

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación geológica y geofísica del macro deslizamiento Llamacón, Central
hidroeléctrica Mazar, Paute – Ecuador.

INGE-2436

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Geología

Presentado por:

Andrei Patricio Zambrano Sotomayor

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a:

Toda mi familia, y en especial para las 2 mamás que me dio la vida Vanessa Sotomayor y Cecilia Espinoza, que gracias a su amor incondicional y constante apoyo en cada paso de mi vida, me enseñaron que con perseverancia y constancia todos nuestros objetivos y sueños se pueden lograr, siendo las personas que más admiro en el mundo y un ejemplo de lo que aspiro a ser y en lo que deseo convertirme.

También se lo dedico a todas aquellas personas que han sido parte de mi vida durante este camino, que me han ayudado a mejorar como persona, me brindaron su compañía y gracias por creer en mis sueños incluso cuando yo dudaba de ellos.

“Que tan grandes serían tus sueños si supieras que no puedes fallar”.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mis padres Vanessa Sotomayor, Andrei Zambrano, a Stefany Bustamante, mis hermanos y a toda mi familia, cuyo apoyo absoluto y cariño ha sido el motor que me ha impulsado a lo largo de mi carrera universitaria. A mi tutora de tesis M.Sc Joselyne Solórzano, quién ha sido mi mentora y se ha comprometido con este proyecto para culminarlo con éxito.

Agradezco también al Ph.D. Carrión, Ph.D. Morante, Ph.D. Mulas y a todos los profesores de geología por brindarme su motivación y ser parte fundamental de mi formación. Al Ing. Brayán Pinto, M.Sc Robert Brito y a todos los que forman parte de CIPAT porque me han brindado herramientas necesarias para desenvolverme en el mundo laboral. A la M.Sc Jéssica Robles y a CELEC por su apoyo invaluable.

Por último, mi más profundo agradecimiento a las personas que son parte esencial de mi vida Astrid Ramírez, Ariana Vargas, Nicole Cueva, Erick León, Adrián Calle y Eudes Ramos. Gracias por mejorar mis días.

Declaración Expresa

Yo Andrei Patricio Zambrano Sotomayor acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 21 de septiembre del 2024.

 Firmado electrónicamente por:
**ANDREI PATRICIO
ZAMBRANO
SOTOMAYOR**

Andrei Patricio Zambrano Sotomayor

Evaluadores



firmado electrónicamente por:
JOSELYNE BARBARA
SOLORZANO CHAUCA

Joselyne Bárbara Solórzano Chauca

Profesor de Materia



firmado electrónicamente por:
JOSELYNE BARBARA
SOLORZANO CHAUCA

Joselyne Bárbara Solórzano Chauca

Tutor de proyecto

Resumen

El macro deslizamiento Llamacón es una zona inestable de 123 ha, identificada por personal de INECEL desde el año 1984 como de alto riesgo a deslizarse. Sus empinadas pendientes y alta pluviosidad han generado las condiciones de inestabilidad en el sector. El objetivo de este trabajo es evaluar el macro deslizamiento, mediante un enfoque geológico y geofísico, para el planteamiento de estrategias de mitigación. La metodología empleada consistió en: i) Recopilación de información, ii) Caracterización geológica y geofísica (ensayos geoelectricos y de sismica de refracción), iii) Cálculo del factor de seguridad (FS). El estudio permitió identificar que los valores de menor resistividad ($1-500 \Omega \cdot m$) se encuentran en la parte baja, debido a un mayor grado de saturación con un espesor de material coluvial mayor a 40 metros. Mediante el cálculo del FS en condiciones estáticas y pseudoestáticas se obtuvieron rangos entre 0.89-1.19 y 0.64-0.86 respectivamente, determinando que los valores se encuentran por debajo de los rangos mínimos establecidos por la Norma Ecuatoriana para la Construcción (NEC). Se propone la construcción de pozos de agua, canaletas y drenes, con el objetivo de disminuir el riesgo en la zona, además se recomienda reforestar para aumentar la estabilización del suelo a largo plazo.

Palabras Clave: Tomografía de Resistividad Eléctricas (TRE), Factor de seguridad, Mitigación, Inestabilidad y Riesgo.

Abstract

The Llamacón landslide is an unstable area of 123 ha, identified by INECEL professionals since 1984 as a high risk area for landslides. Its steep slopes and high precipitation have generated instability conditions in the sector. The objective of this work is to evaluate the macro landslide, through a geological and geophysical approach, in order to propose mitigation strategies. The methodology used consisted of: i) Information gathering, ii) Geological and geophysical characterization (geoelectric and refraction seismic tests), iii) Calculation of the safety factor (SF). The study identified that the lowest resistivity values (1-500 Ω -m) are found in the lower part, due to a higher degree of saturation with a thickness of colluvial material greater than 40 meters. By calculating the FS under static and pseudo-static conditions, ranges between 0.89-1.19 and 0.64-0.86 were obtained, respectively, determining that the values are below the minimum ranges established by the Ecuadorian Construction Standard (NEC). The construction of water wells, gutters and drains is proposed to reduce the risk in the area, and reforestation is recommended to increase soil stabilization in the long term.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography (ERT), Safety Factor, Mitigation, Instability, Risk.

Índice general

Evaluadores	4
Resumen	1
<i>Abstract</i>	2
Índice general	3
Abreviaturas	5
Simbología	6
Índice de figuras	7
Índice de tablas	9
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del Problema	3
1.3 Justificación del Problema	4
1.4 Zona de Estudio	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos	7
1.6 Antecedentes	7
1.7 Marco teórico	8
1.7.1 Depósitos Coluviales	8
1.7.2 Depósitos Aluviales	9
1.7.3 Talud	9
1.7.4 Inestabilidad	10
1.7.5 Movimientos de ladera	10
1.7.6 Causas de los deslizamientos	13
1.7.7 Susceptibilidad	14
1.7.8 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos	14

1.7.9	Prospección Geofísica	15
1.7.10	Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)	15
1.7.11	Arreglo Gradiente	16
1.7.12	Escarpe	17
1.7.13	Sísmica de refracción	18
Capítulo 2	20
2.1	Marco Geológico	21
2.1.1	Serie Paute	21
2.2	Geomorfología	22
Capítulo 3	24
3.1	Materiales	25
3.2	Metodología	27
3.2.1	Fase I: Búsqueda de información	28
3.2.2	Fase II: Caracterización Geológica	30
3.2.3	Fase III: Cálculo de Factor de Seguridad	38
Capítulo 4	41
4.1	Resultados	42
4.1.1	Descripción Litológica	42
4.1.2	Interpretación Geofísica	43
4.1.3	SLIDE	55
4.1.4	Planteamiento de estrategias de mitigación	64
4.2	Discusión	67
Capítulo 5	70
5.1	Conclusiones	71
5.2	Recomendaciones	72
6.	Bibliografía	73
7.	Anexos	77

Abreviaturas

CELEC	Corporación Eléctrica del Ecuador
CGM	Consortio Gerencia Mazar
CIPAT	Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra
FS	Factor de Seguridad
INECEL	Instituto Ecuatoriano de Electrificación
MS	Mojones Topográficos
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
SIG	Sistemas de Información Geográficos
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica

Simbología

cm^3	Centímetros cúbicos
$^\circ$	Grados
g	Gramos
KN	Kilo newton
m	Metros
m^2	Metros cuadrados
Ω	Ohm

Índice de figuras

Figura 1. <i>Mapa de pendientes del macro deslizamiento Llamacón.</i>	4
Figura 2. <i>Esquema de las problemáticas, consecuencias y resultados del proyecto.</i>	5
Figura 3. <i>Mapa de ubicación del macro deslizamiento Llamacón.</i>	6
Figura 4. <i>Mojones topográficos (MS) existentes en el macro deslizamiento de Llamacón.</i>	8
Figura 5. <i>Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos.</i>	10
Figura 6. <i>Mecanismos de desprendimiento y colapso.</i>	11
Figura 7. <i>Avalancha de derrubios y de fragmentos rocosos.</i>	12
Figura 8. <i>Movimientos de flujo.</i>	13
Figura 9. <i>Arreglo gradiente para la adquisición de datos en Tomografía de Resistividad Eléctricas.</i>	17
Figura 10. <i>Escarpes que quedan como evidencia de los deslizamientos producidos luego de que el material se deslice por la pendiente.</i>	17
Figura 11. <i>Ley Snell: Rayos reflejados y refractados asociados con un rayo P incidente oblicuamente sobre una interfase.</i>	18
Figura 12. <i>Esquema básico de un perfil de sísmica de refracción.</i>	19
Figura 13. <i>Mapa Litológico de Llamacón 1:250000.</i>	22
Figura 14. <i>Flujograma de metodología aplicada al proyecto.</i>	28
Figura 15. <i>Mapa de velocidad de movimiento/desplazamiento en zonas puntuales dentro del macro deslizamiento de Llamacón.</i>	29
Figura 16. <i>Diálogo con la comuna de Llamacón.</i>	30
Figura 17. <i>Metodologías consideradas para la determinación de la litología en la zona de estudio.</i>	31
Figura 18. <i>Toma de muestras para la descripción de características litológicas.</i>	32
Figura 19. <i>Mapa de ubicación y ensayos realizados. A) Zona de estudio ubicado en la provincia del Azuay, B) Delimitación del área de estudio con respecto a la presa Mazar y, C) Ubicación de los ensayos realizados en la zona de Llamacón.</i>	33
Figura 20. <i>Configuración de TRE utilizado en este proyecto, C1-C2: Cable de resistividad multinúcleo 1 y 2 respectivamente, E: electrodo.</i>	34
Figura 21. <i>Flujograma para el procesamiento del TRE.</i>	36
Figura 22. <i>Configuración del ensayo de sísmica de refracción.</i>	37
Figura 23. <i>Flujograma para el procesamiento de los ensayos de sísmica de refracción.</i>	38

