



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Análisis de la estratigrafía de lahares en el sector Mulaló (volcán Cotopaxi) mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental

Autor:

Gaibor Marcillo Esteban Alejandro

Tutor:

Benito Guillermo Mendoza Trujillo, PhD.

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Esteban Alejandro Gaibor Marcillo, con cédula de ciudadanía 0604251678, autor del trabajo de investigación titulado: Análisis de la estratigrafía de lahares en el sector Mulaló (volcán Cotopaxi) mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 23 de abril de 2024.

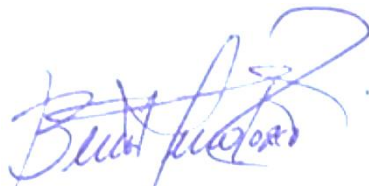


Esteban Alejandro Gaibor Marcillo

C.I: 0604251678

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Mendoza Trujillo Benito Guillermo catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **Análisis de la estratigrafía de lahares en el sector Mulaló (volcán Cotopaxi) mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad**, bajo la autoría de Esteban Alejandro Gaibor Marcillo; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación. Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los días 23 del mes de abril de 2024.



Benito Guillermo Mendoza Trujillo, PhD.
C.I: 0603013863

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Análisis de la estratigrafía de lahares en el sector Mulaló (volcán Cotopaxi) mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad** por Gaibor Marcillo Esteban Alejandro, con cédula de identidad número 0604251678, bajo la tutoría de Ph.D. Mendoza Trujillo Benito Guillermo; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 2 de mayo de 2024

Patricio Santillán Lima, Mgs.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

Iván Ríos García, PhD.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

María Fernanda Rivera, Mgs.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



CERTIFICACIÓN

Que, **Gaibor Marcillo Esteban Alejandro** con CC: **0604251678**, estudiante de la Carrera **Ingeniería Ambiental**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado ” **Análisis de la estratigrafía de lahares en el sector Mulaló (volcán Cotopaxi) mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad**”, cumple con el 8 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 24 de abril de 2024

Benito Mendoza T., PhD.
TUTOR

DEDICATORIA

A mi querida abuelita Mercedes Coello y querida mamá Mónica Marcillo,

Este logro que ahora celebro no es solo mío, lleva impreso el amor, el apoyo incondicional y la inspiración que ustedes, mis pilares más sólidos, me han brindado a lo largo de este camino. Abuelita, sus sabias palabras y su eterno aliento han sido mi guía en los momentos más difíciles, recordándome siempre que el esfuerzo y la perseverancia son las llaves del éxito. Mamá, tu inquebrantable fe en mí y tu sacrificio han sido el motor que me impulsó a superar cualquier obstáculo, demostrándome que el amor maternal es un poder infinito capaz de hacer posible lo imposible.

A través de esta tesis, deseo honrar su legado y agradecerles por todo lo que han hecho por mí. Cada página escrita lleva su huella, su amor y su inquebrantable apoyo. Son el faro que ilumina mi camino, la razón por la cual cada logro alcanzado se convierte en un tributo a su amor y dedicación.

Esteban Alejandro Gaibor Marcillo

AGRADECIMIENTO

A mi abuelita Mercedes Coello y a mi mamá Mónica Marcillo, mi gratitud hacia ustedes no tiene límites. Su amor, apoyo y sacrificio han sido el pilar fundamental en este viaje académico. Gracias por ser mi inspiración y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este logro es tanto suyo como mío.

A mi querida prima Criss, quiero expresar mi más profundo agradecimiento, sin tu ayuda y tu impulso inicial, este logro no habría sido posible. Tu apoyo y tu ánimo fueron el punto de partida que necesitaba. Gracias por ser parte fundamental de este logro.

A toda mi querida familia, en especial a mis hermanos, mis primos Fernanda, Benito y Alex y mis estimados tíos Juan Carlos, Alexita, Delita y Carlitos, quiero expresar mi profundo agradecimiento por su constante apoyo y aliento. Sus palabras de aliento y su amor incondicional han sido una fuente de inspiración a lo largo de este camino. Gracias por ser mi red de apoyo y por celebrar este logro conmigo.

A mi tutor Benito Mendoza, quiero expresar mi más sincero agradecimiento por su inquebrantable apoyo a lo largo de este proceso. Gracias por no dejarme solo, por brindarme su guía constante y por permitirme aprender a través de mis propios errores. Su paciencia, sabiduría y confianza en mí han sido fundamentales para alcanzar este logro. Gracias por darme la libertad para equivocarme, repetir las cosas y hacerlas bien.

A Carlos Maldonado, que sufriste conmigo las salidas, eres fundamental en la construcción de esta tesis, quiero agradecerte sinceramente por tu increíble apoyo, por brindarme tu amistad y tus valiosos consejos. Tu presencia ha sido invaluable en este viaje.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Semillero de Recursos Hídricos por su invaluable contribución a mi formación académica y profesional. Su compromiso con la investigación y el estudio de los recursos hídricos ha sido una fuente constante de inspiración y aprendizaje para mí.

A mis profesores María Fernanda, Carlita, Patricio, Julia, Marcel, les agradezco infinitamente por su invaluable apoyo, conocimientos, experiencia y amistad durante este camino académico. También quiero expresar mi gratitud a mis amigos de la universidad por acompañarme en esta travesía compartiendo aulas y momentos inolvidables.

Esteban Alejandro Gaibor Marcillo

SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

VEI	Índice de Explosividad Volcánica
RA	Resistividad Aparente
ohm.m	Ohmios multiplicado por metros

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCION.....	15
1.1. Planteamiento del problema.....	15
1.2. Justificación	16
2. CAPITULO II. OBJETIVOS	17
2.1. General.....	17
2.2. Específicos.....	17
3. CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	18
3.1. Lahares	18
3.1.1. Lahares primarios.....	19
3.1.2. Lahares secundarios	20
3.1.3. Caracterización reológica de lahares.....	21
3.1.4. Clasificación de los flujos.....	22
3.1.5. Modelo conceptual de las mezclas de agua y escombros planteado por Coussot 1997.....	25
3.2. Volcán Cotopaxi	26
3.2.1. Valoración del área del glaciar	27
3.2.2. Red de drenaje Sur del volcán Cotopaxi	28
3.2.3. Definición de los escenarios eruptivos y valoración de la probabilidad de ocurrencia relacionada con cada escenario eruptivo.....	30
3.2.4. Descripción breve de la última erupción del volcán Cotopaxi ocurrida el 26 de junio de 1877	34
3.3. Estratigrafía.....	35
3.4. Tomografía eléctrica.....	37
4. CAPÍTULO IV. METODOLOGIA.....	38

4.1.	Área de estudio.....	38
4.2.	Líneas de lectura.....	39
4.3.	Diseño experimental.....	39
4.4.	Funcionamiento de Tomografía eléctrica.....	39
4.5.	Técnica de campo para efectuar una tomografía eléctrica.....	41
4.6.	Interpretación de la inversión de la resistividad eléctrica aparente.....	42
4.7.	Interpretación de volúmenes de los depósitos laháricos.....	43
5.	CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
5.1.1.	Reconstrucción estratigráfica en 2D y 3D de lahares.....	44
5.1.2.	Interpretaciones 2D.....	44
	Primera línea.....	44
	Segunda línea.....	45
	Tercera línea.....	46
	Cuarta línea.....	47
5.1.3.	Reconstrucción y análisis del modelo estratigráfico en 3D.....	49
5.2.	Evaluación de riesgo por lahares mediante interpretación de volúmenes de masa.....	51
	Primera Línea.....	51
	Segunda Línea.....	52
	Tercera Línea.....	52
	Cuarta Línea.....	53
6.	CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
6.1.	Conclusiones.....	54
6.2.	Recomendaciones.....	54
7.	REFERENCIAS.....	54
8.	ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Esquema de clasificación de la mezcla de la fase líquida y sólida.....	24
Tabla 2. Área total del casquete glaciar del Cotopaxi	28
Tabla 3. Áreas de drenaje para los glaciares 10-19	28
Tabla 4. Escenarios eruptivos	30
Tabla 5. Episodios eruptivos del volcán Cotopaxi	33
Tabla 6. Unidades de lahares	36
Tabla 7. Valores de las resistividades en diferentes materiales	43
Tabla 8. Dimensiones de la Primera Línea	51
Tabla 9. Dimensiones de la Segunda Línea.....	52
Tabla 10. Dimensiones de la Tercera Línea	52
Tabla 11. Dimensiones de la Cuarta Línea	53
Tabla 12. Coordenadas Primera Línea.....	58
Tabla 13. Coordenadas Segunda Línea	59
Tabla 14. Coordenadas Tercera Línea	60
Tabla 15. Coordenadas Cuarta Línea.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tránsito de lahar en el sector “El Salado” río Vascún.....	19
Figura 2. Formación de lahar primario.....	19
Figura 3. Formación de lahares secundarios	20
Figura 4. Esquema de la evolución inicial de formación de lahares	21
Figura 5. Esquema de un lahar sometido a dilución aguas abajo.....	22
Figura 6. Esquema de la clasificación de las mezclas de agua y sólidos en función de la fracción de sólidos y el tipo de material	23
Figura 7. Clasificación reológica de los fluidos	25
Figura 8. Modelo conceptual de mezclas de agua y escombros.....	26
Figura 9. Casquetes del drenaje Sur del volcán Cotopaxi	27
Figura 10. Drenaje sur del volcán Cotopaxi.....	29
Figura 11. Perfil longitudinal del tramo Aláquez.....	29
Figura 12. Esquema del Escenario 1	31
Figura 13. Esquema del Escenario 2	31
Figura 14. Esquema del Escenario 3	32
Figura 15. Esquema del Escenario 4	32
Figura 16. Hidrogramas de cada uno de los Escenarios.....	33
Figura 17. Esquema del flujo de lahares después de la erupción de 1877	34
Figura 18. Tabla estratigráfica reconstruida de unidades de lahares y sus tipos.....	36
Figura 19. Esquema de la inversión de las resistividades en 2D.....	38
Figura 20. Área de estudio.....	38
Figura 21. Funcionamiento de la Tomografía eléctrica.....	40
Figura 22. Configuración Dipolo-Dipolo	40
Figura 23. Secuencia de medidas para tomografía eléctrica 2D	41
Figura 24. Estratigrafía 2D Primera Línea	45

Figura 25. Estratigrafía 2D Segunda Línea	46
Figura 26. Estratigrafía 2D Tercera Línea.....	47
Figura 27. Estratigrafía 2D Cuarta Línea	48
Figura 28. Reconstrucción del modelo estratigráfico del lahar en 3D	49
Figura 29. Mapa de riesgo por flujo de lahar	51
Figura 30. Esquema del volumen lahórico de la Primera Línea.....	51
Figura 31. Esquema del volumen lahórico de la Segunda Línea.....	52
Figura 32. Esquema de volumen lahórico de la Tercera Línea	53
Figura 33. Esquema del volumen lahórico de la Cuarta Línea.....	53

RESUMEN

Ecuador es un país que tiene una elevada probabilidad de ser afectado por erupciones volcánica y los efectos asociados como la caída de material piroclástico, ceniza e incluso el flujo de lahares primarios y secundarios. Entre los volcanes que posee nuestro país se encuentra el Cotopaxi con una elevación de 5897 m.s.n.m, tiene un período de recurrencia relativamente amplio, la última erupción registrada donde se generaron flujos laháricos fue en junio de 1877, es decir que han transcurrido 140 años hasta el actual período de reactivación. A lo largo de estos años se han desarrollado asentamientos humanos en los drenajes por donde atraviesan los flujos laháricos desde el volcán como en el trayecto del río Aláquez.

El objetivo de este trabajo fue analizar la estratigrafía de lahares, donde a través de tomografías eléctricas se logró localizar un depósito lahárico en un tramo del río Aláquez, mediante la interpretación de resistividades se determinaron rangos que van desde 400 hasta valores superiores a los 1500 ohm.m y con la reconstrucción 3D utilizando un DEM del área de estudio se determinó un promedio de 343576 m³ del depósito lahárico.

Palabras claves: Estratigrafía, tomografía eléctrica, lahar, río Aláquez, estratovolcán.

ABSTRACT

Ecuador is highly likely affected by volcanic eruptions and associated effects such as the deposition of pyroclastic material, ashfall, and even primary and secondary lahars. Among the volcanoes in our country is Cotopaxi, with an elevation of 5897 meters above sea level (m.a.s.l.), which has a relatively broad recurrence interval. The last recorded eruption generating lahars occurred in June 1877, indicating a lapse of 140 years until the current reactivation period. Over the years, human settlements have developed in the drainage pathways of lahars originating from the volcano, such as along the course of the Aláquez River.

The objective of this study was to analyze the stratigraphy of lahars. Through electrical tomography, a lahar deposit was successfully located in a section of the Aláquez River. Interpretation of resistivity data revealed ranges from 400 to values exceeding 1500 ohm.m. A 3D reconstruction with a Digital Elevation Model (DEM) of the study area determined an average volume of 343,576 cubic meters of the lahar deposit.

Keywords: Stratigraphy, electrical tomography, lahar, Aláquez River, stratovolcano



electronicjournals.com
MARIA FERNANDA
PONCE MARCILLO

Reviewed by:
Mgs. Maria Fernanda Ponce
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603818188

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCION

En el mundo los volcanes han sido sujetos de estudio como el Popocatépetl en México y el Villarrica en Chile, siendo los más peligrosos en esos países debido a sus potentes períodos eruptivos y sus productos entre esos los frecuentes flujos laháricos, como lo indican los registros de (Masabanda et al., 2017). Se han creado diversos modelos y análisis ante el peligro de lahares que han sido puesto a prueba en distintos escenarios como el lahar del 2005 en el valle de Vazcún, los lahares de Villa La Angostura en Argentina y el volcán Cotopaxi en Ecuador (Rodríguez et al., 2017).

En este contexto, el volcán Cotopaxi, un estratovolcán ubicado en el centro de Ecuador, tiene una forma cónica y está coronado por un manto de nieve perpetua alrededor del cráter (Lupiano et al., 2018). Además, su superficie agrietada por quebradas profundas, constituyen el nacimiento de ríos que fluyen hacia el Valle de Latacunga (Machado et al., 2015).

Por otra parte, a lo largo de la historia eruptiva del volcán Cotopaxi, se evidencia la formación de lahares, debido a que no es fácil prever su magnitud y ocurrencia, se consideran altamente destructivos (Horan & Meinhold, 2022).

El desarrollo científico y tecnológico para comprender mejor estos flujos complejos es crucial para reducir la amenaza sobre la población. Por tal razón, esta investigación tiene como objetivo analizar la estratigrafía de lahares depositados en el sector Mulaló del volcán Cotopaxi, mediante el uso de tomografías eléctricas.

Este trabajo está enmarcado en el proyecto de Investigación: “DISCURRI-12: Design and Improvement of Simulations By Cellular Automata Units for Rheological Risks Investigation”, que se realiza entre la Università della Calabria en Italia y la Universidad Nacional de Chimborazo en Ecuador.

1.1. Planteamiento del problema

La densa concentración de volcanes activos en América Latina y el Caribe es evidente, representando un riesgo significativo para las poblaciones asentadas en sus cercanías, millones de personas habitan en comunidades próximas a estas estructuras geológicas, lo que plantea un desafío crucial en términos de gestión del riesgo volcánico. (Navarro et al., 2017).

En el caso específico de Ecuador, siendo un país con una superficie relativamente pequeña la presencia de numerosos volcanes activos es notable debido a la Cordillera de los Andes que atraviesa el país. En este sentido, el volcán Cotopaxi es un estratovolcán con ciclos periódicos de reactivación resultado en la formación de extensas y fértiles regiones. Estas áreas son aprovechadas en las últimas décadas para el desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas y la próspera industria florícola de exportación. Además, se evidencia la formación de cuencas hidrográficas con ríos que abastecen de agua las faldas del volcán. Pero, es importante mencionar que estas zonas son los drenajes por donde podrían fluir los lahares en caso de una erupción volcánica (Instituto Geofísico, 2015).

Para conocer un poco más sobre el proceso eruptivo del volcán Cotopaxi, A lo largo de la historia existen cinco períodos eruptivos significativos documentados, en los años 1532-1543, 1742, 1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880, estas erupciones se caracterizaron por patrones similares de actividad volcánica, tales como la generación de columnas eruptivas, flujos de lava, caída de cenizas y lahares masivos que han seguido las tres principales redes de drenaje del volcán: Norte, Sur y Oriente (Ordóñez et al., 2011).

Por estas razones, el volcán Cotopaxi es objeto de extensos estudios y vigilancia a nivel mundial, dada la posibilidad de una repetición de eventos catastróficos como el lahar ocurrido en 1877. En este sentido, dado el grado de periodicidad en la reactivación del volcán, no se puede descartar la posibilidad de futuras erupciones que puedan causar graves daños, ya que, el material piroclástico liberado podría extenderse sobre vastas áreas a nivel nacional, mientras que los lahares podrían obstruir los cauces de los ríos, provocando contaminación hídrica y alterando las características químicas y biológicas de los cuerpos de agua (Bablon et al., 2018).

En cuanto a las afectaciones al suelo, el movimiento de los lahares conllevaría a la pérdida significativa de la cobertura vegetal, acelerando los procesos erosivos y modificando la topografía del terreno, creando pendientes pronunciadas, terrazas laterales y arrastrando materiales de los lechos fluviales (Muñoz Murcillo et al., 2020). La intensidad de la erosión se incrementaría notablemente en tramos con pendientes pronunciadas, áreas donde se encuentran sedimentos clásticos no consolidados y regiones con depósitos saturados, lo que resulta en un aumento significativo en el volumen de sedimentos transportados (Vallance & Iverson, 2015).

En este sentido, la vulnerabilidad de la población y su crecimiento demográfico están directamente relacionados con este fenómeno volcánico y los movimientos laháricos en la zona de estudio, ya que, el desconocimiento de las posibles afectaciones y su área de influencia sumado a la falta de preparación para una evacuación temprana podría generar retrasos significativos, poniendo en riesgo la vida de los habitantes.

Dado que los lahares tienen la capacidad de desplazar considerables cantidades de sedimentos que luego se depositan en los sistemas de drenaje del volcán, resulta crucial comprender la estratigrafía de estos eventos, ya que esta nos proporciona información sobre la composición litológica, el volumen y la profundidad de los depósitos laháricos (Hernández, 2017).

1.2. Justificación

El volcán Cotopaxi es un destacado objeto de investigación tanto en Ecuador como en la región, numerosos estudios han abordado como tema de investigación los depósitos laháricos presentes en su flanco sureste. Por ejemplo, Vera et al. (2019) llevaron a cabo un exhaustivo trabajo que incluyó modelación matemática basada en una variedad de datos geológicos, vulcanológicos, glaciológicos y cartográficos actualizados. Estos datos permitieron establecer parámetros iniciales, como volúmenes e hidrogramas, que a su vez posibilitaron la generación de mapas de afectación de referencia. Estos mapas son esenciales para la toma de decisiones relacionadas con la definición de áreas de impacto, particularmente en el valle de Latacunga.

Dada la importancia de esta información, se requiere complementar la cartografía ambiental e hidrogeológica de los depósitos laháricos con técnicas adicionales, como la fotointerpretación y estudios estratigráficos mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad. Esto permitirá obtener una comprensión más completa de las características de los depósitos laháricos y como estos se disponen en las quebradas. A la vez permitirá comparar con modelos matemáticos que han simulado las erupciones anteriores y con estos resultados se podría mejorar las predicciones de los lahares que se producirían por efecto de nuevas erupciones

En este sentido, la tomografía eléctrica de resistividad es una técnica que analiza las propiedades de los materiales subterráneos mediante su comportamiento eléctrico, lo que permite distinguir entre diferentes tipos de materiales según su resistividad. Esta técnica revela la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica, proporcionando información detallada sobre su resistencia eléctrica (Porres, 2010). Al ser no invasiva, la tomografía eléctrica de resistividad permite caracterizar la litología del suelo mediante la cartografía de la estructura de los horizontes sin causar daños al área de estudio.

