al final de éstos existe una dispersión del volumen. Esto se debe a que en esa zona se encuentra la ciudad de Pucón la que es representada en el DEM por una superficie relativamente plana y LAHARZ no encuentra la contribución de celdas de flujo necesarias para considerar un cauce.

En la Figura 9 se puede observar que el área de inundación de los lahares modelados presenta un mejor ajuste a las áreas de inundación modeladas en la Figura 8. Sin embargo, se observan discrepancias al comienzo de los flujos en el cual el área real es mayor a la modelada y esto se debe a que el método utilizado por LAHARZ para modelar el flujo considera sólo una red de drenaje para portear la totalidad del volumen derretido, y éste cauce corresponde al primero que alcanza el flujo. Por lo tanto, el software pasa por alto las demás redes que también aportan en área de inundación, este error inducido por LAHARZ se podría salvar considerando una mayor resolución del DEM.

La relación de la Figura 10 y 11 se produce ya que si el flujo lahárico en su curso no presenta un cambio de pendiente brusco desde la pendiente del volcán a la pendiente del valle este conserva por más tiempo la energía cinética que posee en la ladera del volcán, por lo cual el área transversal del lahar no presenta aumentos significativos lo que genera también inundaciones menores (i.e. predominio de las fuerzas inerciales), esto se traduce en valores bajos de K_1 y K_2 . En cambio si en la transición existe una mayor pérdida de energía el flujo se desacelera y genera una mayor área inundada en la dirección transversal sugiriendo mayores valores de K_1 y K_2 .

Se puede apreciar en la Figura 19 que el lahar modelado se ajusta de buena manera al lahar real, se observa que la dirección del flujo lahárico difiere un poco del real esta diferencia se debe a que en esa zona la red de drenaje no se ajustó correctamente a las reales una de las causas de esto es la resolución del DEM, esta modelación sugiere que las líneas de tendencia para encontrar los parámetros K_1 y K_2 propuestas en este estudio como método de estimación podrían ser aplicables para otros volcanes, y consecuentemente transferibles.

Lo anterior indica que, a pesar de la simplicidad del modelo, éste constituye una buena herramienta de cálculo para la determinación de áreas inundadas por flujos laháricos, y además que dicha precisión puede aumentarse considerando modelos de elevación digital con mayor resolución en conjunto con el método propuesto para la estimación de los parámetros K_1 y K_2 .

5. REFERENCIAS

- Clavero, J., & Moreno, H.** (2004). Evolution of Villarrica volcano. In Villarrica volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 61, Chile.*, pp. 17-27.
- González, O.**, (1995). Volcanes de Chile. Instituto Geográfico militar. 640 p.
- Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J.** (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *GSA Bulletin; v110*, pp. 972-984.
- Moreno, H.** (2000). Mapa de Peligro del Volcán Villarrica, Regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería. Documentos de Trabajo, No. 17,1 mapa escala 1:75.000. Santiago.
- Petit-Breuilh, M., & Lobato, J.** (1994). Análisis comparativo de la cronología eruptiva histórica de los volcanes Llaima y Villarrica (38°-39° L.S.). In *Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas, Vol. 1, Concepción.*, pp. 366-370.
- Petit-Breuilh, M.**, (1999)., Cronología Eruptiva Histórica de los volcanes Osorno y Calbuco, Andes del Sur (41°-41°30S). *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 53*, 46 p.
- Smith, G. A., & Fritz, W. J.** (1989). Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology 17*, pp. 375-376.
- Stern, C.** (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile, Vol. 31, No. 2*, pp. 161-206.