Figura 24. <i>Flujograma realizado para el procesamiento en Slide.</i>	40
Figura 25. <i>Material coluvial presente en el macro deslizamiento Llamacón</i>	42
Figura 26. <i>Rodados métricos presentes en el macro deslizamiento Llamacón</i>	42
Figura 27. <i>Afloramiento de esquisto plegado en la parte baja del macro deslizamiento Llamacón</i>	43
Figura 28. <i>Mapa de Ubicación de TRE (Parte alta).</i>	44
Figura 29. <i>TRE O1 (Parte alta).</i>	45
Figura 30. <i>TRE O4 (Parte alta).</i>	45
Figura 31. <i>TRE O5 (Parte alta).</i>	46
Figura 32. <i>Mapa de Ubicación de TRE (Parte media).</i>	47
Figura 33. <i>TRE O7 (Parte media).</i>	48
Figura 34. <i>TRE O8 (Parte media).</i>	48
Figura 35. <i>Mapa de Ubicación de las TRE (Parte baja).</i>	49
Figura 36. <i>TRE O9 (Parte baja).</i>	50
Figura 37. <i>TRE 10 (Parte baja).</i>	50
Figura 38. <i>TRE 11 (Parte baja).</i>	51
Figura 39. <i>TRE 12 (Parte baja).</i>	52
Figura 40. <i>TRE 13 (Parte baja).</i>	52
Figura 41. <i>TRE 14 (Parte baja).</i>	53
Figura 42. <i>TRE 15 (Parte baja).</i>	54
Figura 43. <i>TRE 16 (Parte baja).</i>	54
Figura 44. <i>Ensayo de Sísmica de refracción.</i>	55
Figura 45. <i>Ubicación de los perfiles realizados a lo largo del macro deslizamiento Llamacón.</i> ..	57
Figura 46. <i>Perfil 1 en condiciones estáticas.</i>	58
Figura 47. <i>Perfil 1 en condiciones pseudo estáticas.</i>	59
Figura 48. <i>Perfil 2 en condiciones estáticas.</i>	60
Figura 49. <i>Perfil 2 en condiciones pseudo estáticas.</i>	60
Figura 50. <i>Perfil 3 en condiciones estáticas.</i>	61
Figura 51. <i>Perfil 3 en condiciones pseudo estáticas.</i>	62
Figura 52. <i>Perfil 4 en condiciones estáticas.</i>	63
Figura 53. <i>Perfil 4 en condiciones pseudo estáticas.</i>	63
Figura 54. <i>Estrategias: drenaje y protección de taludes.</i>	64
Figura 55. <i>Planteamiento de estrategias de mitigación planteadas en el macro deslizamiento Llamacón.</i>	66

Figura 56. <i>Visión conceptual de reforestación</i>	66
--	----

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Criterios para determinar el grado de susceptibilidad</i>	14
Tabla 2. <i>Factor de penetración de los arreglos utilizados en tomografías de resistividad eléctricas</i>	16
Tabla 3. <i>Materiales utilizados y su funcionalidad en el proyecto</i>	25
Tabla 4. <i>Variables configuradas en el equipo Terrameter LS2</i>	35
Tabla 5. <i>Test de electrodos del equipo Terrameter LS2</i>	35
Tabla 6. <i>Valores referenciales de parámetros geomecánicos en esquistos</i>	39
Tabla 7. <i>Rango de resistividades para Llamacón</i>	56
Tabla 8. <i>Parámetros Geomecánicos de Llamacón</i>	56
Tabla 9. <i>Comparación entre el FS NEC y el FS obtenido</i>	69

Capítulo 1

1.1 Introducción

La producción energética incrementa exponencialmente y se relaciona directamente al desarrollo económico y crecimiento demográfico, lo que ha llevado a priorizar la expansión de la capacidad de producción de energía eléctrica (Oviedo-Ocaña, 2018).

La construcción de centrales hidroeléctricas se ha posicionado como uno de los principales mecanismos de producción energética, representando alrededor del 92% de la generación total en Ecuador (Ministerio de Energía y Minas, 2020). En el territorio ecuatoriano, aprovechando su riqueza hídrica y sus condiciones topográficas, se localizan diversos proyectos Hidroeléctricos considerados estratégicos para el desarrollo nacional. Dentro de estos proyectos se encuentra el complejo Hidroeléctrico Paute Integral, siendo la central Mazar una obra de vital importancia, tanto para la regulación del caudal del río Paute, como para la generación energética del país.

Uno de los principales riesgos que afectan a las hidroeléctricas son los deslizamientos, como el ocurrido en la Presa de Vajont en el año 1963, en la que un enorme deslizamiento provocó una ola que desbordó una presa causando afectaciones y materiales (Bianchizza & Frigerio, 2013).

Los deslizamientos de tierras representan peligros en zonas montañosas, debido a la diversidad de factores que los desencadenan. Estos incluyen las condiciones litológicas, geomorfológicas, tectónicas e hidrológicas (Wróbel et al., 2022). Además, las precipitaciones tienen un efecto directo en la ocurrencia de los deslizamientos de tierra (Finlay et al., 1997). Esto se debe principalmente a la disminución de la resistencia al corte de las formaciones deslizantes después de la infiltración del agua de lluvia (Jian et al., 2009; Matsukura, 1996). Las actividades antrópicas también juegan un rol importante en la intensificación de estos fenómenos, como la alteración del uso del suelo, deforestación y expansión de asentamientos (Wróbel et al., 2022).

En marzo de 1993 se suscitó uno de los más grandes de desastres naturales en el Ecuador, concretamente en las provincias de Azuay y Cañar, consecuencia del deslizamiento de masa ocurrido en el sector de la Josefina. Se produjo un deslizamiento de alrededor de 20 millones de

metros cúbicos donde centenares de personas perdieron su vida, además generó un embalse de 190 millones de metros cúbicos y 10 Km longitudinales que afectó a viviendas, vías, zonas agrícolas aledañas y la central termoeléctrica del Descanso (Domínguez, 1999; Flores, 2011).

Los deslizamientos relictos como el de la Josefina, que han ocurrido en el pasado geológico, dejan sus huellas las cuales permanecen en la zona y aunque no estén activos en la actualidad pueden afectar a los taludes tanto en la reducción de su estabilidad, alteración de las condiciones hidrogeológicas y debilitamiento estructural, lo que aumenta el riesgo de futuros deslizamientos (Blikra et al., 2002).

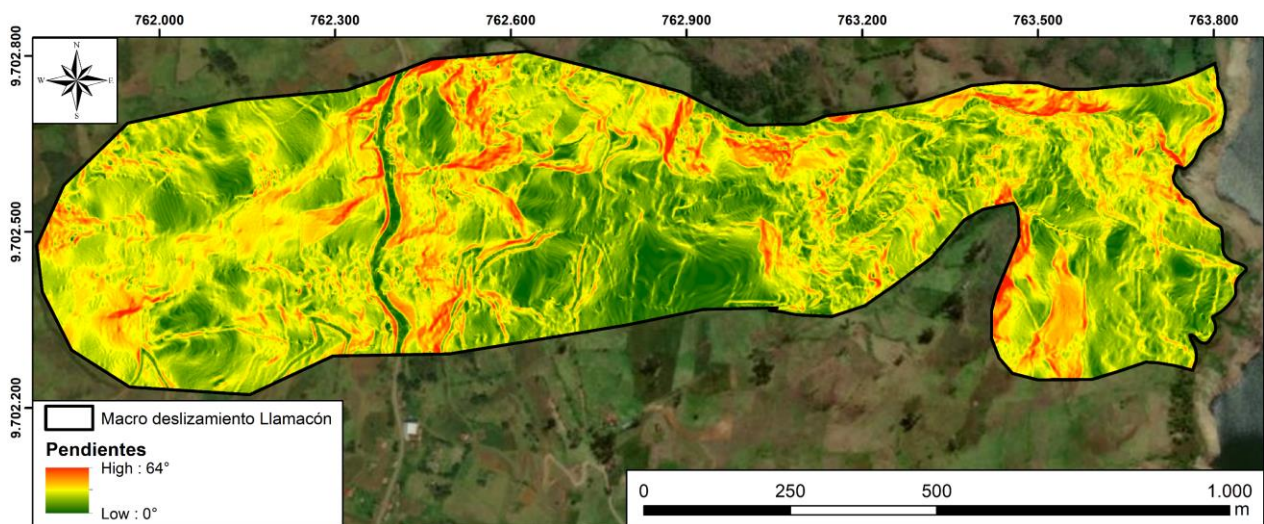
Un eventual deslizamiento de zonas inestables alrededor del valle del río Paute, como el macro deslizamiento Llamacón, representa un riesgo significativo, tanto para las comunidades locales, como para las infraestructuras cercanas, como la central hidroeléctrica Mazar. Estos deslizamientos de tierra pueden comprometer la seguridad y el funcionamiento de estas instalaciones, afectando tanto a la generación de energía, como el bienestar de las poblaciones circundantes. Por lo tanto, se han realizado esfuerzos significativos para monitorear estas zonas de inestabilidad, resultando en la catalogación del macro deslizamiento Llamacón, ubicado en la parroquia de Guarainag, como de riesgo inmediato a deslizarse (Robles & Guzmán, 2017).