La obtención de resultados precisos sobre la litología del subsuelo requiere el uso de equipos actualizados y la aplicación de sofisticados algoritmos de inversión e interpretación matemática (Weinzettel, 2009). Para garantizar la fiabilidad de los resultados, es crucial seleccionar una combinación adecuada de arreglo y espaciamiento de electrodos que permita una clara identificación de la estructura de la zona de estudio, proporcionando una representación detallada de la litología del subsuelo. Es importante tener en cuenta que la relevancia de los datos obtenidos puede variar según el objetivo específico del estudio (Dietrich, 2010).

Esta investigación busca comprender como se disponen los lahares principalmente en los valles cercanos al volcán lo que a su vez permitirá comparar con modelos matemáticos el movimiento de los flujos laháricos a través de las quebradas, que han simulado las erupciones anteriores y con estos resultados se podría mejorar las predicciones de los lahares que se podrían producir por efecto de nuevas erupciones.

2. CAPITULO II. OBJETIVOS

2.1. General

Analizar la estratigrafía de lahares en el sector Mulaló del volcán Cotopaxi, mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad.

2.2. Específicos

- Reconstruir la estratigrafía de lahares mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad en 3 dimensiones (3D) en la microcuenca del río Aláquez en el sector Mulaló (volcán Cotopaxi).

- Realizar una evaluación de los riesgos por lahares producto de eventuales erupciones del volcán, mediante interpretación de volumen de masa en un tramo de la microcuenca del río Aláquez en el sector Mulaló.

3. CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. Lahares

Un lahar es un flujo volcánico compuesto por una fase líquida, derivada de la fusión de material piroclástico con el glaciario del volcán, y una fase sólida, constituida por rocas, escombros, sedimentos, e inclusive troncos y estructuras humanas. Este flujo se desplaza rápidamente debido a la fuerza gravitatoria.

Sus características pueden variar conforme pasa el tiempo y la distancia que recorre hacia aguas abajo desde el volcán (Vera et al., 2019).

Entre los factores que caracterizan un flujo lahárico están (Almeida et al., 2017):

- La ocurrencia súbita está asociada al tipo de erupción volcánica.
- La rápida progresión está condicionada por pendientes pronunciadas y la topografía local.
- Posee una gran capacidad de transporte, acumulando volúmenes de material a lo largo de su trayecto.
- Se desarrolla a largas distancias a lo largo de los cauces naturales y áreas inundables, las cuales suelen albergar poblaciones e infraestructuras.
- Una fuente de agua adecuada que puede provenir del almacenamiento en el subsuelo, del hielo o nieve derretidos rápidamente por la fusión glacial, del agua subglacial, de lagos de cráteres o lagos adyacentes, de agua de lluvia e incluso del sistema hidrotermal o freático del volcán.
- Abundancia de material no consolidado, como fragmentos de rocas volcánicas, típicamente generados por erupciones explosivas. Los flujos o caídas piroclásticas depositan gran cantidad de escombros que pueden ser fácilmente desplazados.
- Un mecanismo desencadenante puede ser la ocurrencia de erupciones volcánicas, sismos, inestabilidad de los edificios volcánicos y precipitaciones intensas. Los colapsos sectoriales de estos edificios pueden evolucionar y dar lugar a la formación de lahares.

Los lahares pueden ser primarios o secundarios, de acuerdo con su origen si está relacionado directa o indirectamente a las erupciones volcánicas.

En la Figura 1 se muestra imágenes de la zona del balneario “El Salado” que se ubica al margen del río Vazcún. El 12 de febrero de 2005 se generó un pequeño lahar generado en las laderas del volcán Tungurahua, a) minutos antes de la llegada del lahar al sitio (13h30), b) tránsito del lahar minutos después de la alerta y una rápida evacuación (13h42).

Figura 1. Tránsito de lahar en el sector “El Salado” río Vazcún



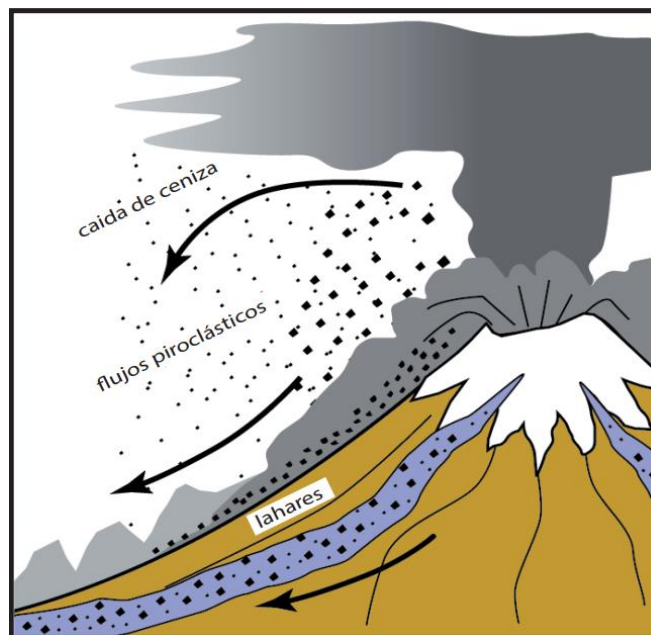
Fuente: (OVT/IG, 2017)

3.1.1. Lahares primarios

Estos flujos de lahares se generan directamente como resultado de una erupción volcánica, especialmente durante el evento eruptivo cuando el material incandescente provoca la fusión de extensos volúmenes de hielo y nieve de los glaciares que cubren los cauces y drenajes de los edificios volcánicos. También pueden originarse debido a la ruptura o expulsión de agua de lagos en cráteres durante las erupciones (Vallance & Iverson, 2015). Los lahares primarios tienden a ser muy voluminosos (10^7 - 10^9 m³) y registran altas velocidades (> 20 m/s) y descargas. Comúnmente sus caudales máximos están entre 10^3 - 10^5 m³/s (Mothes & Vallance, 2015).

En la Figura 2 se muestra un esquema del modelo esquemático de la ocurrencia de lahares primarios durante la erupción explosiva de un volcán produciendo fusión del glaciar.

Figura 2. Formación de lahar primario



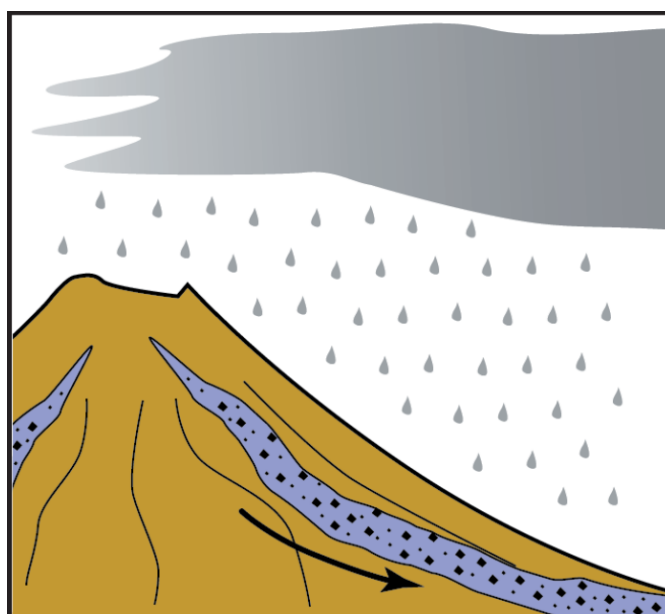
Fuente: (Almeida et al., 2017)

3.1.2. Lahares secundarios

Principalmente, estos lahares se originan debido a las lluvias. El material piroclástico no consolidado, depositado por erupciones anteriores, puede ser fácilmente desplazado por la acción de las precipitaciones. Por lo general, son de menor magnitud en comparación con los lahares primarios; sin embargo, son más frecuentes durante períodos de lluvias. Pueden incrementar en tamaño y frecuencia incluso semanas o meses después de la erupción inicial, lo que dificulta anticipar su nivel de amenaza (Vallance & Iverson, 2015).

En la Figura 3 se muestra un esquema del modelo de ocurrencia de lahares secundarios por intensas lluvias que transportan material piroclástico depositado previamente.

Figura 3. Formación de lahares secundarios



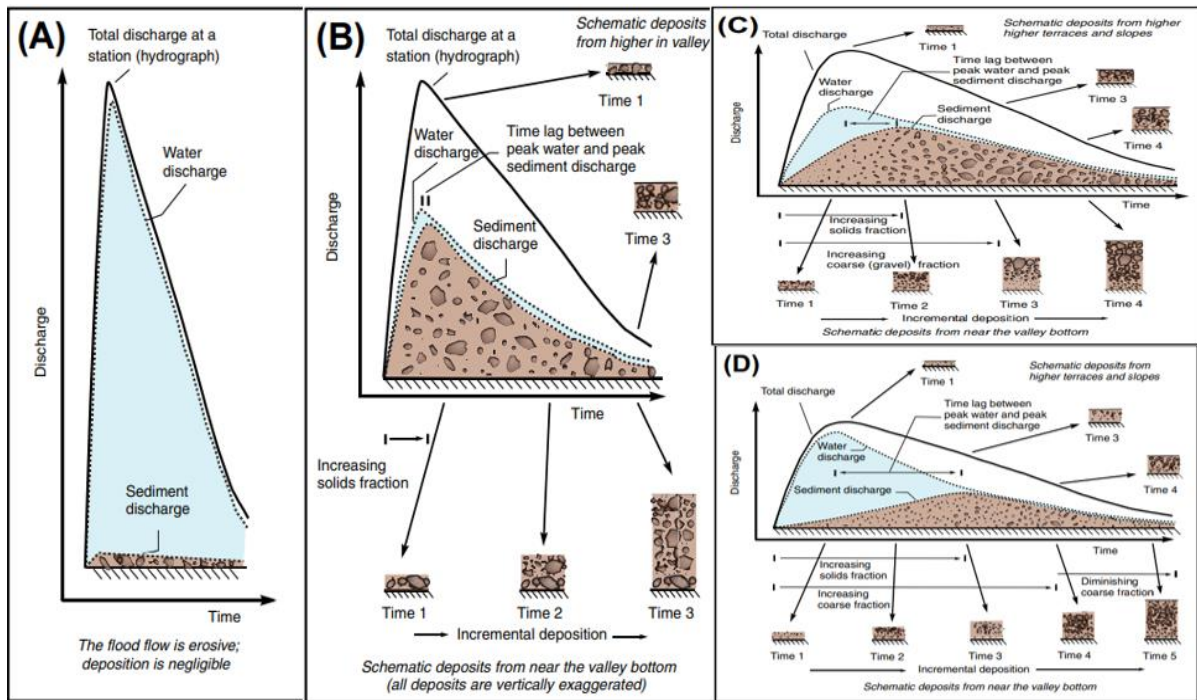
Fuente: (Almeida et al., 2017)

Los flujos generados por lluvia son relativamente reducidos. Su caudal y volumen están restringidos por la intensidad, duración y acumulación de la precipitación, así como por la disponibilidad de material para ser transportado. Su volumen se encuentra (10^4 - 10^6 m³) y sus recorridos son menores a 10 km (Mothes & Vallance, 2015).

Este tipo de lahares pueden tener una frecuencia menor, ya que su ocurrencia está relacionada con la ruptura de lagos o represas, lo que provoca el desplazamiento de material volcánico-clástico que se encuentra acumulado en las laderas de los edificios volcánicos y sus drenajes. No obstante, estos lahares tienden a tener volúmenes significativamente mayores en comparación con los inducidos por lluvias.

Los esquemas presentados en la Figura 4 permiten visualizar la evolución inicial de formación de lahares debido a flujos de agua, así como su comportamiento a medida que avanza a lo largo de los drenajes del volcán bajo la influencia de la gravedad. En la imagen A) se representa el flujo por inundación, en B) se muestra el flujo de escombros, el recuadro C) ilustra el flujo en transición, mientras que en D) se observa el flujo hiperconcentrado característico de un lahar. (Vallance & Iverson, 2015).

Figura 4. Esquema de la evolución inicial de formación de lahares



Relative topographic positions of A, B, C, and D.

Fuente: (Vallance & Iverson, 2015)

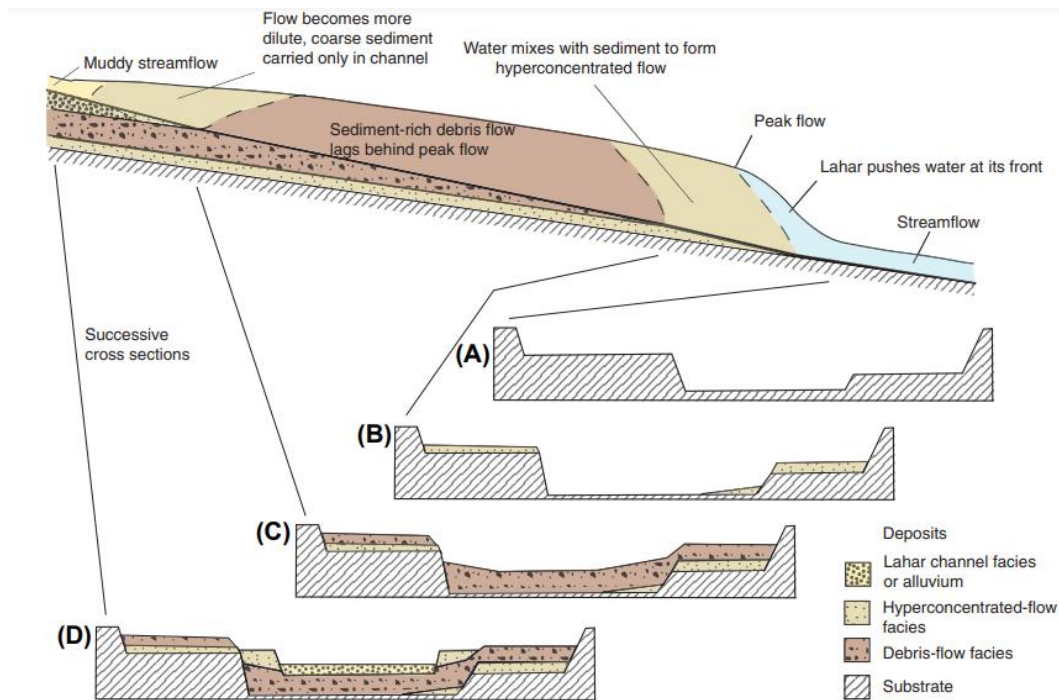
3.1.3. Caracterización reológica de lahares

Los flujos laháricos suelen estar compuestos por menos del 5% de arcilla en relación con el peso seco total de arena+lamo+arcilla (Vallance & Iverson, 2015).

La erosión local es un fenómeno que se manifiesta independientemente del tipo de flujo lahárico, aunque es probable que la fase de erosión coincida con un mayor volumen de sedimento. Sin embargo, incluso en etapas finales, existe la posibilidad de que continúe la erosión en los cauces (Vera et al., 2019).

La Figura 5 ilustra las etapas de un lahar, desde el flujo inicial de escombros hasta la fase de flujo hiperconcentrado, mostrando la dilución del flujo debido a la acción de la gravedad en secciones transversales que representan la formación de los depósitos laháricos.

Figura 5. Esquema de un lahar sometido a dilución aguas abajo



Fuente: (Vallance & Iverson, 2015)

Las características del flujo, como su concentración, volumen, tamaño de partículas, distribución granulométrica del cauce, incluyendo su forma, pendiente y ancho, son factores que influirán en la velocidad de avance del lahar. Aún no se ha determinado con certeza el mecanismo por el cual el flujo lahárico se detiene. El cese de flujo de un lahar se produce con el incremento de la fricción interna, ocasionado por la salida del flujo a través de los poros de la mezcla, cuya velocidad de salida está determinada por la granulometría (Vera et al., 2019).

3.1.4. Clasificación de los flujos

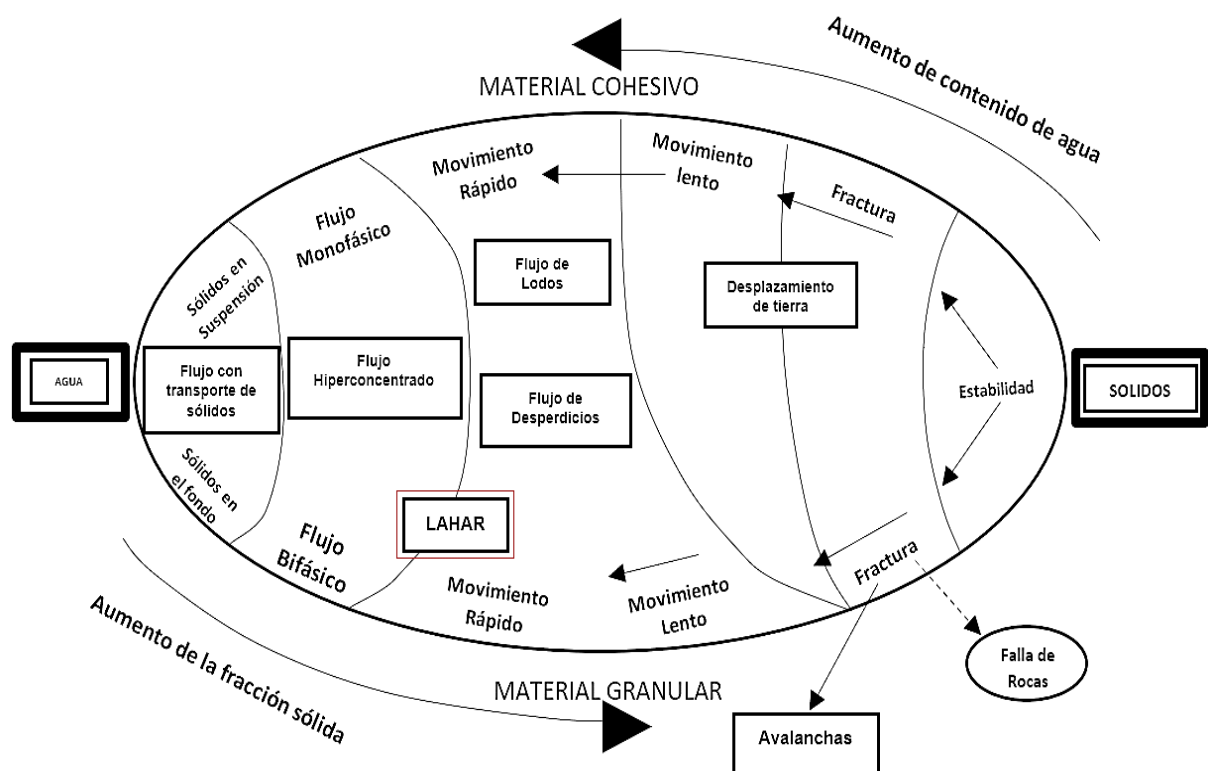
Para clasificar una mezcla compuesta por una fricción líquida y otra sólida, se suele dividir en dos grupos. El primero comprende material fino compuesto principalmente de arcillas, limos y arena fina, donde predominan las interacciones coloidales. El segundo grupo está formado por material granular con diámetros más grandes, en el que las interacciones no coloidales son sustituidas por procesos de fricción y colisión (Vera et al., 2019).

“Debris Flow” o su traducción al español flujo deslizante de conglomerados de materiales compuestos por lodo, fragmentos rocosos y agua, que exhiben propiedades de flujo similares a las del hormigón en movimiento (Solarte & Vallejo, 2022). El agua actúa como el agente desencadenante, ya que provoca una disminución de la resistencia en los materiales cohesivos (Franco & Silva, 2017). Por lo general, se localizan en las laderas y cerca del origen de las quebradas, debido a la pendiente de estas laderas que experimentan un alto grado de erosión (Guerrero et al., 2019). Este tipo de flujo se caracteriza por la presencia de olas periódicas de material relativamente grande y denso, que pueden

experimentalizar ciclos donde la presencia de fluido es mínima. Estos flujos pueden clasificarse como monofásicos, con una fracción sólida que oscila entre el 50% y el 90%. Exhiben propiedades de un fluido viscoso, con velocidades relativas de partículas en la mezcla bajas, y se observan deformaciones extensas y continuas (Vera et al., 2019).

Los flujos hiperconcentrados exhiben características intermedias entre los flujos de escombros y los depósitos aluviales. Estos flujos pueden tener volúmenes masivos, aunque generalmente muestran una estratificación débil, caracterizado por horizontes finos (Vallance & Iverson, 2015). Se caracterizan principalmente de clastos que van desde el tamaño de arena (1/16-2 mm) hasta grava (2-64 mm). Presenta una mezcla no uniforme de agua y sedimentos, pero la proporción de componentes líquidos es mayor en comparación con los flujos de escombros. Su consistencia es similar a la del aceite de motor sucio, y, además, tienden a ser más turbulentos que otros tipos de flujo (Vallance & Iverson, 2015) En la Figura 6 se esquematiza la clasificación de las mezclas en función de la fracción sólida y el tipo de material, mientras que en la Tabla 1 se representan los flujos entre el flujo de escombros y el flujo hiperconcentrado, según su tipo.

Figura 6. Esquema de la clasificación de las mezclas de agua y sólidos en función de la fracción de sólidos y el tipo de material



Fuente: (Coussot & Meunier, 1995)

Tabla 1. Esquema de clasificación de la mezcla de la fase líquida y sólida

	Bifásico Heterogéneo	MONOFÁSICO HOMOGÉNEO							MOVIMIENTO DE TIERRA
		FLUJO DE LODOS Y ESCOMBROS (DEBRIS FLOWS & MUDFLOWS)							
% M FINO	Transporte en Suspensión	Fluidos Newtonianos Viscosos	Fluidos Dilatantes	Macroviscosos	Fluidos dilatantes (pseudoplásticos)	Esfuerzo de corte crítico	Régimen Visco – plástico (Bingham, Herschel- Bulkley)	Régimen visco plástico generalizado	Deslizamiento
	Transporte de fondo			Colisión o de Inercia granular		Casi- estático / inercia del grano			Colapso
	25							65	
CONCENTRACIÓN EN VOLUMEN DEL MATERIAL SÓLIDO (%)									

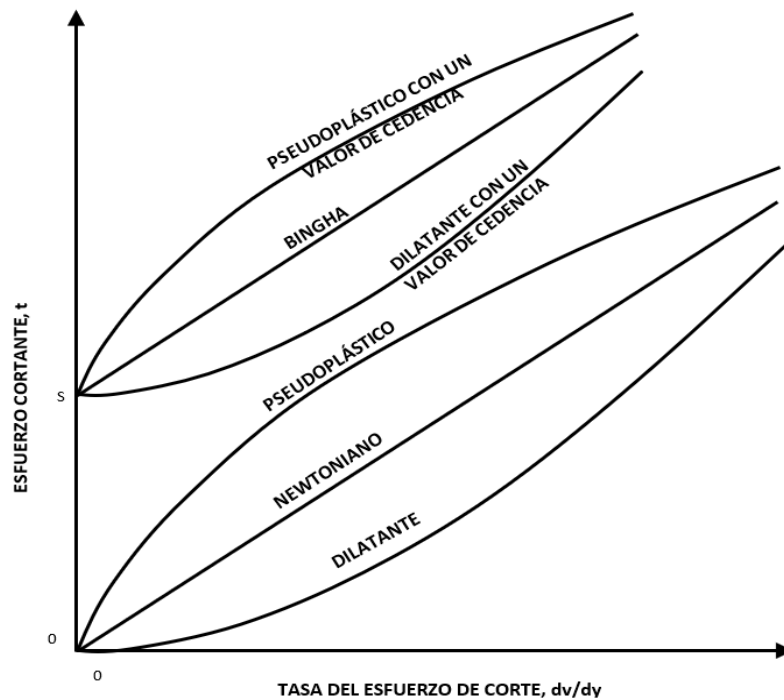
Fuente: (CIERHI-EPN, 2017)

Los fluidos no newtonianos, clasificados según la concentración volumétrica de material sólido y la fracción de partículas finas, se dividen en: Macro-viscosos, granulo-inerciales (colisionales), friccionales, visco-plásticos y visco-plásticos/granulo-inerciales (Coussot, 2017).

Los fluidos macro-viscosos (de comportamiento laminar con disposición de energía por viscosidad) se consideran una mezcla granular-fluido newtoniana, donde la viscosidad está determinada por la proporción, temperatura y concentración de los sedimentos. Los fluidos con régimen visco-plásticos exhiben un aumento en la viscosidad de la mezcla conforme se incrementa la presencia de materiales finos (limos y arcillas) en la fase sólida, considerándolos como newtonianos si superan el valor del esfuerzo de corte crítico. Dependiendo del valor del exponente reológico (n) y del esfuerzo crítico, estos fluidos pueden manifestarse como dilatantes ($n > 1$) o pseudoplásticos ($n < 1$) (Coussot, 2017).

En la Figura 7 representa un esquema de la clasificación reológica de los fluidos según la relación entre la tasa de esfuerzo de corte y el esfuerzo cortante.

Figura 7. Clasificación reológica de los fluidos



Fuente: (Coussot, 2017)

La clasificación reológica, basada en la relación entre la tasa de esfuerzo cortante y el esfuerzo cortante, define al lahar como una mezcla con comportamiento de flujo newtoniano, macro-viscoso y granulo-inercial, dependiendo del porcentaje de material sólido y de la parte final de la mezcla (Vera et al., 2019).

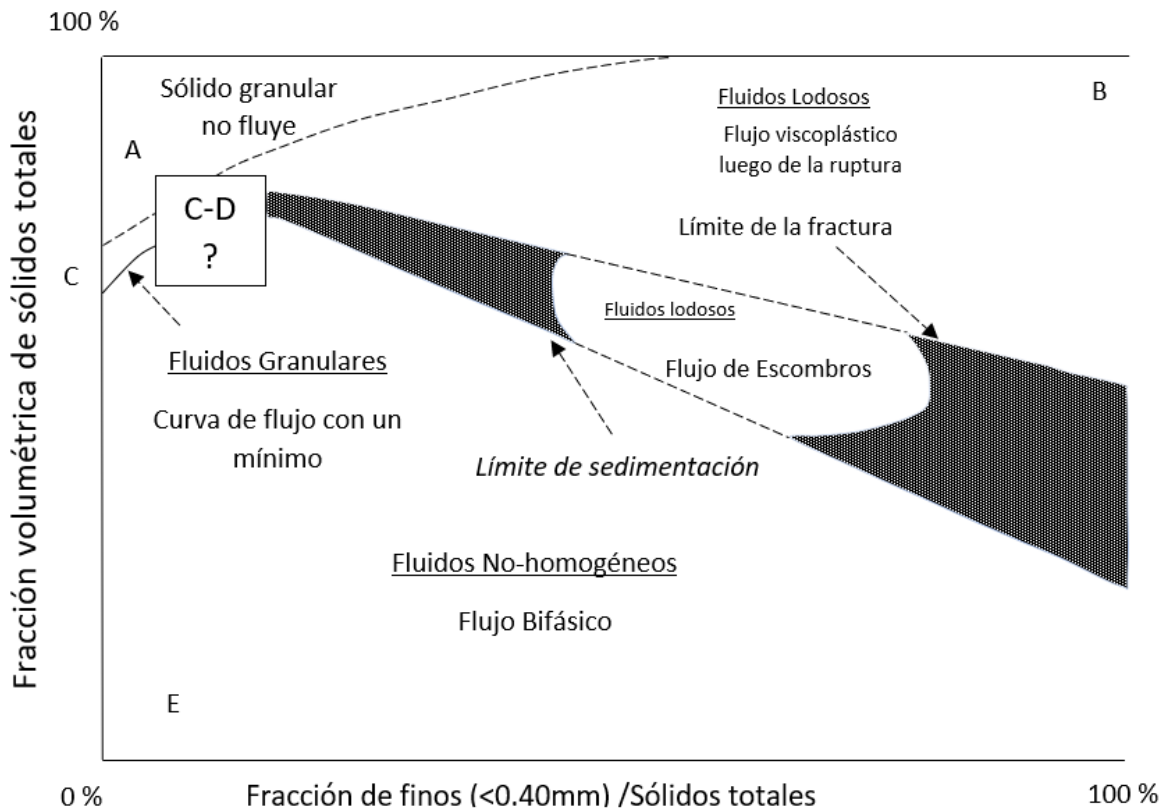
3.1.5. Modelo conceptual de las mezclas de agua y escombros planteado por Coussot 1997

El comportamiento de un flujo lahárico está determinado por las características de las partículas y del fluido, así como por las interacciones entre las partículas y el fluido, lo que presenta una variabilidad según el volumen concentrado, el tipo y la distribución espacial de las partículas. En este modelo se establece el primer límite de sedimentación y otro de fracturación.

En la Figura 8 se muestra que en la “zona A” se observa una relación entre partículas finas y una alta concentración de sólidos que obstaculizan el movimiento del flujo, lo cual ocurre cuando las partículas se fracturan. La “zona B” se refiere a la relación entre materiales finos y una alta concentración de sólidos, lo que permite el movimiento lento del flujo sin que ocurra fracturación. La “zona C” se caracteriza por una baja proporción de materiales finos y una alta saturación de la mezcla. Hay una zona de transición “C-D” donde se alcanza casi la máxima concentración de material granular con movimiento lento sin fracturación de las partículas debido a una elevada concentración de flujo intersticial. En la “zona D”, se observa una concentración moderada de materiales finos y sólidos, con un flujo intersticial. En la “zona E”, la concentración de sólidos es baja y la de materiales

finos es moderada, lo que conduce a una sedimentación inmediata de las partículas gruesas (Coussot, 2017).

Figura 8. Modelo conceptual de mezclas de agua y escombros



Fuente: (Coussot, 2017)

3.2. Volcán Cotopaxi

El volcán Cotopaxi está situado en la Cordillera Oriental de los Andes ecuatorianos, aproximadamente a 60 km al sur de la ciudad de Quito. Es un estratovolcán activo de alta peligrosidad que, hasta la fecha, se mantiene bajo monitoreo constante y en estado de alerta.

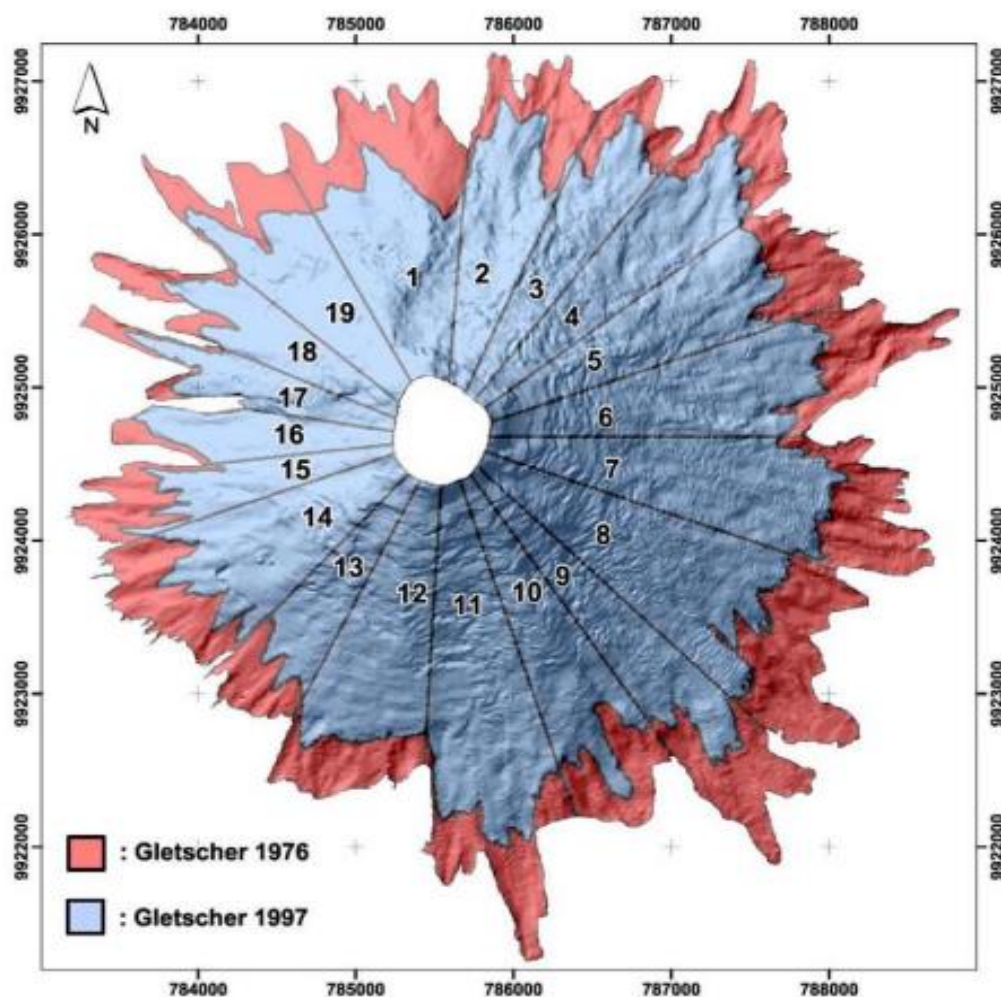
Con una altitud de 5897 metros sobre el nivel del mar, la cima del volcán está cubierta por una capa perpetua de hielo que varía de espesor entre 30 y 120 metros (Catelan et al., 2022). (Cáceres et al., 2008) estiman que el volumen del glaciar ascendía aproximadamente a 1000 millones de metros cúbicos en 1976, considerando un espesor promedio de 50 metros. Sin embargo, debido al cambio climático global y al calentamiento global, este volumen se redujo a 732 millones de metros cúbicos en 1997.

Los flancos del volcán se caracterizan por tener pendientes de aproximadamente de 25°-30° en promedio, con valores que pueden superar los 40° en algunas zonas cercanas al borde del cráter. Sin embargo, en ciertos puntos dentro de los empinados cañones superiores de los ríos Aláquez y Saquimala, las pendientes alcanzan los 65°-70° (Catelan et al., 2022).

3.2.1. Valoración del área del glaciar

Jordan et al. (2005) manifiesta en su estudio fue uno de los primeros en realizar una evaluación cuantitativa del tamaño (en área y volumen) del casquete glaciar del volcán Cotopaxi. Se llevó a cabo un inventario de los diversos glaciares del volcán utilizado herramientas como fotografías aéreas y controles de campo (un total de 19). Para el año 1976, se obtuvo un área total aproximada de 21,8 km². Los glaciares cuyos deshielos alimentan la red de drenaje Sur están numerados desde el casquete 10 hasta el 19 (Figura 9) y son: Churrumihurco, Simarrones, El Picacho, Saquimala, San Lorenzo, Capulí-Huaico, Pucahuaicu Oeste, Chanchunga Norte y Sur, y Yanasacha.

Figura 9. Casquetes del drenaje Sur del volcán Cotopaxi



Fuente: (Jordan et al., 2005)

Se registra información actualizada en los estudios realizados por Cáceres (2015) de las áreas de los glaciares correspondientes al drenaje Sur del volcán. En las Tabla 2 y Tabla 3 se presentan áreas de drenaje para los glaciares 10-19 que conciernen a los años 1976 a 2011, además del área total del casquete glaciar para el período comprendido entre 1976-2015.

Tabla 2. Área total del casquete glaciar del Cotopaxi

Área total del casquete Glaciar del Cotopaxi período 1976-2015				
Área 1976 (km²)	Área 1977 (km²)	Área 2006 (km²)	Área 2011 (km²)	Área 2015 (km²)
21,80	15,43	11,84	11,63	11,56

Fuente: (Cáceres, 2015)

Tabla 3. Áreas de drenaje para los glaciares 10-19

Glaciares drenaje Sur-Casquetes 10 al 19					
Núm.	Nombre	Área 1976 (km²)	Área 1997 (km²)	Área 2006 (km²)	Área 2011 (km²)
10	Churumihurco	1.3489	0.9948	0.6341	0.6232
11	Simarrones	1.5856	1.2684	0.9866	0.9696
12	El Picacho	1.4035	1.0672	0.7556	0.7623
13	Saquimala	1.1771	0.800	0.393	0.3862
14	San Lorenzo	1.1923	0.740	0.7226	0.7101
15	Capulí-Huaicu	0.7761	0.435	0.2861	0.2812
16	Pucahuaicu Oeste	0.4268	0.350	0.2711	0.2665
17	Chanchunga Sur	0.3826	0.320	0.3037	0.2985
18	Chanchuga Norte	0.7123	0.4276	0.3722	0.3658
19	Yanasacha	0.9574	0.7351	0.5453	0.5359
Total del Flanco Sur		9.9627	7.1399	5.2908	5.1996

Fuente: (Cáceres, 2015)

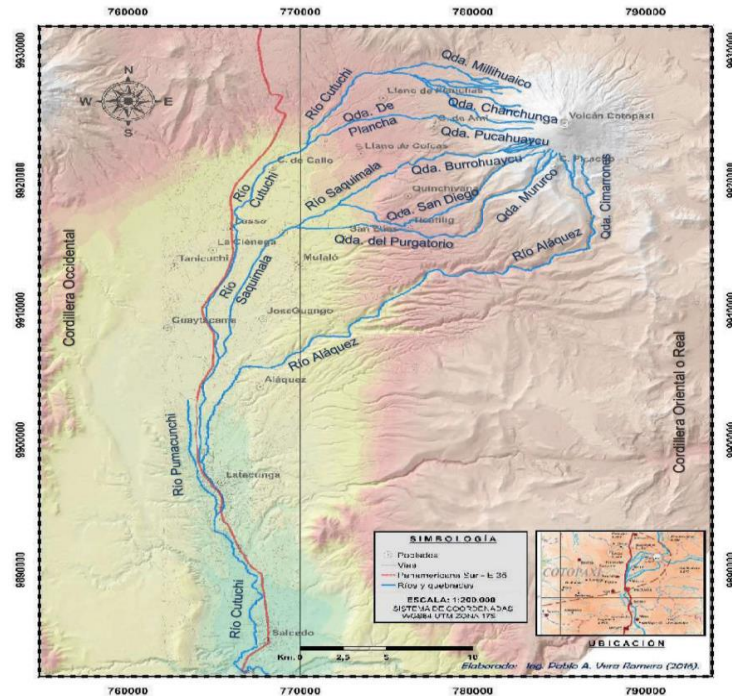
3.2.2. Red de drenaje Sur del volcán Cotopaxi

Para el análisis del flujo de lahares en la zona de estudio del drenaje Sur del volcán Cotopaxi, es necesario comprender la red hidrológica natural que se origina en las laderas del edificio volcánico. Esta red comienza en profundas quebradas que reciben el flujo de agua de los cauces que descienden desde el glaciar, y posteriormente se unen para formar el río Cutuchi en el valle de Latacunga (Instituto Geofísico, 2015). Este conocimiento es fundamental para comprender la dinámica de los lahares y su posible impacto en la región. En esta región se ubican poblaciones como Latacunga, Salcedo y Patate (Carrillo, 2015). A medida que se desarrolla la red hídrica hacia el suroccidente, se forman los tramos Saquimala y Aláquez, que luego confluyen para constituir el tramo del río Cutuchi (Proaño Varela et al., 2023). Desde la base del volcán, esta composición se extiende por

una llanura amplia y con pendiente baja, lo que facilita un eventual desbordamiento del flujo hacia los cauces adyacentes (Frimberger et al., 2021).

En la Figura 10 se observa la esquematización completa del drenaje sur del volcán Cotopaxi.