1.2 Descripción del Problema

El macro deslizamiento Llamacón está conformado por un coluvial inestable, con taludes de alrededor de 45° (Figura 1) y alta pluviosidad, por lo que, estos factores han desencadenado la desestabilización del lugar. Desde el año 1984, personal técnico del Instituto Nacional de Electrificación (INECEL), ha calificado a este deslizamiento como de riesgo inmediato a deslizarse. En el 2014, personal técnico de la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC), estimó esta zona como un cuerpo inestable de 123 ha aproximadamente, debido al represamiento del Río Paute (Villacís & Granja, 2014).

Se han identificado desplazamientos de tierra en la parte inferior del macro deslizamiento Llamacón mediante el uso de 15 mojones topográficos. Estos mojones son monitoreados con el fin de clasificar las zonas en función de los milímetros de desplazamiento observados a lo largo de un año. Las clasificaciones establecidas son: alto (>1000 mm), medio (1000 mm – 500 mm) y bajo (<500 mm) (Robles & Guzmán, 2017; Villacís & Granja, 2014). La presencia de manantiales en diversas áreas del macro deslizamiento sugiere una alta saturación y permeabilidad del suelo. Además, la aparición de escarpes indica la inestabilidad del terreno.

Figura 1. Mapa de pendientes del macro deslizamiento Llamacón.



Nota. Información base adoptado de CELEC EP. Fuente: Robles & Guzmán (2017).

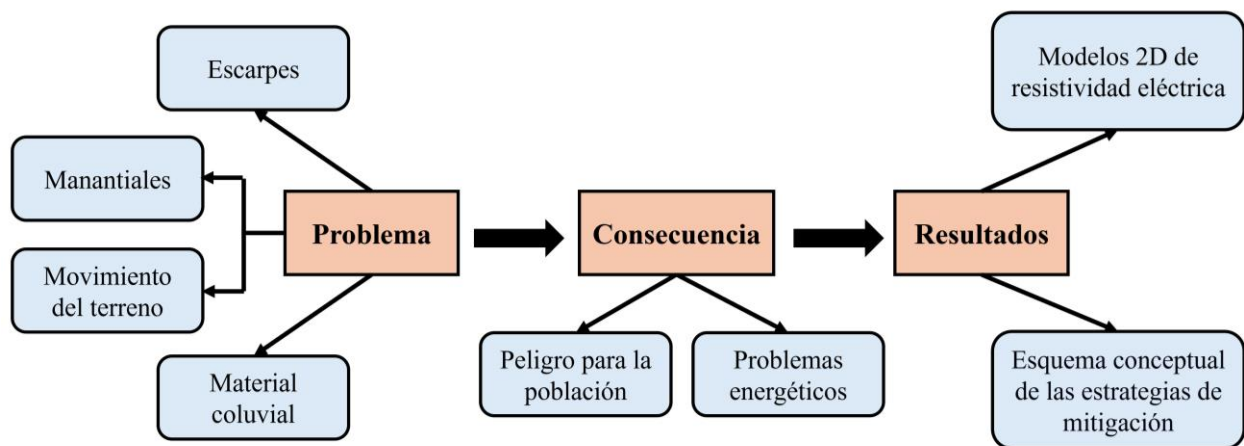
1.3 Justificación del Problema

En el macro deslizamiento Llamacón, la morfología, precipitaciones, tipo de suelos y estructuras geológicas generan las condiciones de inestabilidad, por lo que, en caso de un deslizamiento masivo, se desencadenarían inestabilidades que afectarían a la población de Llamacón y Chalacay, similar al deslizamiento de La Josefina. En aquella ocasión, la Defensa Civil Ecuatoriana informó de 35 personas fallecidas, 716 casas afectadas (el 70% de ellas completamente destruidas), 1800 hectáreas de tierra agrícola dañada y 8 puentes destruidos. Aproximadamente 7,000 personas quedaron sin hogar, una importante central hidroeléctrica

nacional estuvo en riesgo, y las principales carreteras fueron bloqueadas o inundadas por el deslizamiento de tierra, aislando hogares, pueblos y una provincia entera (Harden, 2001).

La relevancia de este trabajo de titulación radica en que en la zona de Llamacón podría ocurrir una catástrofe, con posibles efectos en cadena, ya que, de ocurrir el movimiento en masa, podría impactar la base del talud de Chalacay, ubicado en el lado opuesto y también con problemas de estabilidad. Además, la ola generada por dicho movimiento podría dañar gravemente el presa y presa Mazar, si se desplaza mucha agua, podría colapsar comprometiendo la integridad de las estructuras o los taludes aguas abajo, afectando el complejo eléctrico y a su vez a la generación energética del país, recordando que el complejo hidroeléctrico Paute Integral representa aproximadamente el 35% de la generación eléctrica de Ecuador (Figura 2).

Figura 2. Esquema de las problemáticas, consecuencias y resultados del proyecto.



1.4 Zona de Estudio

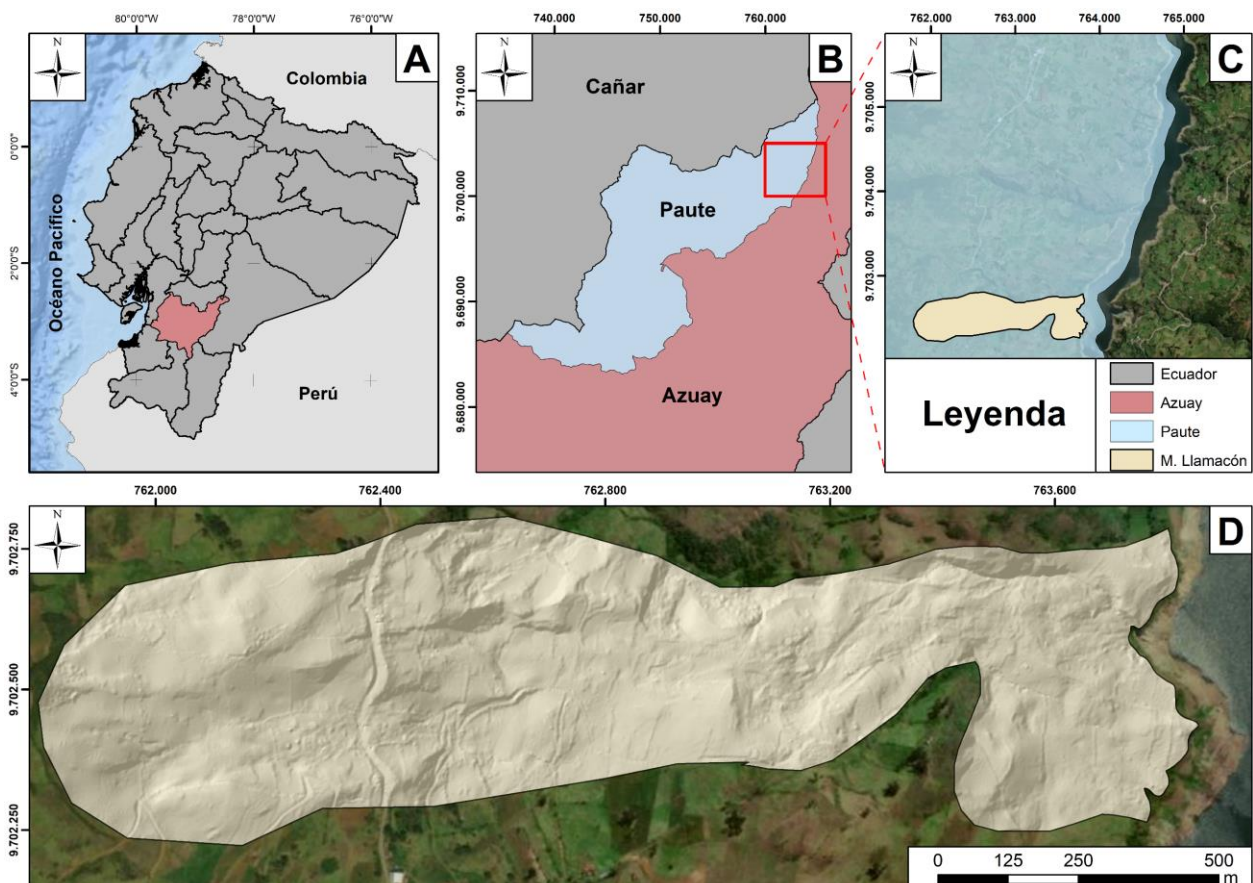
Contexto geográfico

El macro deslizamiento Llamacón se encuentra en la parroquia Guarainag, en el cantón Paute, provincia del Azuay, con coordenadas UTM: 763000 E, 9.702.550 N, a 2400 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Está situada aproximadamente a 10 km de la presa Mazar (Figura 3), frente a la quebrada de Chalacay. El área muestra evidentes movimientos en masa, representados en campo como escarpes y grietas.

Contexto socioeconómico

La comunidad de Llamacón se ubica en la parroquia de Guarainag, con una población aproximada de 864 habitantes, cuya principal actividad económica es la ganadería y la agricultura, destacándose el cultivo de maíz, papas y fréjol, entre otros (Municipio de Paute, 2019).

Figura 3. Mapa de ubicación del macro deslizamiento Llamacón.



Nota. Información base adaptado de CELEC EP. Fuente: Robles & Guzmán (2017).

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar el macro deslizamiento en la comunidad de Llamacón mediante un enfoque geológico y geofísico, para la definición de estrategias de mitigación que aseguren la sostenibilidad del sector.