Figura 10. Drenaje sur del volcán Cotopaxi

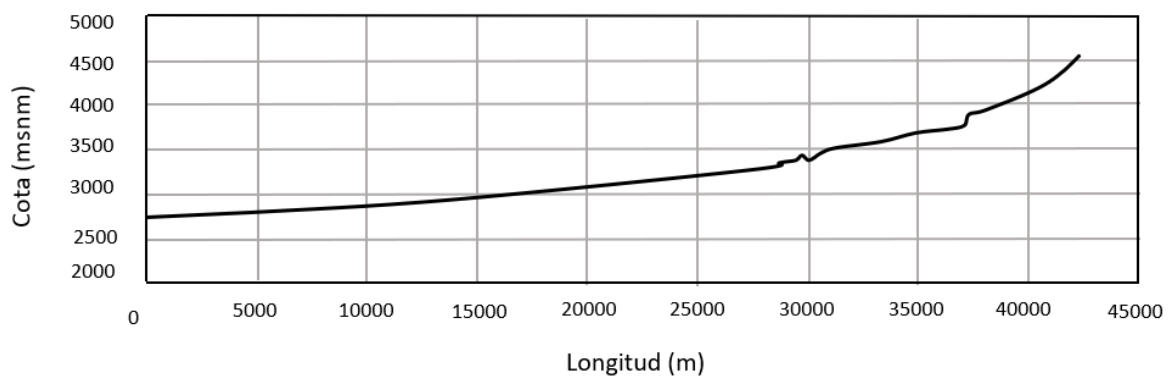


Fuente: (Vera et al., 2019)

En la zona de estudio, el tramo de Aláquez se extiende desde la base del volcán hasta su confluencia con el río Cutuchi. Su pendiente representativa es del 4,24% y tiene una longitud de 42 km (Vera et al., 2019).

En la Figura 11 se observa el perfil longitudinal del tramo Aláquez.

Figura 11. Perfil longitudinal del tramo Aláquez



Fuente: (Vera et al., 2019)

3.2.3. Definición de los escenarios eruptivos y valoración de la probabilidad de ocurrencia relacionada con cada escenario eruptivo

Samaniego (2004) ha definido cuatro escenarios eruptivos del Cotopaxi, que se han determinado en función de varios aspectos:

- La magnitud de las erupciones se determina mediante el trabajo de campo y la distribución de los productos volcánicos.
- Comportamiento de otros volcanes de la Cordillera como el Tungurahua, El Reventador, Sangay, etc.
- El tamaño del glaciar y el porcentaje de fusión.
- La dinámica eruptiva del volcán, que abarca los tipos de erupciones que podrían ocurrir.

En la Tabla 4 se presenta las características de los cuatro escenarios eruptivos.

Tabla 4. Escenarios eruptivos

Escenario	VEI	Tipo de actividad	Fenómenos eruptivos	Espesor promedio del glaciar afectado (m)	Volumen de agua disponible (millones de m ³)	Volumen de lahar (millones de m ³)	Forma del hidrograma
1 (pequeño)	1,2	Fuente de lava Estromboliana	Caída de ceniza Fragmentos balísticos Flujos piroclásticos pequeños	0,3	1-1,3 0,8-1	3-4 2-3	Múltiples pulsos Atenuación rápida
2 (moderado)	3	Estromboliana Vulcaniana	Caída de ceniza Flujo piroclástico Flujos de lava	1-2	4-4,5 8-9	12-15 24-30	Inicio moderado Atenuación lenta Múltiples pulsos
3 (grande)	4	Vulcaniana a Pliniana	Caída de cenizas Flujos piroclásticos	4	16-18	48-60	Inicio abrupto Atenuación lenta
4 (muy grande)	>4	Pliniana	Caídas de cenizas Flujos piroclásticos	8	32-36	96-120	Inicio abrupto Atenuación lenta

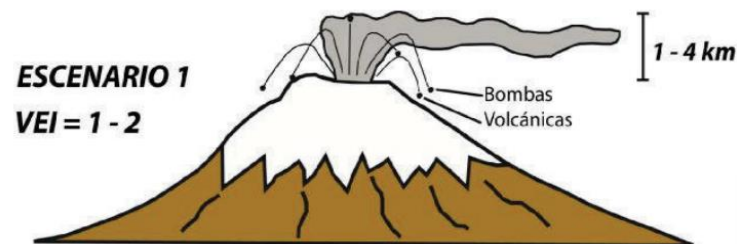
Fuente: (Samaniego, 2004)

Las características vulcanológicas e hidrológicas de cada escenario eruptivo detallado en la Tabla 4 describen su índice de explosividad volcánica (VEI), tipo de actividad, fenómenos eruptivos asociados como (lahares, caídas de ceniza, flujos de lava y piroclásticos), espesor promedio afectado, volumen de agua y lahar, así como la forma característica del hidrograma. Sin embargo, no representan exactamente la magnitud de una erupción probable, pero si permite conocer algunos rangos de variación de los fenómenos eruptivos (Vera et al., 2019).

Escenario 1: Pequeño (VEI 1-2)

Se trata de un evento poco explosivo, caracterizado por una actividad tipo estromboliano que genera flujo de lava que alcanza los límites del cráter. Este tipo de escenario puede ser característico y persistir durante todo el ciclo eruptivo de un volcán. Sin embargo, este tipo de actividad puede evolucionar hacia niveles con un grado de explosividad mayor (escenarios 2, 3 y 4), lo que podría dar lugar a la generación de flujos de lodo por diversos mecanismos. En estos casos, el volumen de material no sería generado de manera inmediata, sino que podría prolongarse durante varias horas. Por esta razón, el hidrograma típico para este escenario presentaría múltiples pulsos (Ordoñez et al., 2013).

Figura 12. Esquema del Escenario 1

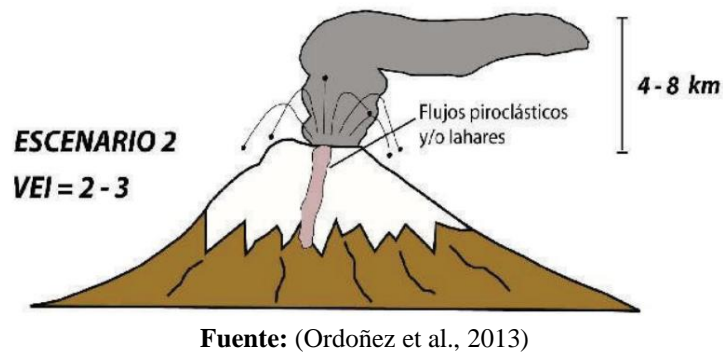


Fuente: (Ordoñez et al., 2013)

Escenario 2: Moderado (VEI 3)

Se considera que la actividad del volcán es moderadamente explosiva, con características que van desde estromboliano hasta vulcaniano. Este tipo de actividad se caracteriza por emisiones permanentes de ceniza, así como por flujos piroclásticos de pequeña a moderada magnitud. Además, durante este tipo de erupciones se pueden generar flujos de lava, como ocurrió durante la erupción del Cotopaxi en el periodo 1853-1854. En este escenario, la afectación del glaciar sería mayor que en el escenario anterior debido a la actividad eruptiva más explosiva. La lava tendría la capacidad de descender por uno de los flancos del edificio volcánico, lo que podría generar una interacción significativa entre la lava y el hielo del glaciar, exacerbando los riesgos asociados con la fusión del hielo y la formación de lahares (Ordoñez et al., 2013)

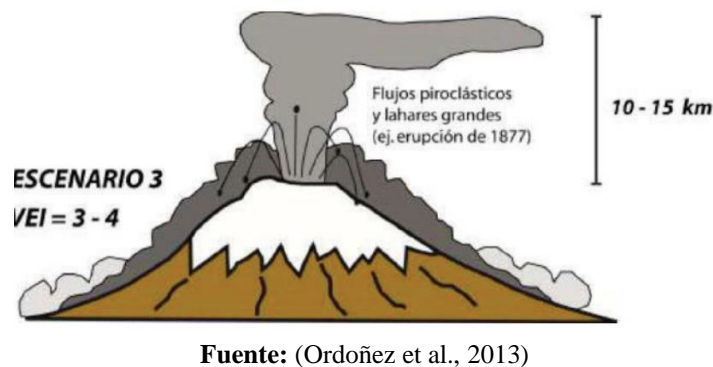
Figura 13. Esquema del Escenario 2



Escenario 3: Grande (VEI 4)

Este escenario se considera para la calibración para modelos numéricos. Se caracteriza por actividades vulcanianas, con emisiones importantes de ceniza que afectarían tanto los alrededores del volcán como la parte occidental del mismo. Además, se esperan desbordamientos de magma que descenderían por los flancos del edificio volcánico. El historial geológico muestra que este escenario es el más frecuente. En este escenario, el glaciar se vería gravemente afectado debido al contraste de temperaturas entre el material piroclástico y el glaciar, lo que ocasionaría una abrasión térmica significativa. Como consecuencia, se produciría una liberación súbita del volumen de agua generado, lo que aumentaría el riesgo de lahares y la rápida inundación de las áreas circundantes (Ordoñez et al., 2013).

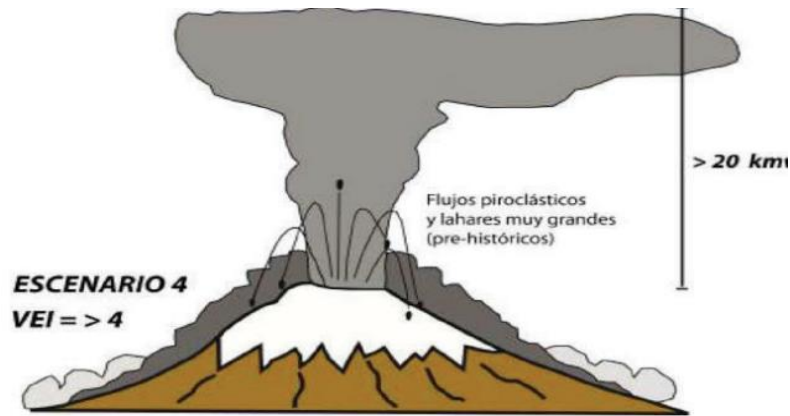
Figura 14. Esquema del Escenario 3



Escenario 4: Muy grande (VEI >4)

Se trata de un evento altamente explosivo que tuvo lugar en fases prehistóricas. Las emisiones de ceniza resultantes tuvieron un impacto a nivel regional, mientras que los flujos piroclásticos contribuyeron al colapso de la columna eruptiva con una amplia dispersión. El glaciar sufriría graves impactos, y los flujos de lava serían más extensos. El hidrograma de este evento mostraría un inicio abrupto, con caudales pico y volúmenes significativamente mayores (Ordoñez et al., 2013).

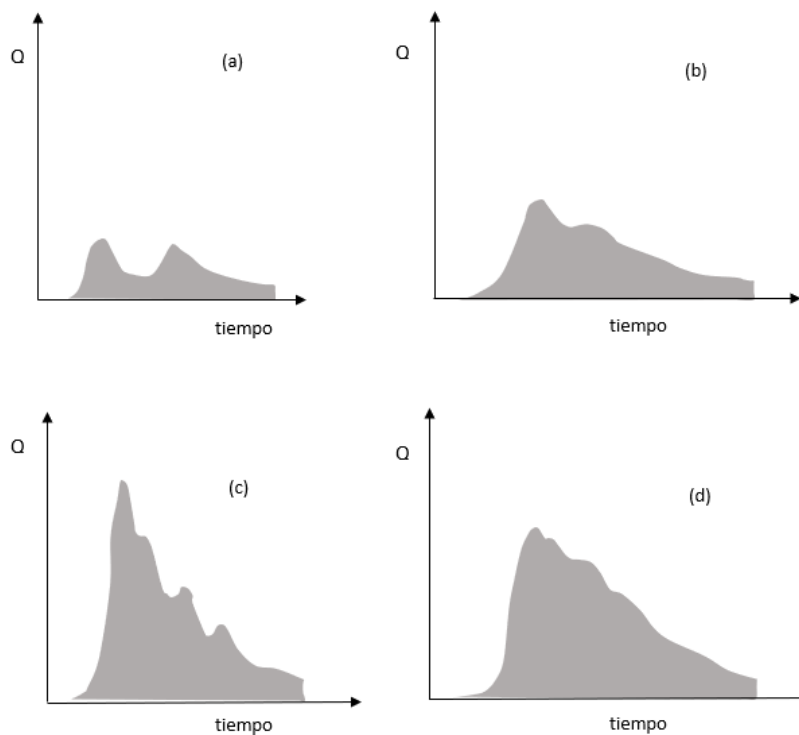
Figura 15. Esquema del Escenario 4



Fuente: (Ordoñez et al., 2013)

En la Figura 16 se presenta un esquema de los diferentes tipos de hidrogramas para cada uno de los escenarios eruptivos (modificado de Pierson et al., 1990). a) Escenario 1, b) Escenario 2, c) Escenario 3 y d) Escenario 4 (Samaniego, 2004).

Figura 16. Hidrogramas de cada uno de los Escenarios



Fuente: (Samaniego, 2004)

La afectación del glaciar no es uniforme; principalmente, la interacción entre los materiales piroclásticos y el glaciar se produce en sus bordes. Los estudios geológicos del volcán Cotopaxi, ha permitido establecer 18 episodios eruptivos importantes en los últimos 2000 años de actividad de los cuales han ocurrido 6 eventos eruptivos (Tabla 5) con un VEI de 3; 10 eventos con un VEI de 4 y 2 eventos con un VEI >4 (Samaniego, 2004).

Tabla 5. Episodios eruptivos del volcán Cotopaxi

Período	Emisiones de ceniza	Flujos piroclásticos	Lahares	Flujos de lava	VEI
---------	---------------------	----------------------	---------	----------------	-----

1880 DC	X				2-3
1877 DC	X	X	2		4
1854 DC	X	X	1	1	3
1853 DC	X	X	1	1	3
1768 DC	X	X	1	1	4
1766 DC	X	X	1		3
1744 DC	X	X	2		4
1742 DC	X	X	3		4
1532-34 DC	X	X	2	1	3
1150 DC	X	X	2		4
950 DC	X	X	2		> 4
850 DC	X	X	1		3-4
750 DC	X	X	2		4
180 DC	X	X	1	varios	4
150 DC	X	X	2	1	> 4
100 DC	X		varios		4
50 AC	X	X			4

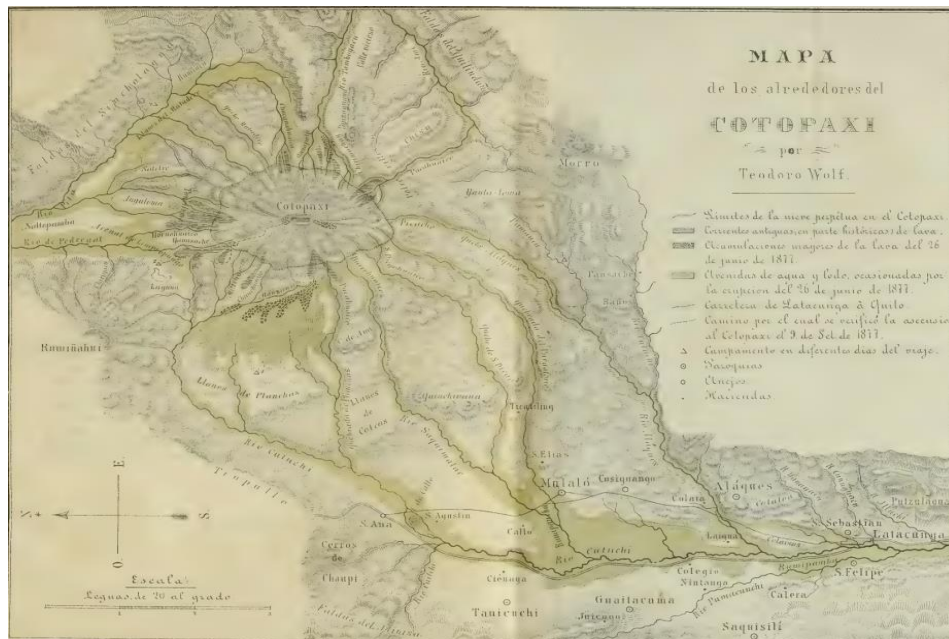
Fuente: (Samaniego, 2004)

Los datos indican que el escenario más probable es una erupción similar a la de 1877 (Escenario 3: VEI4), con una probabilidad del 60%. Es importante destacar que, según el historial geológico, después de un largo periodo de inactividad como el actual (más de 100 años), la actividad del volcán Cotopaxi suele caracterizarse por erupciones de gran magnitud, con un VEI de 4. Para los escenario 2: VEI 3, la probabilidad es del 30% (Vera et al., 2019).

3.2.4. Descripción breve de la última erupción del volcán Cotopaxi ocurrida el 26 de junio de 1877

Se puede estimar el grado de afectación del glaciar del Cotopaxi por la gran erupción del 26 de junio de 1877 gracias a los relatos de Sodiro (1877) y Wolf (1878) donde, días posteriores a dicha erupción, se discutía la posibilidad de que el glaciar del volcán hubiera desaparecido completamente. Para descartar esta posibilidad, el Dr. Teodoro Wolf dirigió una expedición al volcán (Figura 17), el cual se llevó a cabo el 9 de septiembre de 1877. Así, se pudo constatar que el casquete glaciar estaba cubierto por una capa de materiales volcánicos, confirmando de esa manera la suposición hecha por el Padre Luis Sodiro.

Figura 17. Esquema del flujo de lahares después de la erupción de 1877



Fuente: (Wolf, 1878)

En la mayoría de los casos, los lahares fueron tan caudalosos que rebosaron fácilmente los cauces naturales de ríos, provocando extensas inundaciones de lodo y destrucción en las zonas aledañas. Según los relatos de Wolf, los lahares tuvieron velocidades tales que se tardaron algo más de media hora en llegar a Latacunga por el drenaje Sur del volcán, poco menos de 1 hora en llegar al Valle de los Chillós en el drenaje Norte, cerca de tres horas en llegar a la zona de Baños (Tungurahua) y cerca de 18 horas en llegar a la desembocadura del río Esmeraldas en el océano Pacífico. Sodiro, escribió que los lahares fluían con gran ímpetu “sin que nada pudiese [...] oponer algún dique a su curso destructor, ni siquiera presentarle la más mínima resistencia”.

3.3. Estratigrafía

Es una ciencia geológica que se encarga de interpretar las rocas estratificadas, dispuestas en capas superpuestas o estratos, desde el momento de su deposición. Principalmente, se enfoca en el estudio de las rocas sedimentarias que conservan su estratificación original, así como en las rocas volcánicas y las capas de sedimentos que aún no han sido litificadas (Montalvo & Salazar, 2023). Cada estrato es el resultado del depósito que ocurrió durante un intervalo de tiempo específico. Esta ciencia posibilita la reconstrucción de las condiciones ambientales y el periodo en el que se depositaron las capas geológicas (Molina, 2022).

En el trabajo de (Pistolesi et al., 2013), se examinaron minuciosamente los depósitos de lahares primarios ocurridos en el Cotopaxi desde el siglo XVI. El trabajo resultó en la elaboración de una tabla estratigráfica (Tabla 6), que describe las unidades de los lahares observadas en las quebradas del río Cutuchi en el drenaje Sur del volcán, clasificadas de la siguiente manera:

- Tipo A: espesor inferior a 2 metros, con bloques de dimensiones decimétricos, y se extienden lateralmente por decenas de metros (Pistolesi et al., 2011).

- Tipo B: el espesor de los depósitos es aproximadamente de 2 metros, con bloques de tamaño métricos, y su continuidad lateral se extiende por cientos de metros a través del valle (Pistolesi et al., 2011).
- Tipo C: espesor superior a 10 metros, con cantos rodados de tamaño métrico, y abarcan muchas quebradas en su extensión (Pistolesi et al., 2011).

Tabla 6. Unidades de lahares

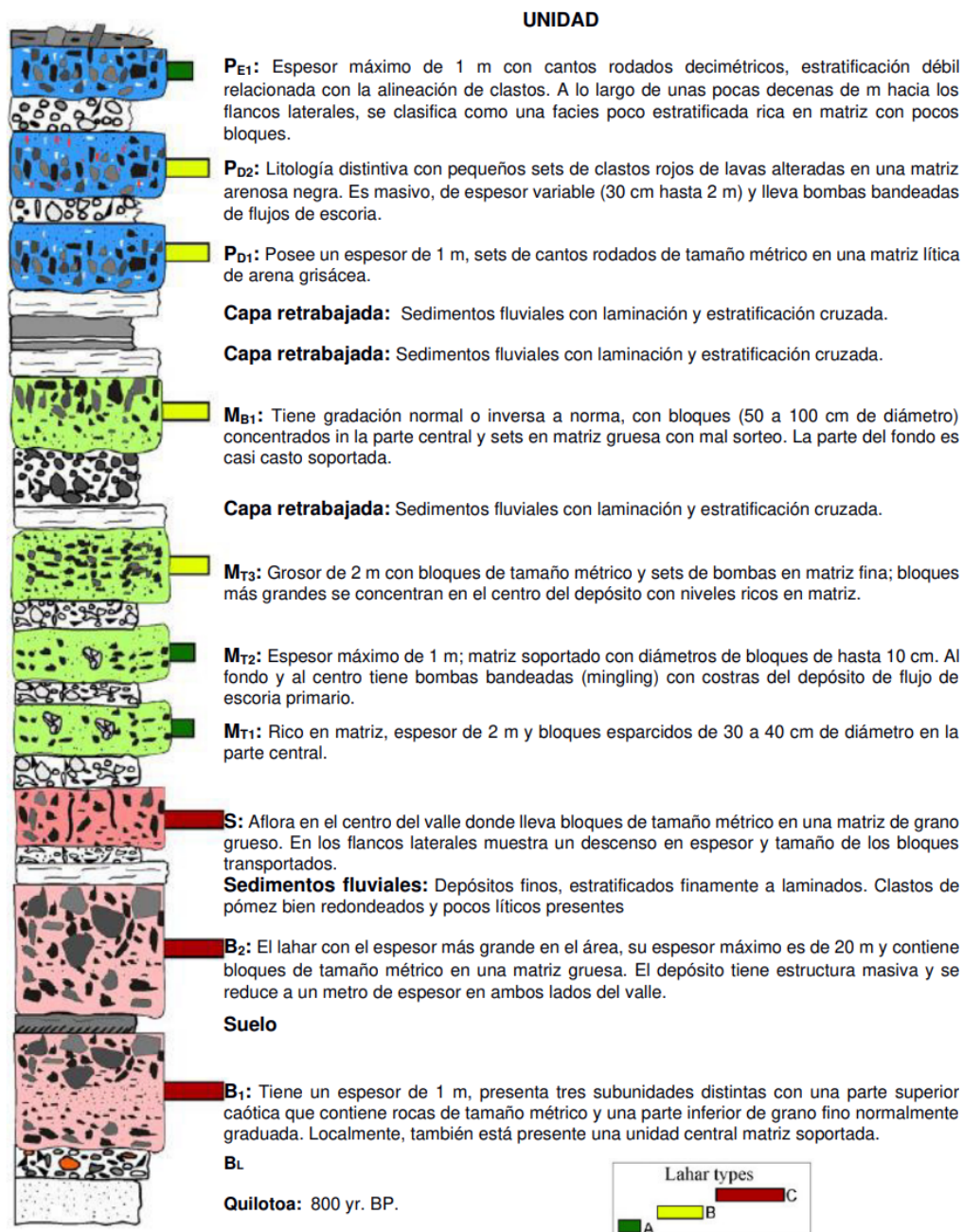
Unidad	Año	Tipo
P _{E1}	1877	A
P _{D2}	1853-1854	B
P _{D1}	1853-1854	B
M _{B1}	1766-1768	B
M _{T3}	1744	B
M _{T2}	1743	A
M _{T1}	1742	A
S	1534	C
B ₂	Previo a 1534	C
B ₁	Previo 1534	C

Fuente: (Pistolesi et al., 2013)

En 1877, durante una de las mayores actividades eruptivas del volcán, se generaron flujos piroclásticos ricos en escoria (Unidad P-E1). Estos flujos fundieron la capa glaciaria del volcán, dando lugar a grandes lahares que alcanzaron velocidades de 25-30 m/s (Mothes & Vallance, 2015).

En la Figura 18 se presenta un esquema de la tabla estratigráfica de las unidades de lahares.

Figura 18. Tabla estratigráfica reconstruida de unidades de lahares y sus tipos



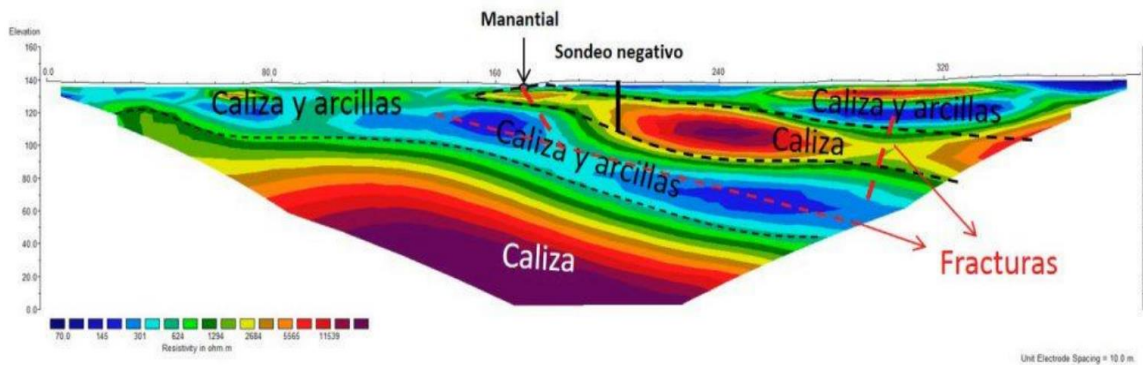
Fuente: (Pistolesi et al., 2013)

3.4. Tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica es una técnica geofísica utilizada para determinar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo (Alarcón & Basantes, 2022). La resistividad eléctrica es una propiedad que guardan relación con la composición, disposición de los constituyentes sólidos en el suelo, contenido de agua y temperatura, en términos de la oposición del material al paso de la corriente eléctrica. Es una medida que permite interpretar la variabilidad de las propiedades físicas del suelo, expresada en unidades de ohmios-metro (Ω m) (Sánchez & Mendoza, 2023); (CMPLab, 2021). Será necesario utilizar un programa de inversión para transformar las resistividades aparentes obtenidas en las lecturas de campo en valores de resistividades reales. Este

método se fundamenta en la obtención de una sección 2D de resistividades del subsuelo, a partir de la cual se puede determinar la presencia o ausencia de filtraciones de agua en profundidad. Esto se logra identificando áreas donde se observe una disminución anómala en el valor de la resistividad del terreno (Muñoz, 2016). Además, se puede complementar con una lectura en 3D, donde las observaciones se llevan a cabo en perfiles paralelos equidistantes, lo que proporciona una visualización más completa y detallada de la distribución de las resistividades en el subsuelo. En la Figura 19 se presenta un esquema de la lectura de las resistividades en un programa de inmersión 2D.

Figura 19. Esquema de la inversión de las resistividades en 2D



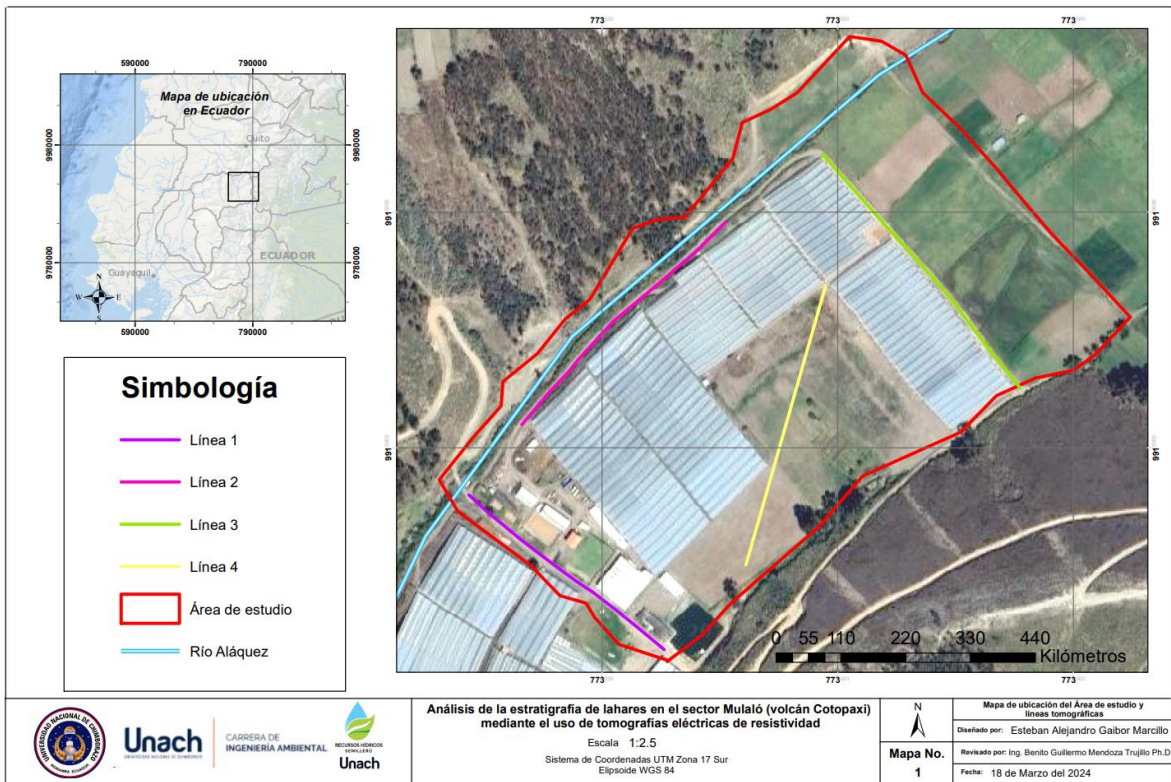
Fuente: (Técnicas Geofísicas SL, 2017)

4. CAPÍTULO IV. METODOLOGIA

4.1. Área de estudio

El presente estudio se realizó en un tramo de la microcuenca del río Aláquez en el sector Mulaló, que forma parte de la red hídrica Sur del volcán Cotopaxi (Figura 20).

Figura 20. Área de estudio.



Elaborado por: Autor

4.2. Líneas de lectura

Para definir cada línea de lectura, se tuvieron en cuenta varios factores, como la accesibilidad y las condiciones ambientales. Se precisaron los puntos de muestreo mediante el uso de GPS (GARMIN 62S), una herramienta que permite procesar las coordenadas UTM de cada electrodo del equipo SYSCAL PRO. Se utilizó una imagen de dron junto con un modelo digital de terreno procesado en un software de SIG para generar el mapa de la zona de estudio. En este mapa, se ubicaron cada una de las tomografías que se realizaron con el equipo SYSCAL PRO.

En las tablas que se encuentran en ANEXOS, se detallan las coordenadas de los sitios de cada electrodo del equipo SYSCAL, para cada una de las tomografías que se realizaron de forma lineal en el campo.

4.3. Diseño experimental

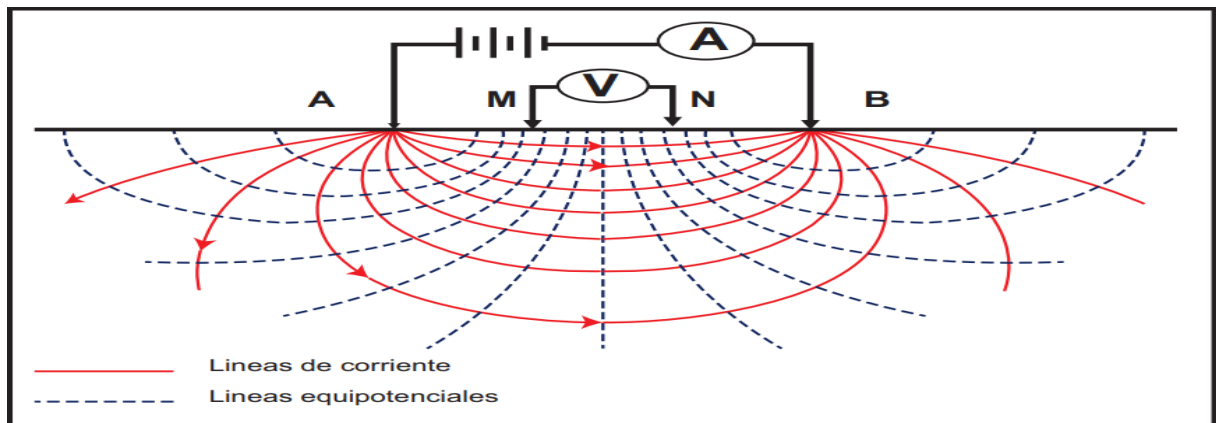
La investigación se formuló de manera lógica, combinando modalidades de observación a través de software y bibliográficas y se complementaron con visitas al campo. Se recolectó información directamente del área de estudio mediante técnicas de campo, combinadas con datos obtenidos de artículos científicos, tesis y libros que abordaron metodologías similares en el estudio de lahares en el volcán Cotopaxi (Gallardo, 2017).

4.4. Funcionamiento de Tomografía eléctrica

El funcionamiento de la tomografía se basa en principios similares a los métodos de resistividad convencionales. Requiere el uso de cuatro electrodos: dos para la corriente continua (A, B) y dos para el potencial (M, N). Los electrodos A y B introducen un campo eléctrico en el suelo, mientras que M y N miden la diferencia de potencial eléctrico (ΔV) entre los dos puntos. A partir de ΔV , se pueden calcular los valores de resistividad en el punto medio del dispositivo a una profundidad específica (Carrasco, 2011).

En la Figura 21 se muestra el esquema del funcionamiento de los electrodos para la tomografía eléctrica.

Figura 21. Funcionamiento de la Tomografía eléctrica

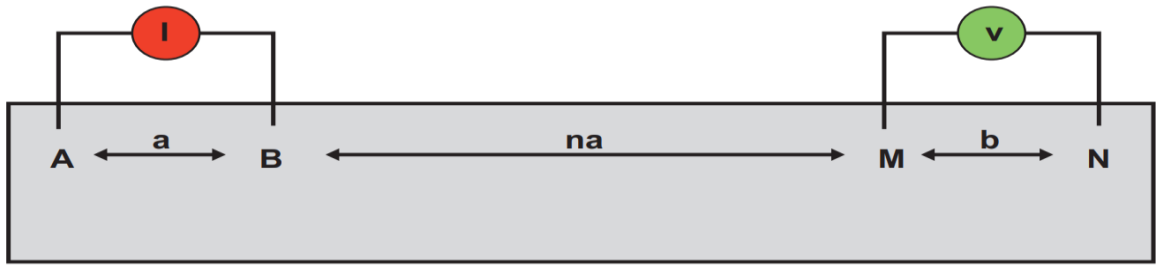


Fuente: (Carrasco, 2011)

La resistividad aparente (R_A) se mide utilizando un dispositivo tetra-electrodo, donde los electrodos están separados constantemente por una distancia denominada «a». Variando las distancias emisor y receptor por múltiplos de un valor denominado «ñ», se obtiene una sección de (R_A) a varios niveles «ñ» en el subsuelo. Los datos de las lecturas se procesan utilizando algoritmos matemáticos de inversión para obtener un modelo de resistividad en el subsuelo (Carrasco, 2011). En el estudio geoelectrico, se emplean configuraciones como Werner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo. Para esta investigación, se optó por el método Dipolo-Dipolo debido a su capacidad para resolver cambios geológicos laterales en el subsuelo, como estructuras litológicas y sedimentarias (fallas, diaclasas, fracturas y cámaras de recarga hídrica) (Mendoza et al, 2018).

En la Figura 22 se muestra un esquema de la configuración Dipolo-Dipolo y su funcionamiento.

Figura 22. Configuración Dipolo-Dipolo



Fuente: (Griem, 2016)

En esta configuración, los electrodos de corriente suelen estar separados por una distancia considerable con el par de electrodos de potencial. Si la separación entre los electrodos de corriente «a» es igual a la separación entre los electrodos de potencial «b», y la distancia entre los centros de los pares de los electrodos es (n+1) veces la distancia «a» (Griem, 2016)

La (RA) determinada por este método se obtiene mediante la (Ecuación 1):

$$\rho_a = n \times (n + 1) \times (n + 2) \times \pi \times a \times (\Delta V / I) \quad (1)$$

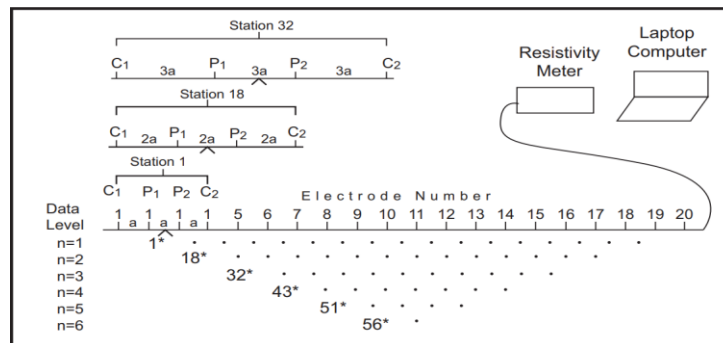
Donde: ρ_a : Resistividad aparente; n: nivel de adquisición; a: espaciamento de los electrodos; ΔV : diferencia de potencial; I: corriente eléctrica.

4.5. Técnica de campo para efectuar una tomografía eléctrica

Para llevar a cabo una tomografía eléctrica en dos dimensiones (2D), se comienza posicionando los electrodos en la superficie de manera adecuada, manteniendo un intervalo de espacio uniforme entre ellos y tratando de formar una línea recta. Se establece el inicio y el final del perfil para garantizar una interpretación sin problemas en las etapas posteriores (Mendoza et al., 2018)

En la Figura 23 se muestra el proceso de medidas para una tomografía eléctrica.

Figura 23. Secuencia de medidas para tomografía eléctrica 2D



Fuente: (Carrasco, 2011)

Los electrodos se insertan en la superficie del suelo a una profundidad suficiente para asegurar un buen contacto entre el electrodo y el suelo la conectarlos al cable de transmisión. Luego, a través de la computadora del Geo-resistivímetro SYSCAL PRO, se configuran las variables del dispositivo, incluyendo el número de electrodos utilizados (48) y la distancia entre electrodos (5 m). Antes de iniciar la secuencia de lectura, el dispositivo SYSCAL ofrece la opción de realizar un barrido automático para verificar el correcto funcionamiento de las conexiones y garantizar que la resistividad entre el electrodo y suelo sea suficientemente baja. En el caso de tener valores superiores generalmente basta con humedecer el terreno para mejorar la conductividad.

Una vez concluido el proceso de adquisición de datos, la información almacenada digitalmente se transfiere a la computadora, para posteriormente procesarlo con el software correspondiente (Solana, 2014).

La adquisición de datos se llevó a cabo utilizando el método Dipolo-Dipolo, el cual permite realizar 966 mediciones y alcanzar una profundidad de hasta 60 metros en cada una de las 4 tomografías realizadas en el área de estudio. Posteriormente, los datos procesados se descargan y se someten a una primera verificación utilizando el software PROSYS II, donde se realiza una corrección inicial de las resistividades anómalas, es decir, resistividades negativas o con valores iguales a 0. La interpretación de las resistividades corregidas se realiza utilizando el software Res2dInv, que emplea varios métodos de interpolación, siendo el seleccionado el método Kriging (Kaymaz, 2005).

Después de la inversión, se obtiene una «imagen de resistividades y profundidades reales» en 2D. Para llevar estas imágenes a un plano tridimensional, se utilizó el software Voxler4. Este software permite la visualización de datos de múltiples componentes y su transformación en modelos geofísicos en 3D.