1.5.2 Objetivos específicos

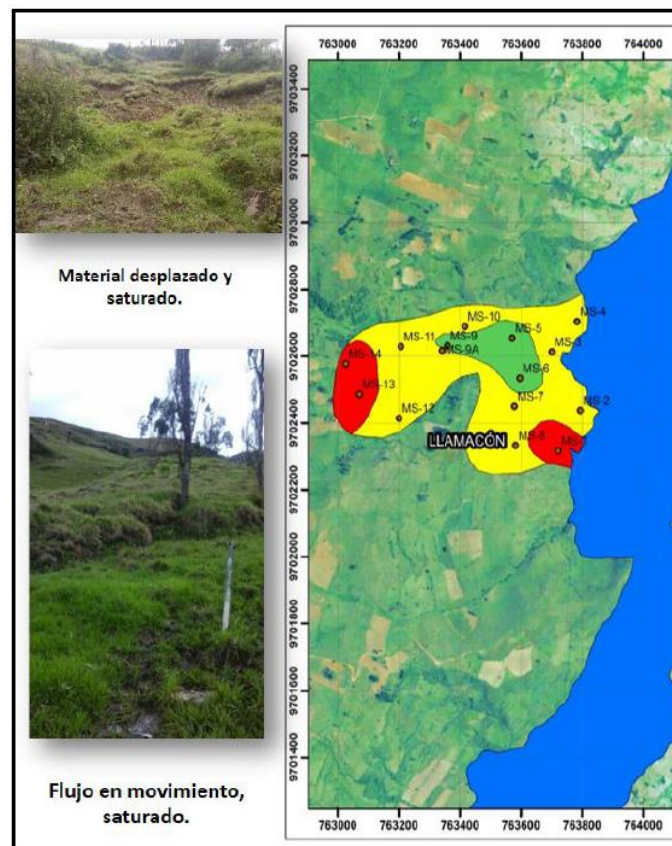
1. Realizar una inspección geológica a escala mesoscópica de la zona de estudio a través de descripciones insitu y evidencias de inestabilidad que permitan la identificación de lugares para los ensayos geofísicos.
2. Generar modelos 2D de resistividad eléctrica mediante la interpretación de ensayos geoelectricos para la caracterización de zonas de susceptibilidad.
3. Determinar zonas inestables a partir de información recolectada en campo y cálculo de factores de seguridad para la configuración de estrategias de mitigación.

1.6 Antecedentes

- En el año del 1984, personal técnico de INECEL, califican a este deslizamiento como de riesgo inmediato a deslizarse, dimensionando un área de 13.2 ha, lo que indica que Llamacón fue una zona de deslizamiento preexistente e inestable, que ya existía antes de la construcción del proyecto Mazar. El volumen de masa inestable fue estimado en 987750 metros cúbicos (Robles & Guzmán, 2017).
- En el 2007, personal del Consorcio Gerencia Mazar (CGM) dimensionan a este deslizamiento, con una superficie de 25 ha aproximadamente, y un factor de seguridad de 1.064. Según investigaciones geotécnicas llevadas a cabo por CELEC E.P. desde el 2007, se estableció que la profundidad del deslizamiento se encuentra restringida a una capa máxima de 25 metros en la intersección de las capas coluviales y de roca. Además, se señala que, dado que la zona presenta una actividad sísmica considerable, un terremoto de gran intensidad podría desencadenar un deslizamiento masivo que generaría un oleaje impactando en la presa, pero sin superar su parte superior (Villacís & Granja, 2014) .
- En el informe anual elaborado por el equipo de monitoreo de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P. - Unidad de Negocio HIDROPAUTE, se hace constar que este deslizamiento posee un área de 35 ha (Banegas & Calderón, 2012).

- En el informe del año 2014, se determinó que este cuerpo inestable tiene un área de 123 ha, aproximadamente (Villacís & Granja, 2014).
- Los Mojoneros Topográficos (MS) existentes en el macro deslizamiento de Llamacón (Figura 4), han permitido realizar zonificaciones de movimiento, sin embargo, es indispensable incrementar instrumentación (Robles & Guzmán, 2017).

Figura 4. *Mojones topográficos (MS) existentes en el macro deslizamiento de Llamacón.*



Nota. Datos tomados de Robles & Guzmán (2017).

1.7 Marco teórico

1.7.1 Depósitos Coluviales

Un coluvión es una formación superficial constituida por materiales heterogéneos de suelo y fragmentos de roca, en diferente proporción, depositado habitualmente al pie de una ladera por arrastre o por otros fenómenos asociados a la evolución de esta (meteorización y posterior caída por gravedad, incorporación de material proveniente de movimientos en masa previos, etc.).

En todos los materiales coluviales predominan fragmentos de carácter angular, poco clasificados y sin estratificación (CTN & SIGTIERRAS, 2015).

- Coluvión reciente: Se considera coluvión reciente a un coluvión que presenta grado de disección bajo y no cuenta con una vegetación pionera bien desarrollada (CTN & SIGTIERRAS, 2015).
- Coluvión antiguo: Se considera coluvión antiguo a un coluvión que presenta un cierto grado de disección (medio a alto) y sobre él aparece una vegetación pionera bien desarrollada (CTN & SIGTIERRAS, 2015).

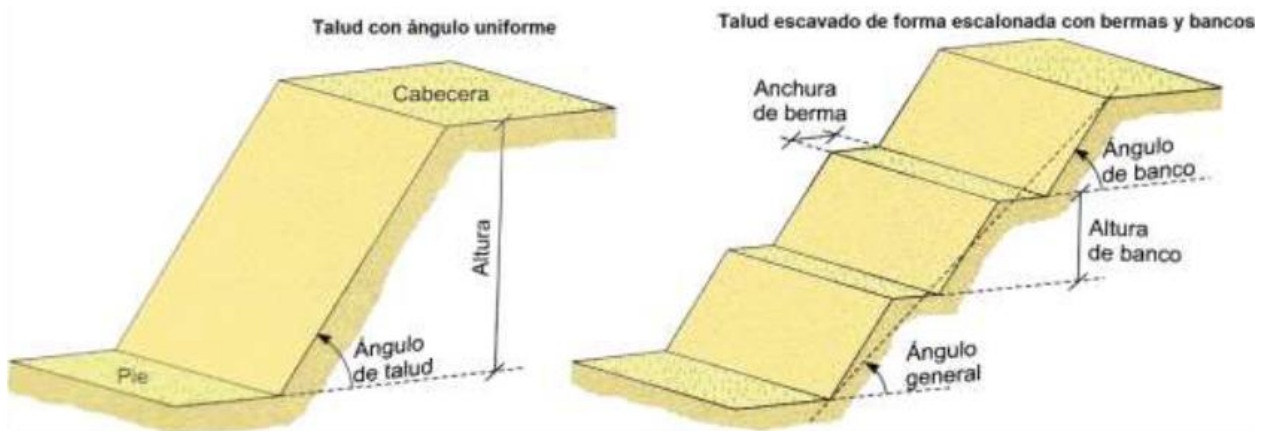
1.7.2 Depósitos Aluviales

Los depósitos aluviales generalmente se encuentran en quebradas y amplias superficies topográficas. Tienen un espesor más significativo y forman terrazas más desarrolladas, especialmente a lo largo de los bordes de los valles fluviales (Fernández-García et al., 1989).

1.7.3 Talud

Se denomina talud a una superficie inclinada en relación con la horizontal (Figura 5), la cual puede ser creada por el ser humano en diversas obras de ingeniería, como la construcción de terraplenes, que se utilizan para elevar el nivel de un terreno, o desmontes, que implican la remoción de tierra para formar superficies niveladas (Ricardo et al., 2015). Por otro lado, pueden ser de origen natural, como las laderas de montañas y colinas; a su vez, los taludes pueden estar compuestos de suelo, rocas o una combinación de ambos materiales. La composición y estructura del talud determinan la metodología de estudio y análisis necesarios para asegurar su estabilidad y prevenir deslizamientos o erosión (Ricardo et al., 2015).

Figura 5. Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos.



Nota. Datos tomados de Vallejo et al. (2002).

1.7.4 Inestabilidad

Se produce cuando una parte del macizo rocoso se desplaza con respecto a otra parte que no lo hace, esta parte del macizo que se desliza lo hace a través de una superficie de deslizamiento, cuyo criterio de rotura es las tensiones (Melentijevic, 2005). A su vez, las masas inestables conforman superficies de contorno que se deben a discontinuidades estructurales presentes o a superficies de deslizamiento; otras veces la rotura es producida a lo largo de una superficie que atraviesa a los macizos rocosos cuando la roca está muy fracturada (Melentijevic, 2005). La inestabilidad en taludes puede ser identificada por la aparición de grietas y hundimientos en el talud o en la superficie, que también se ve reflejado en las edificaciones.