4.6. Interpretación de la inversión de la resistividad eléctrica aparente

La resistividad eléctrica de las rocas puede variar ampliamente debido a factores como la porosidad, permeabilidad, temperatura, saturación de fluidos, química de los fluidos, grado de fracturación y composición mineral. Además, la presencia de humedad y una topografía accidentada pueden generar interpretaciones erróneas de los materiales subsuperficiales, ya que la humedad puede variar y dispersarse en las colinas (Butler, 2005).

En la Tabla 7 se identifica la estratigrafía del subsuelo en las mediciones de resistividades de materiales geológicos y residuales (Zúñiga, 2010).

Tabla 7. Valores de las resistividades en diferentes materiales

Material	Resistividad	
	Mínimo	Máximo
Grava	50 (agua saturada)	>104 (en seco)
Arena	50 (agua saturada)	>104 (en seco)
Limo	20	50
Marga	30	100
Arcilla (húmeda)	5	30
Arcilla (seca)		>1000
Lodos	15	25
Arenisca	<50 (húmedo)	>105 (en compacto)
Caliza	100 (húmedo)	>105 (en compacto)
Esquisto	50 (húmedo)	>105 (en compacto)
Toba	2x10 ³ (húmedo)	105 (mojada)
Rocas ígneas y metamórficas	<100 (degradado, húmedo)	>106 (en compacto)
Roca de sal	30 (húmedo)	>106 (en compacto)
Residuos domésticos e industriales	<1	>1000 (de plástico)
Agua natural	10	300
Agua de mar (35% NaCl)	0.25	
Agua salada	(salmuera) <0.15	3x10 ³
Agua superficial (rocas ígneas)	0.1	100
Agua superficial (sedimentos)	10	106

Fuente: (Zúñiga, 2010)

4.7. Interpretación de volúmenes de los depósitos laháricos

Esta etapa comienza con un archivo compatible con AutoDesk de curvas de nivel creadas desde la información recopilada por el drone, lo que se transforma en superficie dentro del software. El cálculo automatizado consta de los grupos de puntos de las coordenadas de cada electrodo y la superficie del área de estudio. Para procesar los datos iniciales en el formato de puntos del software es necesario eliminar objetos no identificados para realizar cálculos adicionales. El objeto no identificado es cualquier segmento rectilíneo y de arco interconectados que representan un solo objeto, como polilíneas y los límites propios de las curvas de nivel. Después de determinar los puntos deseados con los datos de coordenadas iniciales, se crean 2 límites de superficie que representan los límites del área de estudio. La cuadrícula de elementos finitos construida a partir de los datos procesados brinda la oportunidad de evaluar el diseño vertical si la topografía existente del área de estudio no

cumple con los requisitos en este caso que la profundidad sea hasta 60 metros, la distancia de las líneas sea (120 metros) y el área superficial sea ($1100 \text{ m}^2 - 1230 \text{ m}^2$). Sobre estos datos y la base del modelo 3D resultante, se puede realizar el cálculo automatizado aproximado de los volúmenes de material lahárico que existe por el subsuelo (Timirkhanov et al., 2022).

5. CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

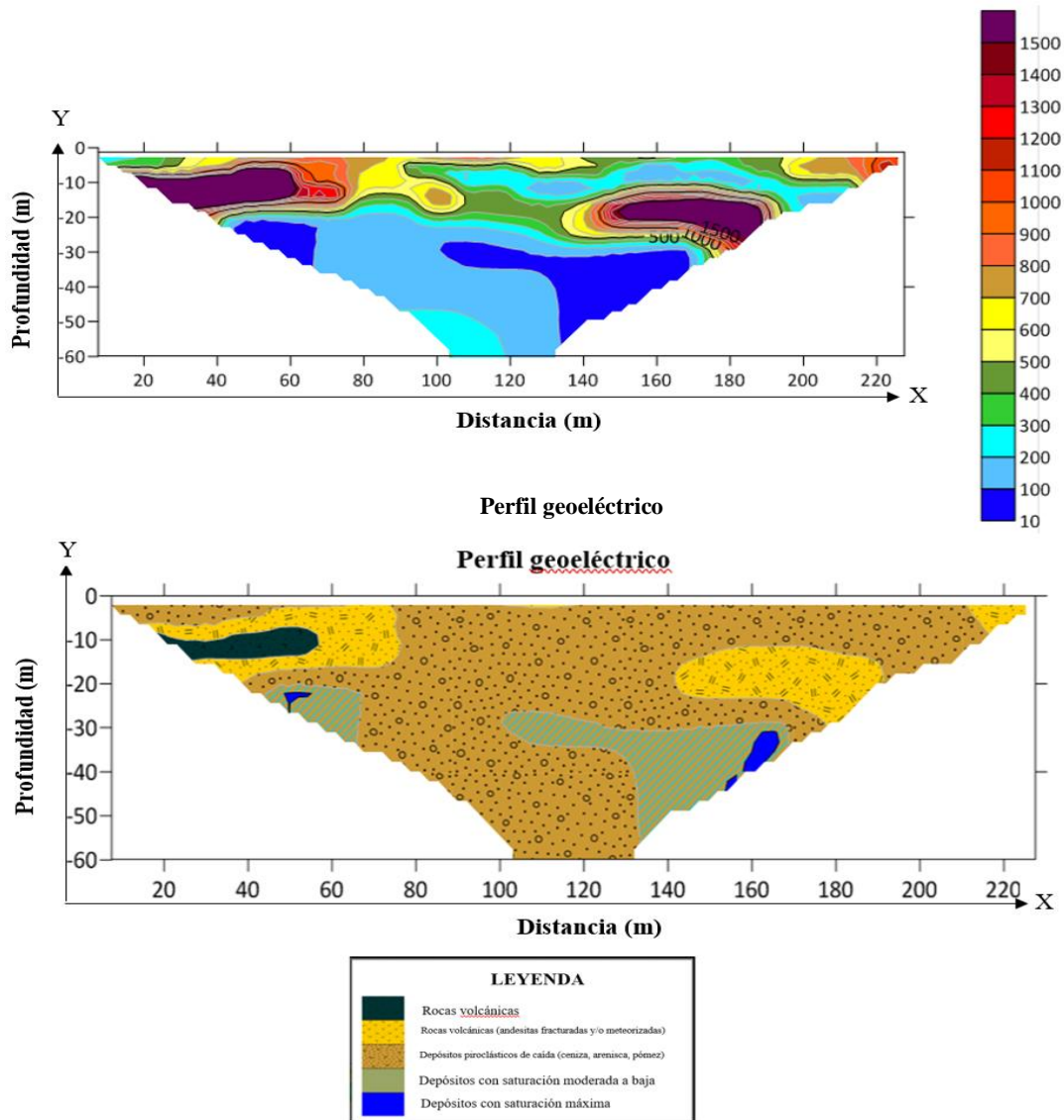
5.1.1. Reconstrucción estratigráfica en 2D y 3D de lahares

5.1.2. Interpretaciones 2D

Primera línea

La primera línea se realizó en un camino público donde el primer electrodo se colocó cerca de la orilla del río Aláquez, de esta resultó la tomografía eléctrica (Figura 26), con una configuración Dipolo-Dipolo y separación entre electrodos de 5 m cada uno. Se obtuvieron los siguientes resultados: se observan resistividades eléctricas que varían de 10 ohm.m a 1500 ohm.m. En el tramo de 40 a 170 m a una profundidad desde 25 m se aprecian valores de resistividad entre 10 a 290 ohm.m en la gama de color azul, correspondientes a zonas con alta permeabilidad hasta depósitos con saturación moderada a baja, estas zonas son discontinuas ya que se presenta una zona similar a una profundidad de 5m. De 300 a 700 ohm.m con gamas de colores verde y amarillo a partir de la superficie hasta 25 m de profundidad que corresponden a depósitos de caída (ceniza, arenisca, lapilli, pómez). En las distancias de 20 a 50 m y de 150 m a 190 m a profundidades de 10 y 25 m se observan resistividades que varían de 1400 a 1500 ohm.m, valores propios de rocas volcánicas, probablemente andesitas (Figura 24).

Figura 24. Estratigrafía 2D Primera Línea

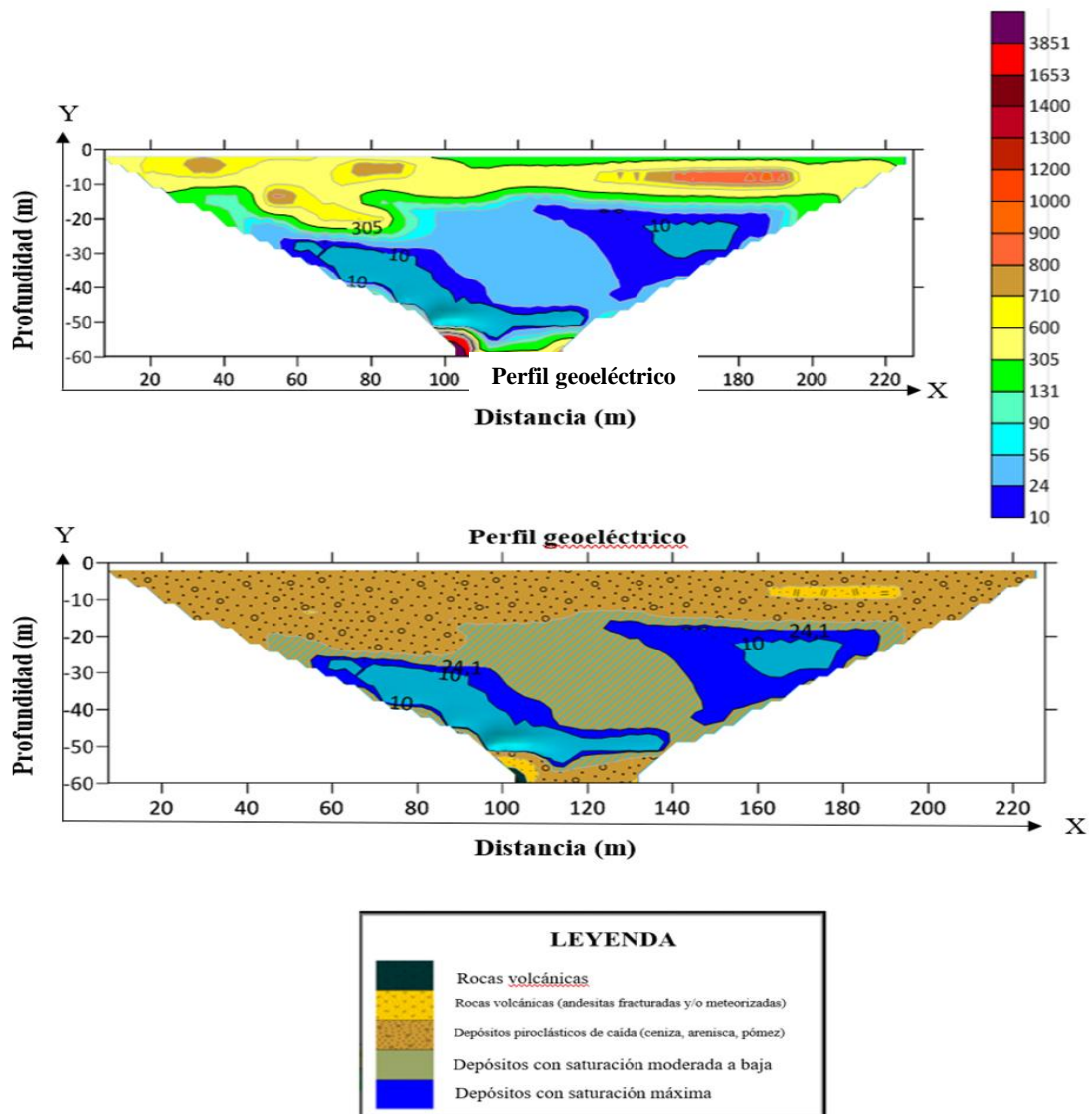


Elaborado por: Autor

Segunda línea

La segunda línea se realizó en una ladera cerca del río Aláquez, de esta resultó la tomografía eléctrica (Figura 25), con una configuración Dipolo-Dipolo y separación entre electrodos de 5 m cada una. Se obtuvieron los siguientes resultados: se observan resistividades eléctricas que varían de 10 ohm.m a 3851 ohm.m. En el tramo de 50 a 190 m a una profundidad desde 15 m a 55m se aprecian valores de resistividad entre 10 a 30 ohm.m en la gama de color azul, correspondientes a zonas con alta permeabilidad hasta depósitos con saturación moderada a baja. De 305 a 710 ohm.m con gamas de colores verde y amarillo a partir de la superficie hasta 25 m de profundidad que corresponden a depósitos de caída (ceniza, arenisca, lapilli, pómez, caliza). En las distancias de 100 a 120 m a profundidades de 55 m se observan resistividades que varían de 1400 a 3851 ohm.m, valores propios de rocas volcánicas.

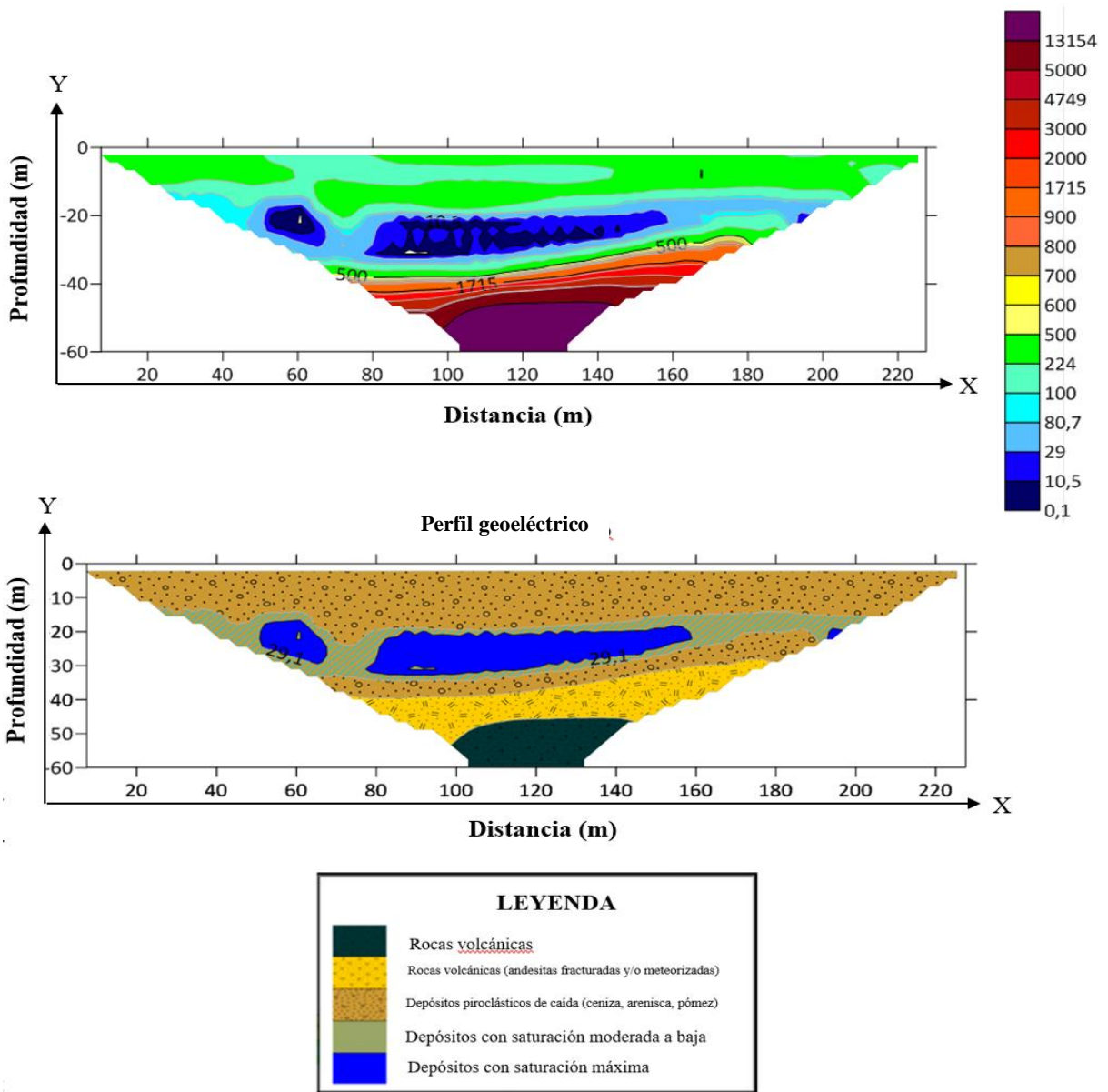
Figura 25. Estratigrafía 2D Segunda Línea



Tercera línea

La tercera línea se realizó perpendicular a la segunda línea, de esta resultó la tomografía eléctrica (Figura 26), con una configuración Dipolo-Dipolo y separación entre electrodos de 5 m cada una. Se obtuvieron los siguientes resultados: se observan resistividades eléctricas que varían de 0,1 ohm.m a 13154 ohm.m. En el tramo de 25 a 210 m a una profundidad desde 15 m a 35m se aprecian valores de resistividad entre 0,1 a 30 ohm.m en la gama de color azul, correspondientes a zonas con alta permeabilidad hasta depósitos con saturación moderada a baja, valores propios de agua superficial (rocas ígneas). De 100 a 700 ohm.m con gamas de colores verde y amarillo a partir de la superficie hasta 25 m de profundidad que corresponden a depósitos de caída (ceniza, arenisca, lapilli, pómez, caliza). En las distancias de 70 a 180 m a profundidades de 55 m se observan resistividades que varían de 5000 a 13154 ohm.m, valores propios de rocas volcánicas, probablemente andesitas.

Figura 26. Estratigrafía 2D Tercera Línea



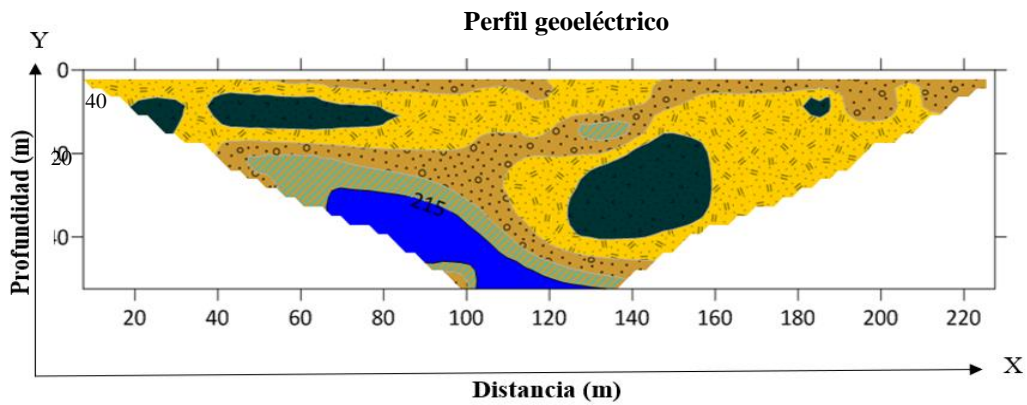
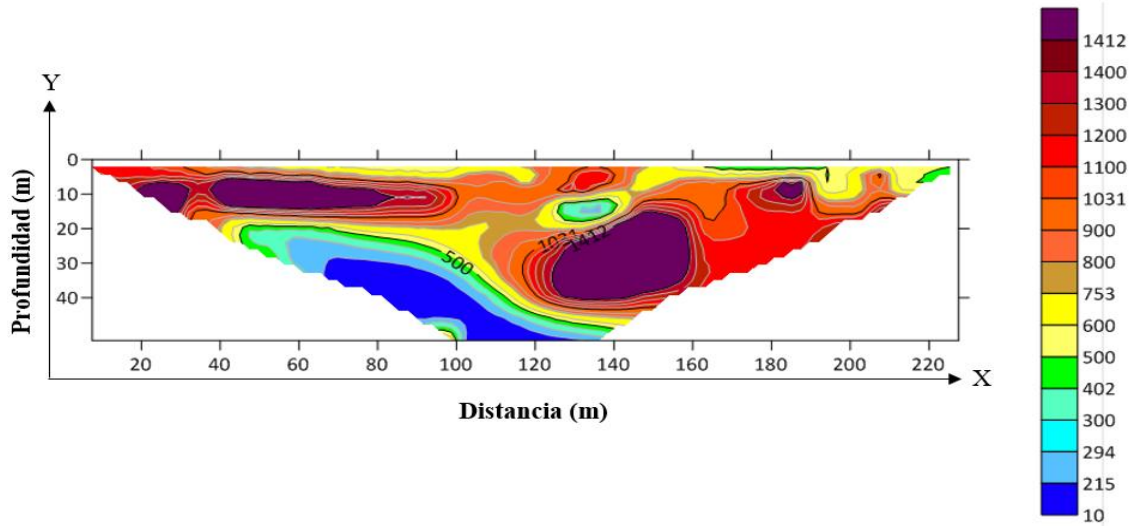
Elaborado por: Autor






Cuarta línea

La cuarta línea se realizó diagonal dentro del área de estudio, de esta resultó la tomografía eléctrica (Figura 27), con una configuración Dipolo-Dipolo y separación entre electrodos de 5 m cada una. Se obtuvieron los siguientes resultados: se observan resistividades eléctricas que varían de 10 ohm.m a 1412 ohm.m. En el tramo de 60 a 130 m a una profundidad desde 25 a 52 m se aprecian valores de resistividad entre 10 a 100 ohm.m en la gama de color azul, correspondientes a zonas con alta permeabilidad hasta depósitos con saturación moderada a baja. De 300 a 753 ohm.m con gamas de colores verde y amarillo que corresponden a depósitos de caída (ceniza, arenisca, lapilli, pómez, caliza) que son zonas discontinuas y depósitos de rocas volcánicas (andesitas, fracturadas y/o

meteorizadas). Mientras que las predominantes son las resistividades que varían de 1031 a 1412 ohm.m con gama de colores rojo a morado, valores propios de rocas volcánicas.