1.7.5 Movimientos de ladera

Un deslizamiento de tierras es el movimiento de una masa de roca, tierra o escombros ladera abajo (Cruden, 1991). Son procesos dinámicos que constituyen en uno de los principales riesgos geológicos (Ferrer Gijon, 1988) y se clasifican en:

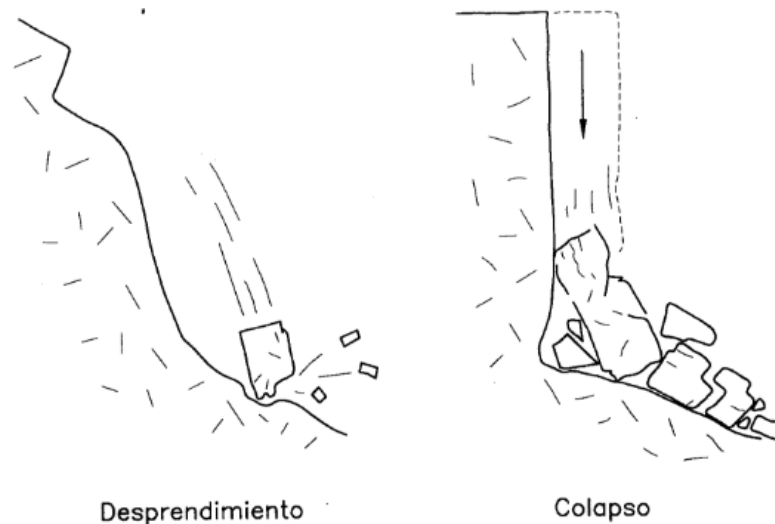
1.7.5.1 Deslizamientos

Se trata de movimientos gravitacionales de masas de roca o suelo que se deslizan sobre una o varias superficies de rotura al superarse la resistencia al corte en estos planos (Ferrer Gijon, 1988).

1.7.5.2 Desprendimientos o Colapsos

El desprendimiento ocurre cuando una masa de suelo o roca se separa de una pared empinada o acantilado (Figura 6). El movimiento se produce mediante una caída libre, seguida de un rebote o rodadura. Al impactar con la superficie del terreno, la masa suele fragmentarse en múltiples pedazos. Este movimiento es extremadamente rápido (Corominas & de Caminos, 2004).

Figura 6. Mecanismos de desprendimiento y colapso.



Nota. Datos tomados de Corominas & García Yagüe (1997).

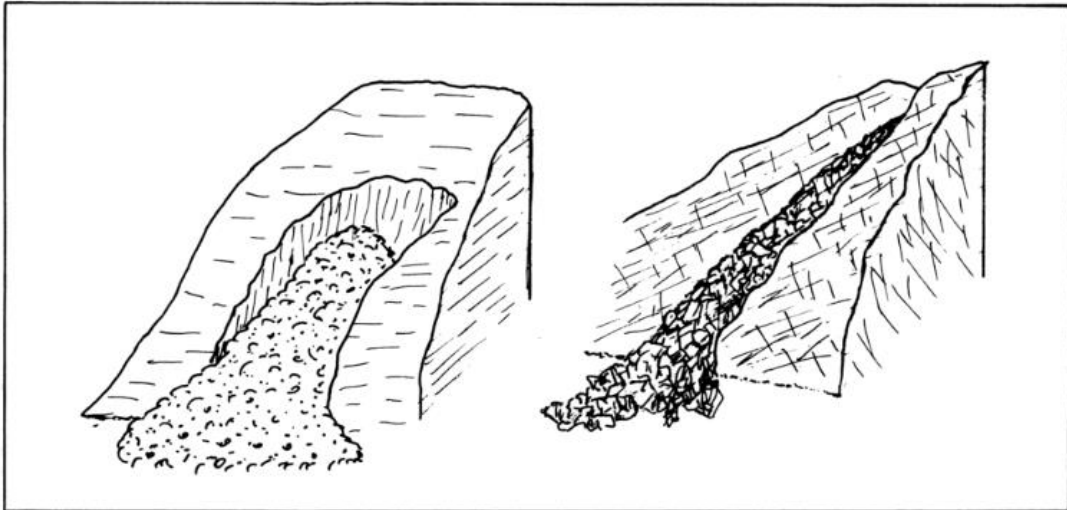
1.7.5.3 Avalanchas

Son movimientos muy rápidos de una masa de tierra, fragmentos de roca o derrubios (que pueden ir acompañados de hielo y nieve), que desciende de una ladera o caen de un escarpe (ver Figura 7). Los fragmentos acumulados varían en tamaño y no muestran una clasificación o estructura específica (Ferrer Gijon, 1988).

Las avalanchas están conformadas principalmente por fragmentos de detritos, generalmente húmedos, y con abundante material fino. El agua disminuye la resistencia de los

materiales que componen la cara del talud escarpado, lo que puede provocar este fenómeno (Ferrer Gijon, 1988).

Figura 7. *Avalancha de derrubios y de fragmentos rocosos.*

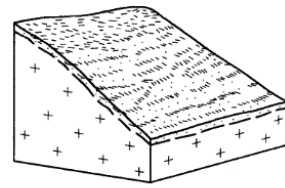


Nota. Datos tomados de Ferrer Gijon (1988).

1.7.5.4 Flujos

Los flujos son movimientos de masas, característicos de materiales sin cohesión. Principalmente tienen lugar en suelos muy susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia con el movimiento (Ferrer Gijon, 1988).

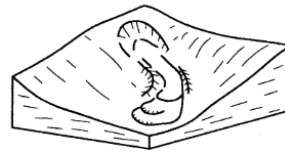
Los materiales involucrados actúan temporalmente como un fluido, sufriendo una deformación continua y sin presentar superficie de rotura definidas (Figura 8). La distribución de velocidades en la masa desplazada puede ser más o menos lento, dependiendo de la litología. La masa movida puede adoptar formas lobuladas en materiales cohesivos o extenderse y formar conos de deyección en materiales granulares (Corominas & de Caminos, 2004; Ferrer Gijon, 1988).

Figura 8. Movimientos de flujo.

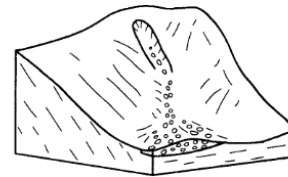
(a) Reptación



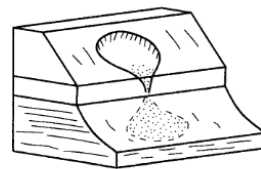
(b) Soliflucción



(c) Colada de tierra



(d) Corriente de derrubios



(e) Golpe de arena



(f) Avalancha de derrubios

Nota. Datos tomados de Corominas & García Yagüe (1997).

1.7.6 Causas de los deslizamientos

Las discontinuidades litoestratigráficas y la inclinación de la superficie de apoyo de un talud puede ser uno de los factores externos que provoque un deslizamiento, en márgenes activos el fenómeno de basculamiento provoca movimientos en masa e incluso el incremento de acumulación de sedimentos ocasiona que la pendiente del fondo aumente debido a los fenómenos de subsidencia (Ferrer Gijon, 1988). Por otro lado, en márgenes pasivos se producen deslizamientos de mayor tamaño, debido a que se acumula mayor cantidad de materiales.

Asimismo, las fallas y fracturas que se reactivan en el tiempo, el fenómeno de licuefacción, el decrecimiento de la resistencia a cizallamiento de los materiales presentes son factores que aumentan la probabilidad de deslizamiento (Ferrer Gijon, 1988). En adición, factores internos que

pueden generar deslizamientos son el límite plástico y límite líquido que al alcanzar cierto valor pueden generar un factor potencial interno de deslizamiento.

1.7.7 Susceptibilidad

Es la tendencia o facilidad de que un fenómeno pueda ocurrir, tomando en cuenta las distintas condiciones geológicas locales que tiene un terreno (Suarez, 2009). En cuanto a susceptibilidad de deslizamientos se debe de correlacionar principales factores intrínsecos y extrínsecos de los materiales para así poderla estimar (Villacorta et al., 2012).

1.7.8 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos

Un mapa de susceptibilidad ayuda a clasificar la estabilidad de un área evaluando la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento, desde lo más estable hasta lo más inestable (Suarez, 2009). Estos mapas se pueden realizar correlacionando datos geomorfológicos, litológicos, estructurales, de vegetación, uso de suelos, entre otros; generalmente mediante el uso de Sistemas de Información Geográficos (SIG) (Villacorta et al., 2012).

A continuación, en la Tabla 1, se presentan los criterios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos.

Tabla 1. *Criterios para determinar el grado de susceptibilidad.*

Susceptibilidad	Criterio
Muy alta	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe una alta posibilidad de que ocurran.
Alta	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran.

Moderada	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados, donde no han ocurrido deslizamientos, pero no existe completa seguridad de que no ocurran.
Baja	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados, no saturados, con discontinuidades favorables, donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos.
Muy Baja	Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos.

Nota. Datos tomados de Sarkar & Kanungo (2004).

1.7.9 Prospección Geofísica

Los métodos de prospección geofísica se fundamentan en una serie de técnicas no destructivas e indirectas que facilitan el estudio del subsuelo a diversas profundidades. Estos métodos analizan las variaciones y la distribución en profundidad de las propiedades físicas de los materiales rocosos que forman la Tierra (Kearey et al., 2002). Además de reducir los costos de exploración comparados con métodos directos como las excavaciones, evitan el peligro que podrían representar las labores mecánicas para las estructuras que se desean localizar, como tuberías y restos arqueológicos (Molina et al., 2004).

1.7.10 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

Determina cómo varía la resistividad eléctrica del subsuelo según la profundidad y a lo largo de un perfil en dos dimensiones (2-D) (Kearey et al., 2002). Esta técnica surge como una evolución de las prospecciones geoelectricas tradicionales, como el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) (Molina et al., 2004).

Se usan los arreglos dipolo-dipolo, Schlumberger, gradiente y Wenner (Tabla 2); en el primer arreglo los electrodos de corriente están a una gran distancia con respecto a los electrodos

de potencial. En el arreglo Schlumberger la distancia entre los dos electrodos de corriente es considerable entre sí, mientras que la distancia entre los electrodos de potencial es mucho menor y en el arreglo de Wenner la distancia entre electrodos de potencial y corriente es igual (Molina et al., 2004).

A continuación, los factores de penetración de los arreglos descritos previamente:

Tabla 2. *Factor de penetración de los arreglos utilizados en tomografías de resistividad eléctricas.*

Arreglo	Factor de penetración
Wenner	16%
Schlumberger	19%
Gradiente	19%
Dipolo-Dipolo	22%

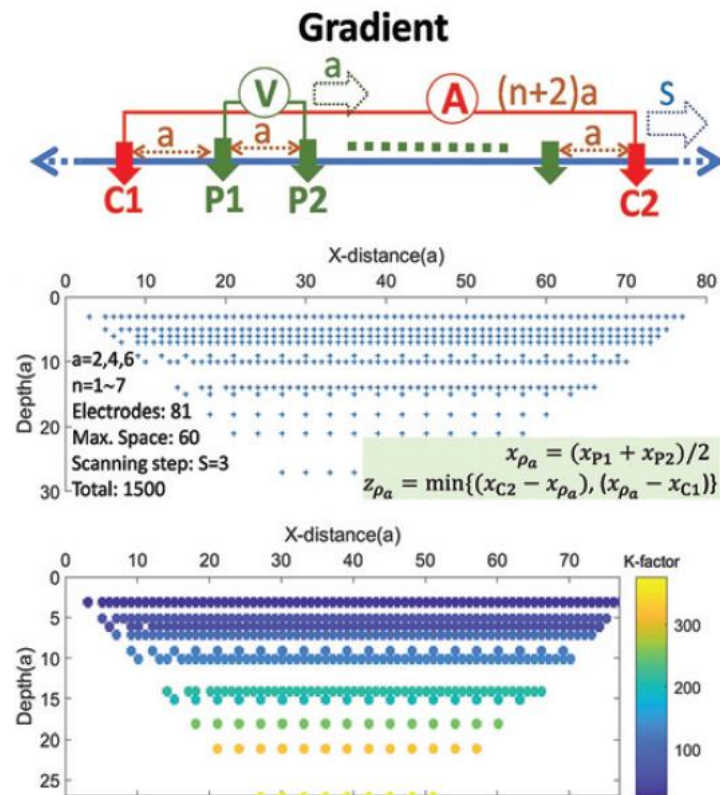
Nota. Datos tomados de Molina et al. (2004)

1.7.11 Arreglo Gradiente

Las Tomografía de Resistividad Eléctricas requieren una alta densidad de datos y una buena cobertura de la superficie terrestre para obtener imágenes de alta resolución de los objetivos del subsuelo (Zhou, 2019). El arreglo de gradiente es una disposición específica de electrodos utilizada en estudios de resistividad eléctrica para mapear las propiedades subterráneas del terreno. En esta disposición, los electrodos de potencial están separados por una distancia (a), mientras que los electrodos de corriente se sitúan a una distancia de $(n+2)a$ (Zhou, 2019).

Revisando la (Figura 9), se puede observar que la matriz de gradiente sólo utiliza los electrodos de potencial entre C_1 y C_2 para medir las diferencias de potencial. No hace las mediciones en los electrodos de potencial fuera de C_1 y C_2 . Esto lo vuelve adecuado para la adquisición de datos con una alta densidad y una buena calidad de datos (Zhou, 2019).

Figura 9. Arreglo gradiente para la adquisición de datos en Tomografía de Resistividad Eléctricas.

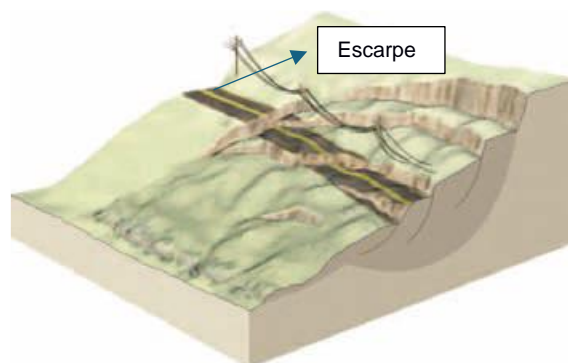


Nota. Datos tomados de Zhou (2019)

1.7.12 Escarpe

Es una pendiente inclinada del terreno (Figura 10), puede ser producido por fallas de desplazamiento vertical donde el movimiento es paralelo al buzamiento (Tarbuck et al., 2005).

Figura 10. Escarpes que quedan como evidencia de los deslizamientos producidos luego de que el material se deslice por la pendiente.

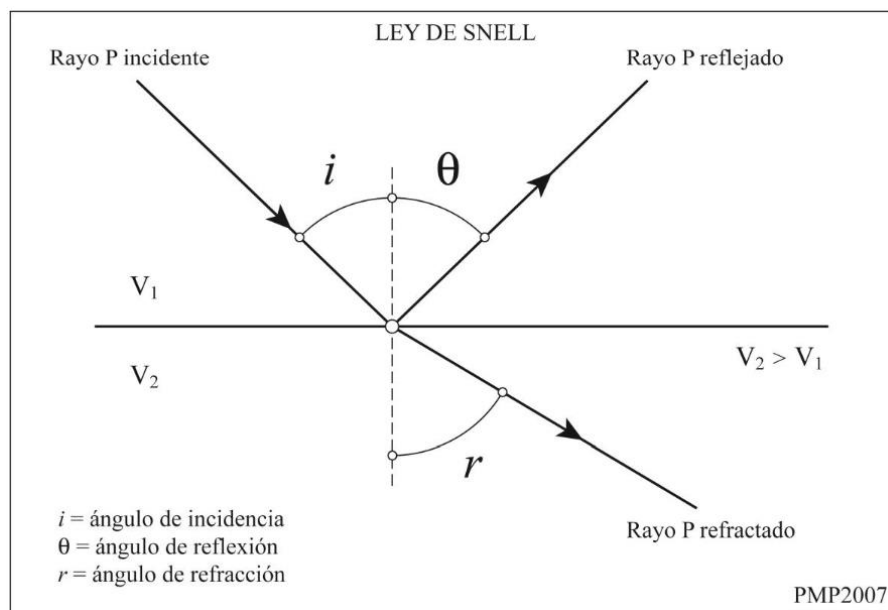


Nota. Datos tomados de Tarbuck et al (2005).

1.7.13 Sísmica de refracción

El principio de la sísmica de refracción se fundamenta en la ley de Snell (Figura 11), la cual indica que el ángulo de refracción de una onda es proporcional al índice de refracción del medio por el cual se desplaza (Kearey et al., 2002).

Figura 11. Ley Snell: Rayos reflejados y refractados asociados con un rayo *P* incidente oblicuamente sobre una interfase.



Nota. Datos tomados de Martínez Pagán (2014).

En la sísmica de refracción, se producen ondas sísmicas en un punto de la superficie terrestre y se registran en otros puntos distintos. La velocidad a la que se propagan estas ondas en el subsuelo se calcula midiendo el tiempo que tardan en viajar desde el punto de origen hasta el punto de registro (Telford et al., 1990).

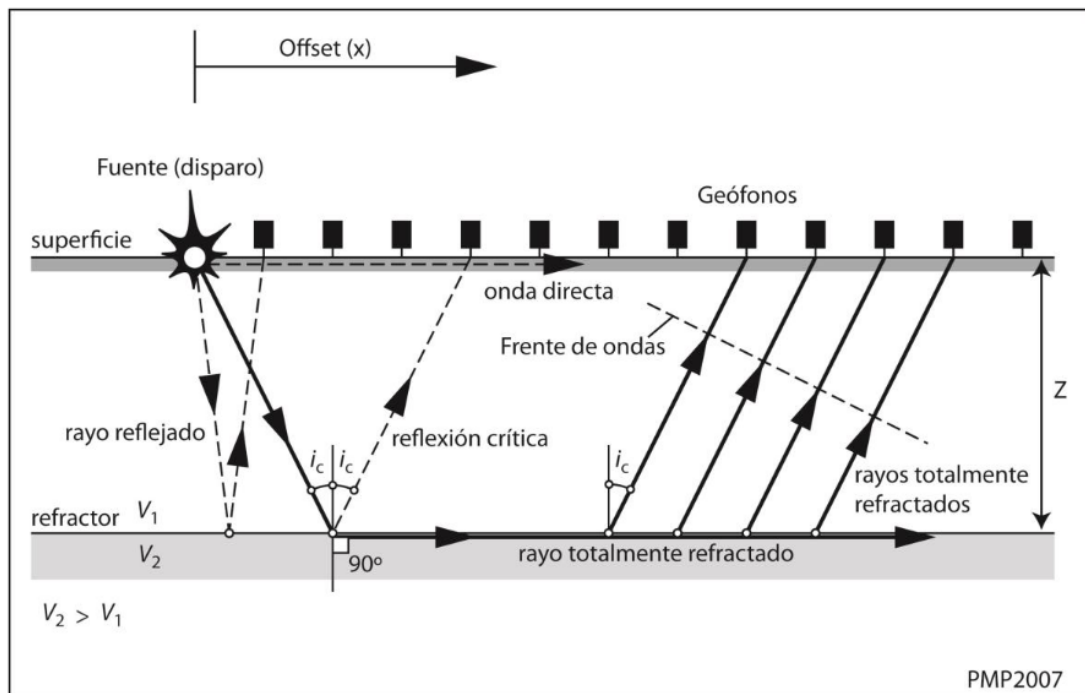
El procedimiento empleado para medir la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en la sísmica de refracción se conoce como perfil de refracción. En este método, se colocan varias fuentes y receptores sísmicos a lo largo de una línea recta (Kearey et al., 2002).

A su vez, en los perfiles de refracción se pueden identificar los límites entre capas de diferente velocidad de propagación mediante cambios bruscos, picos en la curva de velocidad y curvas de velocidad divergentes (Kearey et al., 2002).