Figura 27. Estratigrafía 2D Cuarta Línea



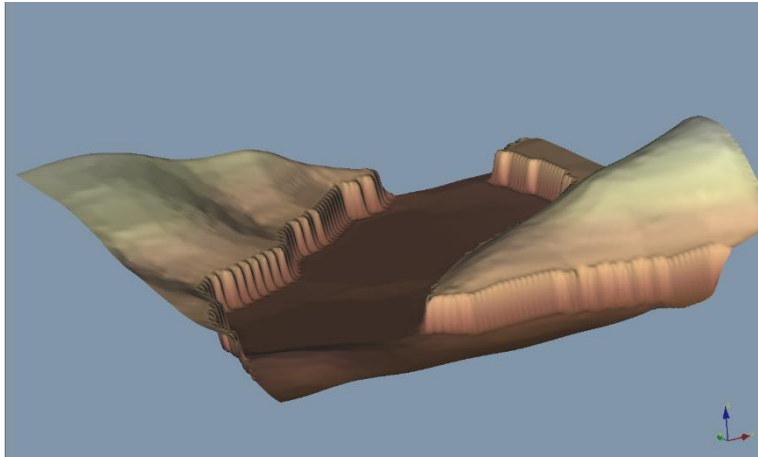
LEYENDA	
	Rocas volcánicas
	Rocas volcánicas (andesitas fracturadas y/o meteorizadas)
	Depósitos piroclásticos de caída (ceniza, arenisca, pómez)
	Depósitos con saturación moderada a baja
	Depósitos con saturación máxima

Elaborado por: Autor

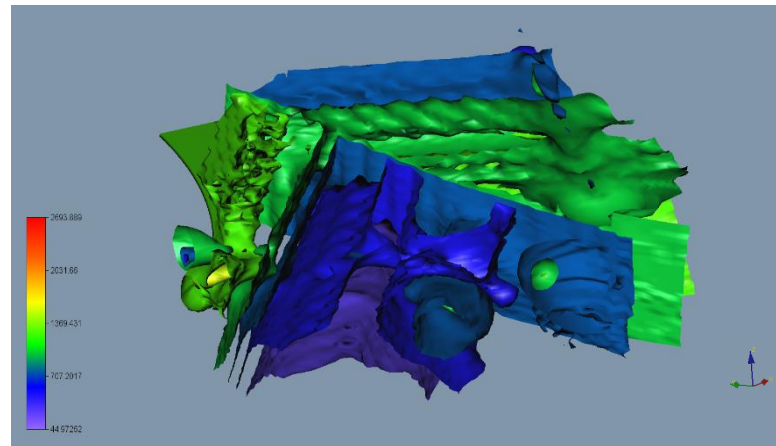
5.1.3. Reconstrucción y análisis del modelo estratigráfico en 3D

Figura 28. Reconstrucción del modelo estratigráfico del lahar en 3D

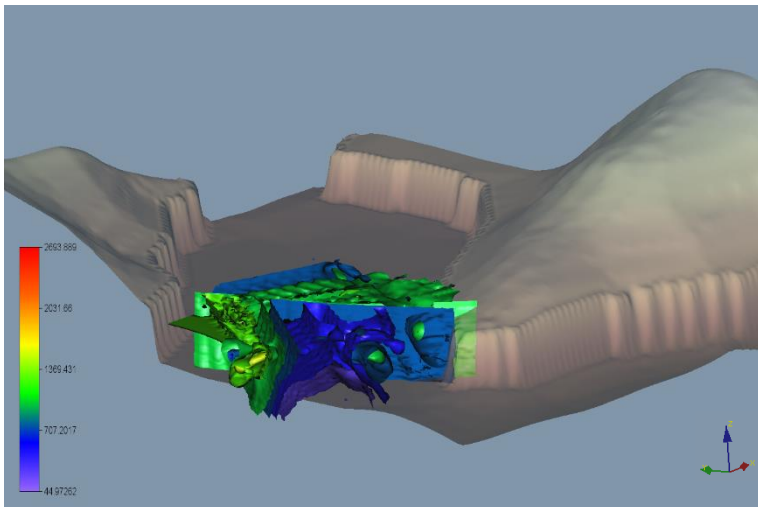
a) DEM del área de estudio antes del lahar



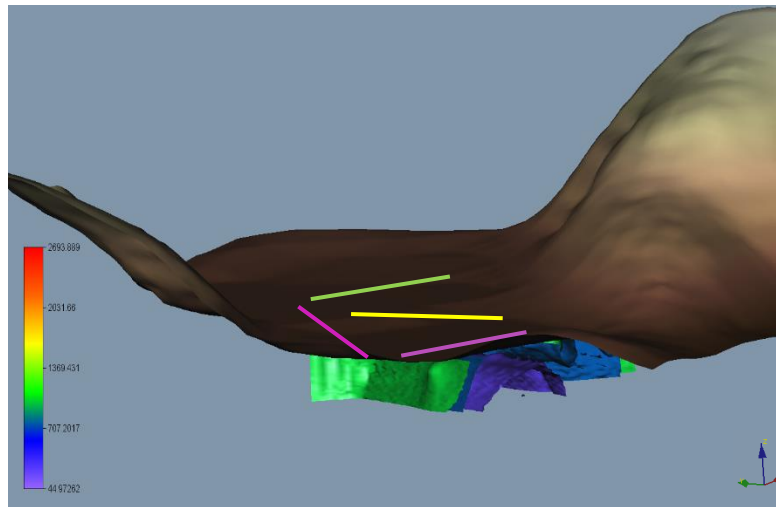
b) Modelo estratigráfico en 3D del lahar



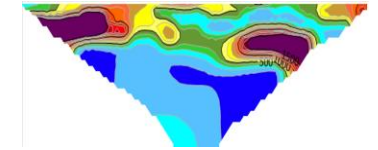
c) DEM antes del lahar con el modelo estratigráfico 3D



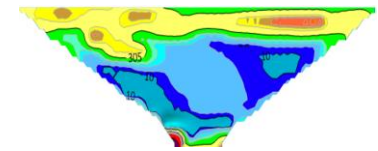
d) DEM actual del área de estudio con el modelo estratigráfico 3D



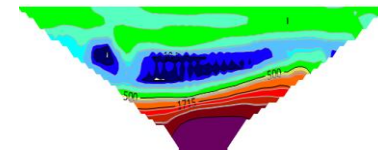
Línea 1



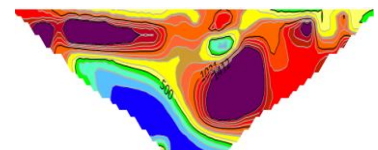
Línea 2



Línea 3



Línea 4



Elaborado por: Autor

La Figura 28 muestra los resultados del proceso de reconstrucción propuesto del depósito lahárico. Donde la Figura (a) muestra el DEM antes de que pasara el lahar por el área de estudio.

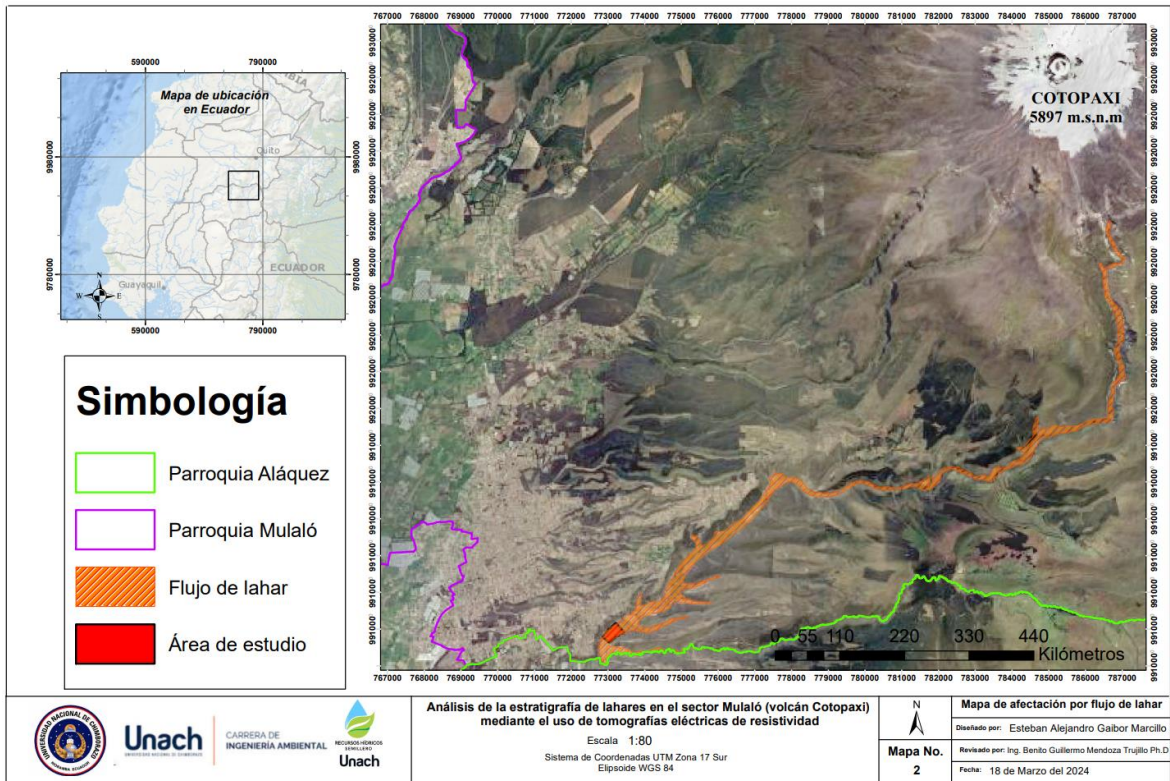
La Figura (b) muestra el resultado de aplicar la modelación en 3D a las 4 tomografías en el que se presenta resistividades entre 44 ohm.m hasta 150 ohm.m, esquematizando los depósitos de saturación máxima de color violeta en la parte inferior del modelo, probablemente propios de una cámara de recarga hídrica por debajo del lahar y que se recarga desde el río Aláquez. Existe una predominancia de los colores verde y amarillo con resistividades desde 707 ohm.m hasta 1369 ohm.m, propios de depósitos piroclásticos de caída constituidos principalmente de ceniza, arenisca, arcilla y pómez surgidos por antiguas erupciones del volcán Cotopaxi y que fueron arrastrados a través del lahar. Y las resistividades entre 2031 ohm.m a 2693 ohm.m de colores naranja a rojo que representan las rocas volcánicas depositadas a través del paso del lahar por el área de estudio.

La Figura (c) se muestra el DEM antes del paso del lahar con el modelado 3D, representando el lugar donde el lahar se depositó en el área de estudio.

La Figura (d) muestra el DEM actual del área de estudio y por debajo de este una vista del depósito lahárico, en la superficie se esquematiza la localización de las 4 líneas tomográficas. En la parte derecha a la figura se representa cada una de las líneas tomográficas con sus respectivos colores.

5.2. Evaluación de riesgo por lahares mediante interpretación de volúmenes de masa

Figura 29. Mapa de riesgo por flujo de lahar



Elaborado por: Autor

Primera Línea

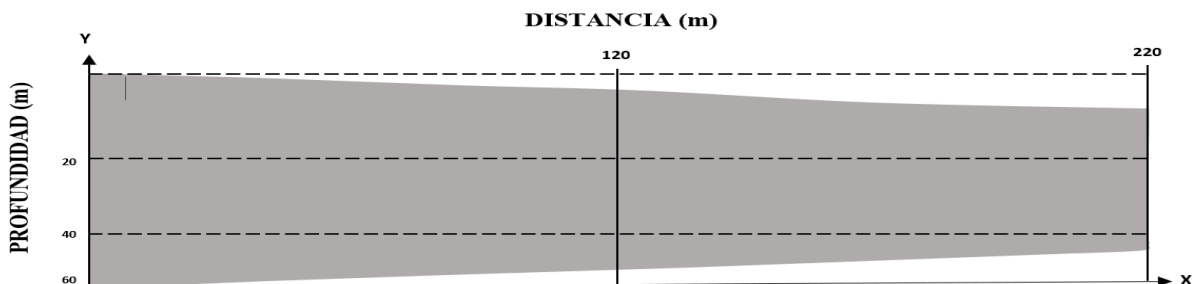
En la primera línea con un área de 1010 m^2 , profundidad de 60 m y una distancia de 220 m presenta un volumen de 308052 m^3 de material lahárnico depositado (Tabla 8).

Tabla 8. Dimensiones de la Primera Línea

Área (m^2)	1010
Profundidad (m)	60
Distancia (m)	120
Volumen (m^3)	308052

Elaborado por: Autor

Figura 30. Esquema del volumen lahárnico de la Primera Línea



Elaborado por: Autor

Segunda Línea

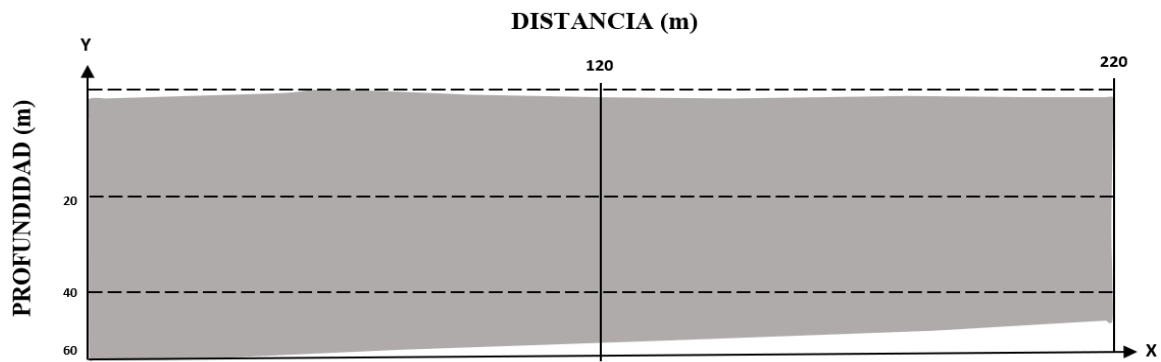
En la segunda línea con un área de 1131 m², profundidad de 60 m y una distancia de 220 m presenta un volumen de 336703 m³ de material lahárico depositado (Tabla 9).

Tabla 9. Dimensiones de la Segunda Línea

Área (m ²)	1131
Profundidad (m)	30
Distancia (m)	120
Volumen (m³)	336703

Elaborado por: Autor

Figura 31. Esquema del volumen lahárico de la Segunda Línea



Elaborado por: Autor

Tercera Línea

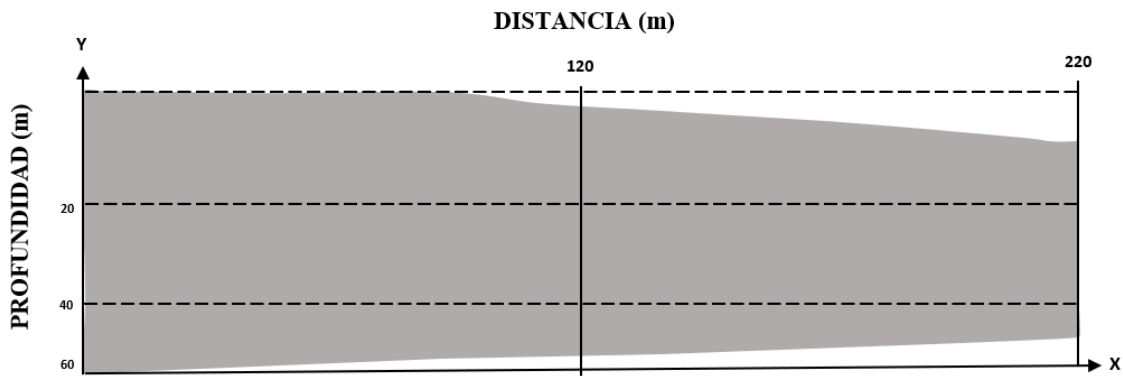
En la tercera línea con un área de 1160 m², profundidad de 60 m y una distancia de 220 m presenta un volumen de 359127 m³ de material lahárico depositado (Tabla 10).

Tabla 10. Dimensiones de la Tercera Línea

Área (m ²)	1150
Profundidad (m)	40
Distancia (m)	120
Volumen (m³)	359127

Elaborado por: Autor

Figura 32. Esquema de volumen lahárico de la Tercera Línea



Elaborado por: Autor

Cuarta Línea

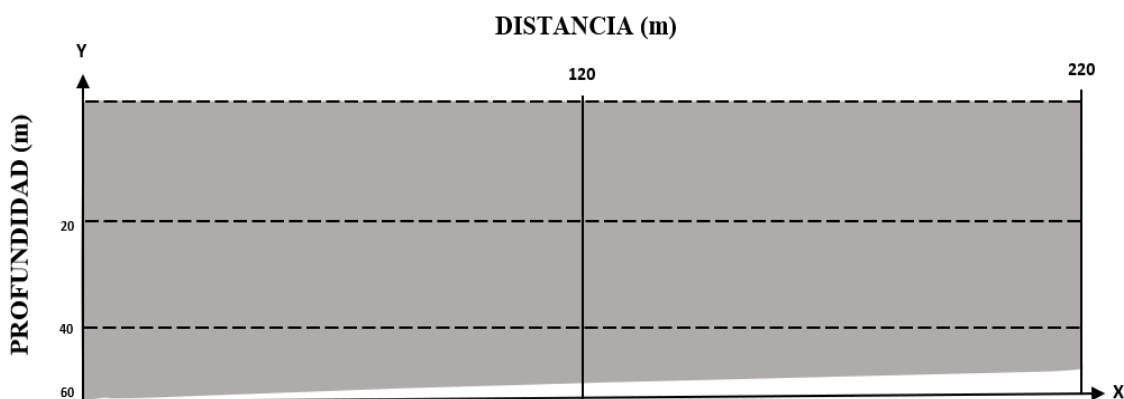
En la cuarta línea con un área de 1222 m², profundidad de 60 m y una distancia de 220 m presenta un volumen de 370423 m³ de material lahárico depositado (Tabla 11).