La Figura 12 ilustra de forma esquemática los elementos esenciales de un perfil de sísmica de refracción. Una fuente sísmica, que puede ser el golpeo de una maza sobre una placa o el uso de explosivo, que generarán ondas mecánicas. Estas ondas se desplazan, a través del subsuelo, en una de las tres principales vías: directamente a lo largo de la parte superior del terreno (onda directa), por reflexión sobre la superficie superior de un refractor (reflector), y, de mayor importancia este caso, por refracción crítica a lo largo de los refractores (Martínez Pagán, 2014).

Este método consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas de compresión (Ondas P), generadas por una fuente de energía (mecánica) a unos puntos localizados (geófonos) a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno (Rivera et al., 2016).

Figura 12. Esquema básico de un perfil de sísmica de refracción.



Nota. Datos tomados de Martínez Pagán (2014).

Capítulo 2

2.1 Marco Geológico

2.1.1 Serie Paute

Está constituida por series complejas de esquistos verdes, cuarcitas, filitas y meta volcánicos que forman el núcleo de la cordillera real. Esta serie es divisible en la parte inferior (esquistos El Pan) y en la parte superior (meta-volcánicos San Francisco), la edad de la serie Paute corresponde al cretácico (Bristow, 1973).

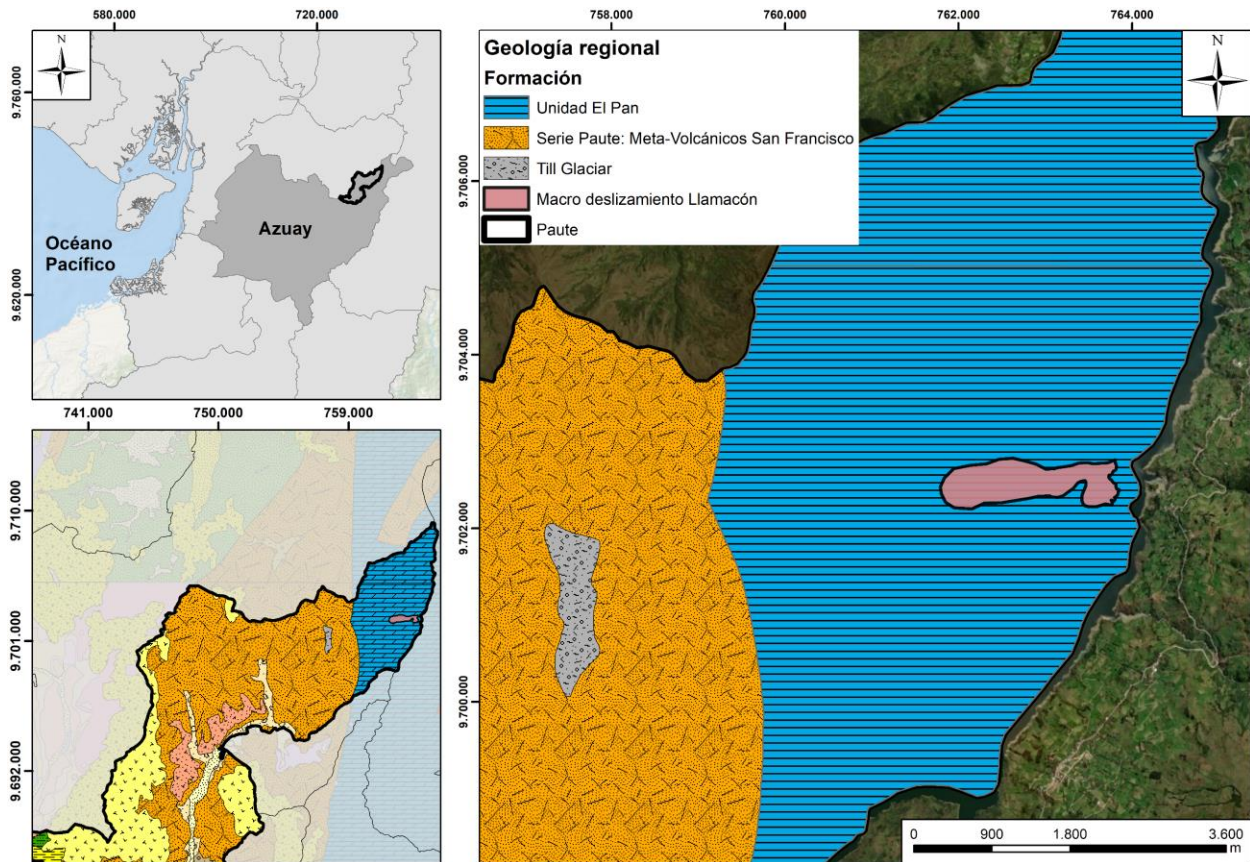
2.1.1.1 Unidad El Pan

Se encuentra conformada principalmente por los esquistos El Pan de (Bristow, 1973), una facies volcanosedimentario metamorfizada dentro del afloramiento del terreno Alao. El Pan se presenta como un cinturón alargado de 70 km de longitud y hasta 7 km de ancho, que abarca la región del curso del río Paute. Litológicamente está conformada por esquistos grafíticos, esquistos verdes y filitas, con cantidades menores de cuarcitas, mármoles negros, rocas ricas en epidota y otros silicatos calcáreos (Litherland, 1994). Es considerada una secuencia de trasarco del arco de islas oceánico Alao-Paute y de edad Jurásica de acuerdo a (Litherland, 1994). Sobre esta formación se encuentra el Macro deslizamiento Llamacón (Figura 13).

2.1.1.2 Unidad Maguazo

Corresponde a la subdivisión superior de los Meta volcánicos San Francisco, dentro de la Serie de Paute según (Bristow, 1973). Rocas turbidíticas y volcánicas (andesita - basalto) ligeramente metamorfizada. Se extiende desde las cercanías de San José de Paolo en el Norte (N) hasta el Río Paute en el Sur (S), aproximadamente 200 km (Litherland, 1994).

Figura 13. Mapa Litológico de Llamacón 1:250000.



Nota. Modificado de Senagua-Empresa Pública ESPOL TECH (2014).

2.2 Geomorfología

Existen muchos factores que han contribuido al desarrollo morfológico del valle del río Paute, como las características litológicas, estructurales y el comportamiento geo mecánico de las formaciones rocosas del basamento, han predisposto las condiciones intrínsecas en la definición de las geoformas y el relieve del sector, en la orientación (principalmente N-NE) del valle del río Paute y el desarrollo de procesos erosivos gravitacionales (Corporación Eléctrica del Ecuador, 1998).

La geomorfología de la zona se caracteriza por la presencia de pendientes abruptas (45°) fuertemente disectadas en ciertas zonas, además de la existencia de depósitos coluviales que se han producido debido a las acumulaciones de material suelto o fragmentado debido a la acción de paleo deslizamientos, favorecidos por las pronunciadas pendientes de las laderas.

El contexto geodinámico del sector es muy activo, los relieves están sometidos a procesos morfoclimáticos modelados por procesos hidro-erosivos. La erosión fluvial por debajo de la cota de 2200 msnm es predominante en relación con los procesos acumulativos en el valle del río Paute, por otro lado los procesos de acumulación de material de transporte aluvial se dan principalmente en las zonas de inundación del río Paute (Corporación Eléctrica del Ecuador, 1998).

Los estratos están generalmente plegados, deformados, fallados y forman numerosos relieves de tipo estructural litológico (cuestas y facetas triangulares). Cabe recalcar, que la configuración del relieve actual ha sido moldeada por una compleja interacción de factores externos. Entre estos destacan la elevada pluviosidad, la cual genera la saturación del material geológico, fenómenos sísmicos y la actividad humana.

Los factores antrópicos como, las intensas prácticas de deforestación que han caracterizado la zona, sumadas a usos inadecuados del terreno, han propiciado la aceleración de la erosión y la inestabilidad de laderas, dando lugar a movimientos en masa más frecuentes. Todas estas variables, ya sean intrínsecas del terreno o externas, se encuentran estrechamente relacionados a los problemas de estabilidad (Corporación Eléctrica del Ecuador, 1998).






La geomorfología donde se realizaron los ensayos se caracteriza por una ladera heterogénea con una pendiente aproximada de 45° , con presencia de material coluvial y rodados métricos.









Capítulo 3


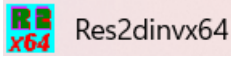

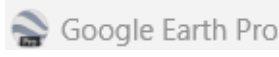


3.1 Materiales

Los materiales utilizados para la realización de este proyecto y la toma de datos en campo (Tabla 3) fueron seleccionados de acuerdo con los objetivos propuestos previamente y, las condiciones del entorno de trabajo. A continuación, se describe cada uno de los materiales utilizados:

Tabla 3. *Materiales utilizados y su funcionalidad en el proyecto.*

Actividad	Materiales	Principio/Función	
Tomografía Geoeléctrica	ABEM Terrameter LS2		
	Cable de resistividad multinúcleo		Inducción de corriente eléctrica para la generación de un perfil de resistividad 2D.
	Electrodos		
	Pinzas de Conexión		
Sísmica de refracción	Terraloc Pro2		Medición de los tiempos de viaje de las (Ondas P), para la generación de un modelo de velocidades en 2D.