Tabla 11. Dimensiones de la Cuarta Línea

Área (m ²)	1222
Profundidad (m)	40
Distancia (m)	120
Volumen (m³)	370423

Elaborado por: Autor

Figura 33. Esquema del volumen lahárico de la Cuarta Línea



Elaborado por: Autor

La Figura 29 representa el mapa de riesgo de lahar por el valle del río Aláquez y la ubicación del área de estudio que sería totalmente afectado en caso de que volviera a ocurrir una hipotética erupción del volcán Cotopaxi tipo 1877. La Primera y Segunda línea se encuentran cercanas al río Aláquez, y sus volúmenes son relativamente menores con valores de 308052 m³ (Figura 30) y 336703 m³ (Figura 31). Mientras que la Tercera y Cuarta línea que se encuentran más alejadas del río, los volúmenes del depósito lahárico son de 359127 m³ (Figura 32) y 370423 m³ (Figura 33).

6. CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Mediante el uso de tomografías eléctricas se logró localizar el depósito lahárico, un evento de interés porque es consistente con las crónicas de la época. A través de la interpretación de valores de resistividad que varían entre 44 hasta valores superiores a 1500 ohm.m, se identificó los estratos y los materiales que conforman el lahar. Además, con la reconstrucción 3D que permitió esquematizar el DEM del área de estudio antes del paso del lahar hasta el depósito después del evento, visualizando su estratigrafía actual.
- El lahar que pasó por el valle del río Aláquez representa una amenaza, ya que probablemente puede volver a producirse una erupción comparable a la 1877. A lo largo de las orillas del río Aláquez se localizan diversos asentamientos, sobre todo florícolas que utilizan el río como una fuente hídrica. Sin embargo, el río es el mejor medio por el que se podrían transportar grandes volúmenes de lahar. En esta investigación en un rango de 30 a 60 metros de profundidad se ha logrado calcular un promedio de 343576 m³ de depósito lahárico. Al final de la investigación se espera que los resultados sean un aporte práctico que puedan ser utilizados para la calibración en la creación de autómatas celulares bajo el proyecto “DISCURRI-12: Design and Improvement of Simulations By Cellular Automata Units for Rheological Risks Investigation”

6.2. Recomendaciones

- Continuar con el proceso de investigación de tomografías eléctricas de lahares en otros drenajes del volcán Cotopaxi, hacerlo en los drenajes del Norte y Oriente. Hacerlo también con los volcanes más activos del Ecuador.
- Intercambiar información sobre lahares con diferentes universidades a nivel local, nacional y tal vez internacional. Si no fuera posible esto, hacerlo directamente con el Instituto Geofísico de Ecuador.

7. REFERENCIAS

- Alarcón, S., & Basantes, K. (2022). Determinación de zonas urbanas vulnerables a inundaciones causadas por las principales quebradas de Guano empleando distintos modelos hidrológicos e hidráulicos. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Almeida, S., Sierra, D., & Andrade, D. (2017). Definición, Lahares primarios y secundarios, tipo de flujo, comportamiento, afectación y monitoreo de la amenaza. Instituto Geofísico-Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Bablon, M., Quidelleur, X., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Lahitte, P., Liorzou, C., ... & Hidalgo, S. (2018). Eruptive chronology of Tungurahua volcano (Ecuador) revisited based on new K-Ar ages and geomorphological reconstructions. *Journal of*

- Volcanology and Geothermal Research, 357, 378-398. Butler, J. (2005). Hydrogeological methods for estimation of spatial variations in hydraulic conductivity. *Hydrogeophysics*. 23-58.
- Carrasco, P. (2011). Mejora de técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante la innovación espacial. Universidad de Salamanca.
- Carrillo, J. (2015). Estudio numérico de la delimitación de zonas de potencial riesgo mediante modelación bidimensional en el flanco sur del volcán Cotopaxi. CIERHI-EPN.
- Cáceres, B. (2015). Evolución de los glaciares del Cotopaxi entre 1956-2015. Quito.
- Cáceres, B., Ramírez, J., Francou, B., Eissen, J.-P., Jean-Denis Taupin, E. J., Ngerechts, L., Maisincho, L., Barba, D., Cadier, E., Bucher, R., Peñafiel, A., Samaniego, P., & Mothes, P. (2008). DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DEL CASQUETE DE HIELO DEL VOLCAN COTOPAXI.
- Catelan, P., Chidichimo, F., Gregorio, S. Di, & Lupiano, V. (2022). Large-scale impacts due to 1877-like catastrophic lahars from Cotopaxi Volcano by a Cellular Automata Model : Excerpts from LLUNPIY Simulations Impactos de gran escala debidos a lahares catastróficos del Volcán Cotopaxi según un Modelo de Autómatas Celula. CIERHI Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos. (2017). Simulación numérica del flujo de lahares primarios hasta los tramos de implantación de las centrales hidroeléctricas San Francisco y Manduriacu. CELEC E.P.-EPN. Quito.
- CMPLab. (2021). Tomografía Eléctrica: fundamentos y aplicaciones. Centro Universitario de Mérida, 1-4.
- Coussot, P. (2017). Mudflow rheology and dynamics. In *Mudflow Rheology and Dynamics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203746349>
- Coussot, P., & Meunier, M. (1995). Recognition, classification and mechanical description of debris flow. *Earth-Science*.
- Dietrich, S. (2010). La infiltración de agua en el suelo: Su caracterización mediante tomografía eléctrica. Instituto de Hidrología de Llanuras, 6.
- Franco, O., & Silva, J. (2017). Determinación preliminar de la amenaza por flujo de lodo provenientes de la quebrada Cuscungo y del río Pasto en la universidad de Nariño sede Torobajo mediante modelamientos numéricos y analíticos. In *Вестник Росздрава*. Universidad de Nariño.
- Frimberger, T., Andrade, S. D., Weber, S., & Krautblatter, M. (2021). Modelling future lahars controlled by different volcanic eruption scenarios at Cotopaxi (Ecuador) calibrated with the massively destructive 1877 lahar. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(3), 680–700. <https://doi.org/10.1002/esp.5056>
- Gallardo, E. (2017). Metodología de la investigación. Universidad Continental. <https://www.continental.edu.pe/>
- Griem, S. (2016). Apuntes Geología. From Métodos de exploración y prospección. <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/070-electrico-resistividad-configuracion-electrodos.htm>.
- Guerrero, A., Criollo, R., Córdoba, G., & Rodríguez, D. (2019). A Modeling Approach for Lahar Hazard Assessment: the Case of Tamasagra Sector in the City of Pasto, Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, 15(30), 7–31.

- <https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.30.1>
- Hernández, R. (2017). Análisis del último periodo eruptivo del volcán Tungurahua y el impacto en las actividades humanas en las zonas de incidencia del cantón Penipe provincia de Chimborazo.
- Horan, J. E., & Meinhold, S. S. (2022). Living with hazards: Prediction uncertainty and personal protective behavior at frequently and infrequently erupting Volcanoes—Tungurahua and Cotopaxi, Ecuador. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 79, 103168. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2022.103168>
- Instituto Geofísico IG-EPN. (2015). Informe especial del volcán Cotopaxi N°02. IG-EPN. Quito.
- Jordan, E., Ungerechts, L., Cáceres, B., Peñafiel, A., & Francou, B. (2005). Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 6–961. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.949>
- Kaymaz, I. (2005). Application of kriging method to structural reliability problems. *Structural Safety*, 27(2), 133–151. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2004.09.001>
- Lupiano, V., Machado, G., & Gregorio, S. Di. (2018). Revisiting the 1877 cataclysmic lahars of cotopaxi volcano by a cellular automata model and implications for future events. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3207677.3278665>
- Machado, G., Lupiano, V., Crisci, G. M., & Di Gregorio, S. (2015). LLUNPIY preliminary extension for simulating primary lahars application to the 1877 cataclysmic event of Cotopaxi volcano. *SIMULTECH 2015 - 5th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Proceedings*, 367–376. <https://doi.org/10.5220/0005542903670376>
- Masabanda, M., Morales, B., Cisneros, J., & Díaz, E. (2017). Obra De Control Para etener El Flujo De Los Lahares Del Volcán Cotopaxi Que Confluyen Al Río Pita En El Sector La Caldera . *Geoespacial*, 14(1), 43–64. <https://www.connectedpapers.com/main/3c1d7cdfa656d6af645cb8e435c9ca212600ac9b/OBRA-DE-CONTROL-PARA-RETENER-EL-FLUJO-DE-LOS-LAHARES-DEL-VOLCÁNCOTOPAXI-QUE-CONFLUYEN-AL-RÍO-PITA-EN-EL-SECTOR-LA-CALDERA./grap>
- Mendoza, B., Tenelema, V., Procel, S., & Manciat, C. (2018). Reconstrucción estratigráfica para determinar el potencial hidrogeológico en Guaruañagpamba-Punín (EC) IDEA. *Ciencias, Medio Ambiente y Biodiversidad*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Molina, J. (2022). *ESTRATIGRAFÍA Y TIEMPO GEOLÓGICO: Aspectos fundamentales*. Universidad de Jaén, 10.
- Montalvo, L., & Salazar, D. (2023). Simulación de inundaciones utilizando geotecnologías para gestionar el uso y ocupación del suelo, en la quebrada de Cunduana cantón Riobamba-Chimborazo. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Mothes, P. A., & Vallance, J. W. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador: Highlights from Stratigraphy and Observational Records and Related Downstream Hazards. *Volcanic Hazards, Risks and Disasters*, 141–168.

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00006-X>
- Muñoz, M. (2016). Tomografía Eléctrica, 38.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- Muñoz Murcillo, J. L., Gentili, J. O., & Bustos Cara, R. (2020). Uso agrícola del suelo y demanda de agua para riego en la cuenca del río Vices (Ecuador) durante el período 1990–2014.
- Navarro, D., Caamaño, D., & King, R. (2017). Modelación bidimensional de lahares en el Volcán Villarrica, Chile. <http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/1426>
- Observatorio del volcán Tungurahua. (2017). Síntesis semanal del estado volcán Tungurahua. IG-EPN.
- Ordóñez, J., Samaniego, P., Mothes, P., & Schilling, S. (2011). Posibles escenarios eruptivos del Cotopaxi y delimitación de potenciales zonas inundadas por lahares en el drenaje Sur. 2011(Tabla 1).
- Ordóñez, J., Samaniego, P., Mothes, P., & Schilling, S. (2013). Las potenciales zonas de inundación por lahares en el Volcán Cotopaxi. In Instituto Geofísico-Escuela Politécnica Nacional (Issue 1).
- Pistolesi, M., Cioni, R., Rosi, M., Cashman, K. V., Rossotti, A., & Aguilera, E. (2013). Evidence for lahar-triggering mechanisms in complex stratigraphic sequences: The post-twelfth century eruptive activity of Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 75(3), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0698-1>
- Pistolesi, M., Rosi, M., Cion, R., Cashman, K. V., Rossotti, A., & Aguilera, E. (2011). Physical volcanology of the post-twelfth-century activity at Cotopaxi volcano, Ecuador: Behavior of an andesitic central volcano. *Bulletin of the Geological Society of America*, 123(5), 1193–1215. <https://doi.org/10.1130/B30301.1>
- Porres, J. (2010). Localización de aguas subterráneas para abastecimiento, mediante prospección geofísica de resistividades. Área de ingeniería del terreno. Universidad de Burgos, 13.
- Proaño Varela, J., Santander, A. B., & Espinoza Carriel, M. (2023). Lahares del volcán Cotopaxi, riesgos en la actividad turística para el cantón Rumiñahui. *Revista Conectividad*, 4(1), 13–24. <https://doi.org/10.37431/conectividad.v4i1.46>
- Rodríguez, D. M., Córdoba Guerrero, G., Delgado-Granados, H., Rodríguez Espinosa, D. M., Córdoba Guerrero, G., & Delgado-Granados, H. (2017). Evaluación probabilística del peligro por lahares en el flanco NE del Volcán Popocatepetl. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 243–260.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222017000100243&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Sánchez, V., & Mendoza, B. (2023). Estudio Hidrogeológico Del Sector “Caliata” Mediante Tomografías Eléctricas De Resistividad. Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo.
- Samaniego, P. (2004). Escenarios eruptivos en caso de una potencial erupción del volcán. Departamento de Geofísica EPN. Quito.
- Sodi, L. (1877). Relación sobre la erupción del Cotopaxi acaecida el día 26 de junio de 1877. Imprenta Nacional. Quito.

- Solana, M. (2014). Comparación de técnicas geofísicas para determinación de contaminantes en los suelos agrícolas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas.
- Solarte, I., & Vallejo, J. (2022). Análisis probabilístico de la amenaza por lahares del Volcán Galeras en la Universidad de Nariño, sede Torobajo, mediante simulación en Titan2F. In Repositorio Institucional INGEMMET. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.
- Técnicas Geofísicas SL. (2017). Estudio con Tomografía Eléctrica (II). <https://buscaraguasubterranea.com/agua-subterranea-tomografia-electrica/>
- Timirkhanov, R., Zharassov, S., & Baltabekov, N. (2022). Computer-aided calculation of the volume of soil masses using Civil 3D. *Technobius*, 2(3), 0021. <https://doi.org/10.54355/tbus/2.3.2022.0021>
- Vallance, J. W., & Iverson, R. M. (2015). Lahars and Their Deposits. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 649–664). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>
- Vera, P., Ortega, P., Casa, E., Santamaría, J., & Hidalgo, X. (2019). Modelación Numérica y Mapas de Afectación por Flujo de Lahares Primarios en el Drenaje Sur del Volcán Cotopaxi. *Revista Politécnica*, 43(1), 61–72. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n1.971>
- Weinzettel, P. (2009). Utilización de tomografías eléctricas con distintas configuraciones y espaciamentos electródicos para la caracterización de la zona no saturada. *CIMNE*, 8.
- Wolf, T. (1878). Memoria sobre el Cotopaxi y su última erupción acaecida el 26 de junio de 1877. Imprenta del Comercio. Guayaquil.
- Zúñiga, R. (2010). Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala. Universidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Ingeniería, 6.

8. ANEXOS

Tabla 12. Coordenadas Primera Línea

N°	x	y	z
1	773063	9908626	3045
2	773059	9908629	3045
3	773055	9908632	3045
4	773049	9908636	3045
5	773047	9908639	3045
6	773042	9908643	3042
7	773039	9908644	3042
8	773036	9908648	3042
9	773032	9908651	3042
10	773027	9908654	3042
11	773020	9908657	3042
12	773018	9908661	3042
13	773015	9908662	3042
14	773011	9908667	3042
15	773008	9908670	3042
16	773007	9908669	3042

17	773001	9908671	3042
18	772996	9908677	3042
19	772993	9908681	3042
20	772988	9908681	3042
21	772983	9908687	3042
22	772988	9908689	3042
23	772975	9908692	3042
24	772972	9908694	3042
25	772966	9908697	3041
26	772969	9908700	3041
27	772962	9908703	3041
28	772957	9908705	3041
29	772955	9908709	3041
30	772951	9908713	3041
31	772946	9908714	3040
32	772943	9908717	3040
33	772938	9908719	3040
34	772935	9908722	3040
35	772930	9908727	3040
36	772926	9908732	3040
37	772922	9908733	3040
38	772920	9908736	3040
39	772915	9908740	3040
40	772912	9908743	3039
41	772906	9908746	3039
42	772904	9908749	3039
43	772899	9908753	3039
44	772896	9908755	3040
45	772893	9908757	3041
46	772887	9908760	3045
47	772883	9908762	3048
48	772878	9908764	3059
49	772675	9908767	3059

Tabla 13. Coordenadas Segunda Línea

N°	x	y	z
1	773100	9908993	3045
2	773095	9908991	3045
3	773092	9908987	3045
4	773089	9908983	3045
5	773086	9908980	3045
6	773083	9908976	3042
7	773079	9908973	3042
8	773075	9908969	3042
9	773072	9908966	3042
10	773067	9908962	3042
11	773063	9908958	3042

12	773060	9908955	3042
13	773055	9908950	3042
14	773051	9908947	3042
15	773048	9908944	3042
16	773045	9908942	3042
17	773041	9908939	3042
18	773036	9908935	3042
19	773033	9908932	3042
20	773028	9908929	3042
21	773026	9908925	3042
22	773021	9908922	3042
23	773018	9908920	3042
24	773014	9908916	3042
25	773012	9908915	3041
26	773010	9908913	3041
27	773006	9908910	3041
28	773003	9908906	3041
29	772999	9908902	3041
30	772996	9908899	3041
31	772992	9908895	3041
32	772989	9908891	3040
33	772986	9908887	3040
34	772983	9908884	3040
35	772979	9908880	3040
36	772975	9908877	3040
37	772972	9908873	3040
38	772968	9908870	3040
39	772966	9908867	3040
40	772963	9908863	3040
41	772960	9908859	3039
42	772956	9908855	3039
43	772952	9908852	3039
44	772948	9908848	3039
45	772944	9908844	3040
46	772939	9908839	3041
47	772934	9908834	3045
48	772931	9908830	3048
49	772928	9908825	3059

Tabla 14. Coordenadas Tercera Línea

N°	x	y	z
1	773340	9908869	3061
2	773347	9908867	3058
3	773345	9908872	3058
4	773341	9908877	3058
5	773338	9908880	3058
6	773336	9908884	3057
7	773332	9908888	3058
8	773329	9908891	3057

9	773326	9908893	3057
10	773322	9908901	3057
11	773321	9908904	3057
12	773317	9908908	3057
13	773313	9908912	3057
14	773310	9908915	3057
15	773307	9908919	3058
16	773303	9908922	3058
17	773302	9908928	3058
18	773298	9908931	3057
19	773294	9908935	3058
20	773291	9908939	3057
21	773288	9908942	3057
22	773284	9908947	3057
23	773282	9908950	3057
24	773278	9908954	3057
25	773274	9908956	3057
26	773272	9908960	3057
27	773270	9908964	3057
28	773267	9908964	3058
29	773262	9908971	3058
30	773260	9908974	3058
31	773256	9906977	3058
32	773253	9908982	3058
33	773247	9908988	3058
34	773245	9908993	3058
35	773241	9908995	3058
36	773237	9908997	3059
37	773232	9909001	3059
38	773228	9909005	3058
39	773228	9909010	3057
40	773224	9909016	3057
41	773221	9909018	3057
42	773218	9909022	3056
43	773215	9909026	3056
44	773212	9909031	3056
45	773208	9909033	3056
46	773206	9909037	3055
47	773203	9909041	3054
48	773200	9909041	3054
49	773196	9909038	3054

Tabla 15. Coordenadas Cuarta Línea

N°	x	y	z
1	773120	9908708	3039

2	773122	9908713	3039
3	773123	9908717	3038
4	773125	9908722	3039
5	773125	9908727	3039
6	773127	9908733	3039
7	773129	9908737	3039
8	773131	9908741	3038
9	773133	9908747	3039
10	773135	9908749	3039
11	773138	9908754	3038
12	773141	9908758	3039
13	773142	9908763	3039
14	773144	9908769	3039
15	773144	9908773	3039
16	773145	9908777	3037
17	773147	9908783	3038
18	773148	9908788	3039
19	773149	9908793	3039
20	773149	9908797	3039
21	773149	9908803	3040
22	773149	9908810	3039
23	773152	9908813	3040
24	773153	9908818	3040
25	773152	9908821	3038
26	773155	9908823	3040
27	773156	9908829	3040
28	773157	9908832	3040
29	773159	9908838	3041
30	773161	9908842	3041
31	773163	9908847	3042
32	773164	9908851	3043
33	773166	9908856	3042
34	773168	9908861	3042
35	773169	9908866	3043
36	773171	9908870	3043
37	773173	9908875	3043
38	773174	9908880	3043
39	773175	9908884	3044
40	773178	9908889	3042
41	773178	9908894	3043
42	773181	9908898	3044
43	773182	9908903	3045
44	773184	9908908	3045
45	773186	9908912	3044
46	773188	9908917	3045
47	773188	9908922	3044
48	773188	9909927	3045
49	773190	9908933	3046