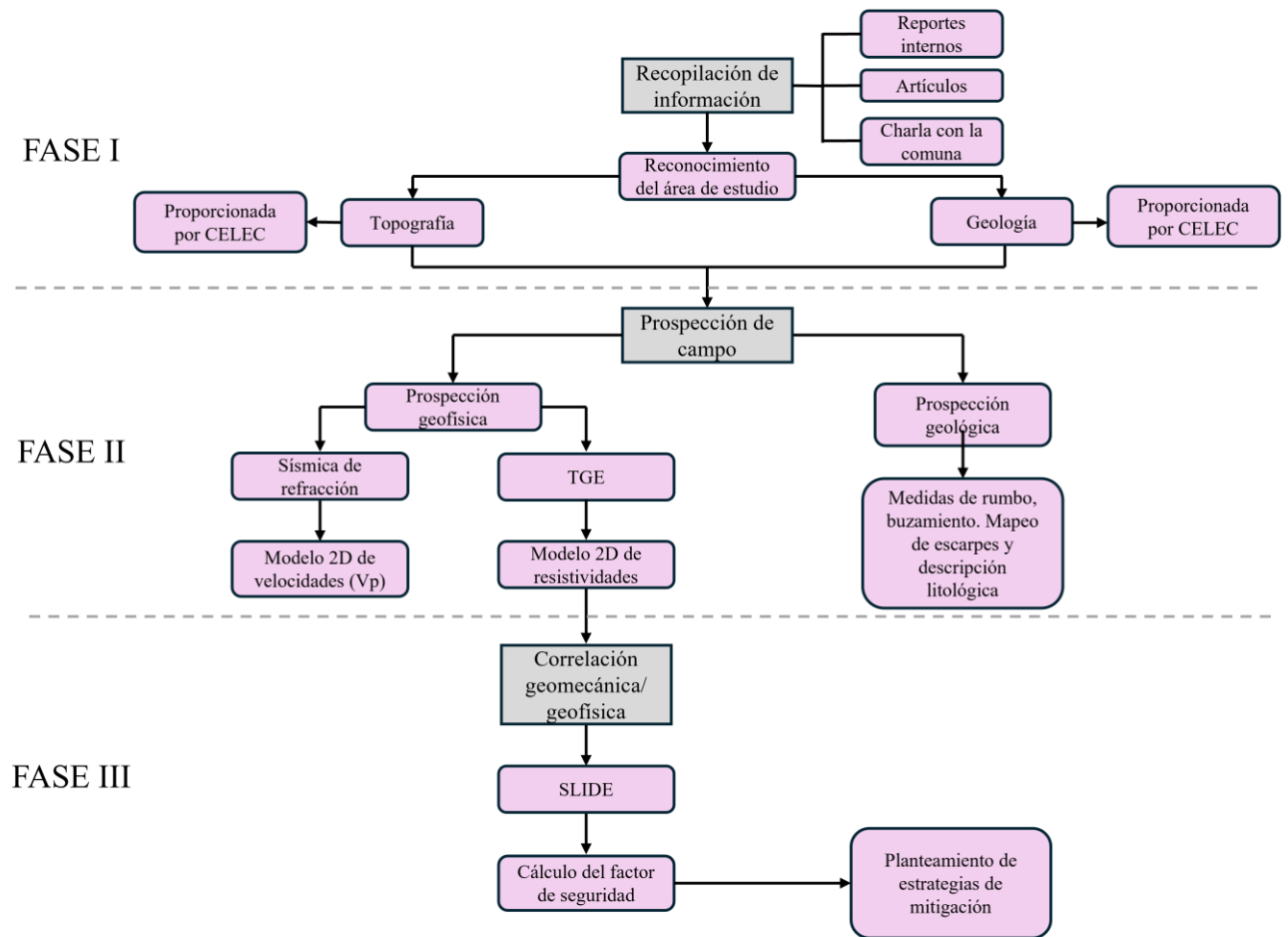
	Geófonos		
	Placa de silicona		
	Combo de 8 Kg		
	Cable sísmico		
Equipamiento adicional	Batería de carro 12V		Implementos para el cuidado y uso de los equipos geofísicos.
	Sombrilla		
	Mesa		
Equipamiento de campo	Materiales personales de campo		Protección al usuario y aumentan la eficiencia en campo.
Materiales de campo	Martillo Geológico		Toma de datos y coordenadas en campo.

Brújula Brunton		
Lupa		
Res2Dinv 4.10.20 (ver. demo)		Interpretar los datos de las Tomografías.
ArcMap 10.5		Diseño de mapas Elaboración de columnas.
Google Earth Pro ver. 7.3.6.9796 (64-bit)		Ubicación de las zonas planificadas para realizar los ensayos geofísicos.
Softwares		Procesamiento de los datos de sísmica de refracción.
	<p data-bbox="774 1108 861 1142"><i>Slide</i></p> 	Cálculo del factor de seguridad a partir de propiedades geomecánicas.

3.2 Metodología

Para la identificación de los factores que comprometen la estabilidad del sector, en este proyecto se estableció un enfoque metodológico que se desglosa en distintas etapas independientes (Figura 14), contribuyendo a la formulación de una interpretación concluyente.

Figura 14. *Flujograma de metodología aplicada al proyecto.*

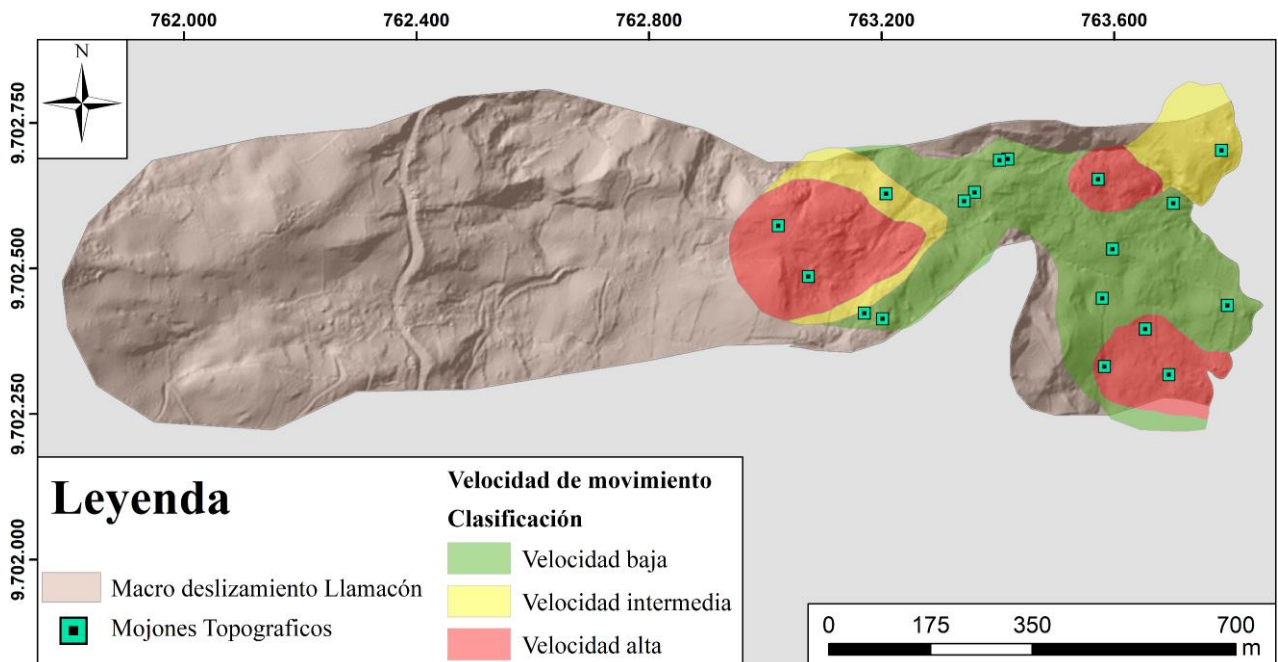


3.2.1 Fase I: Búsqueda de información

- Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de diversas fuentes como artículos científicos, léxicos especializados y mapas geológicos para recabar información adicional con la finalidad de enriquecer y respaldar una interpretación en relación con los acontecimientos históricos en la zona objeto de análisis.
- Se efectuó una reunión con personal de CELEC EP, en la que se obtuvo información preliminar acerca de las zonas de mayor interés (manantiales, escarpes, grietas, etc.), además de recibir información sobre la topografía, ubicación, accesibilidad, mapa de susceptibilidad al movimiento de masas y densidad de la vegetación.

- Se revisó el área de estudio en Google Earth para conocer las zonas en donde se realizarían los ensayos, guiándose con la cartografía base y un informe del 2014 proporcionado por CELEC EP, donde se mencionó el uso de 15 mojones topográficos que permitieron conocer el desplazamiento del terreno y clasificarlo en alto (>1000 mm), medio (1000 mm – 500 mm) y bajo (<500 mm) (Figura 15). Permitiendo así, determinar que la parte baja es la que presenta mayor susceptibilidad a deslizarse.

Figura 15. Mapa de velocidad de movimiento/desplazamiento en zonas puntuales dentro del macro deslizamiento de Llamacón.



Nota. Información base de los movimientos de masa, adaptado de CELEC EP. Fuente: Robles & Guzmán (2017).

- Se realizó la socialización con la comuna de Llamacón, en compañía del personal técnico de CELEC EP (Figura 16), antes de realizar los ensayos durante la salida de campo. De esta forma, se pudieron identificar las zonas que más se deslizaban con base a lo que los habitantes habían observado, al igual que los lugares donde existen manantiales o zonas saturadas. A partir de las zonas de mayor movimiento y el diálogo con la comunidad, se

seleccionaron de manera estratégica las áreas prioritarias para la realización de los ensayos geofísicos.

Figura 16. *Diálogo con la comuna de Llamacón.*

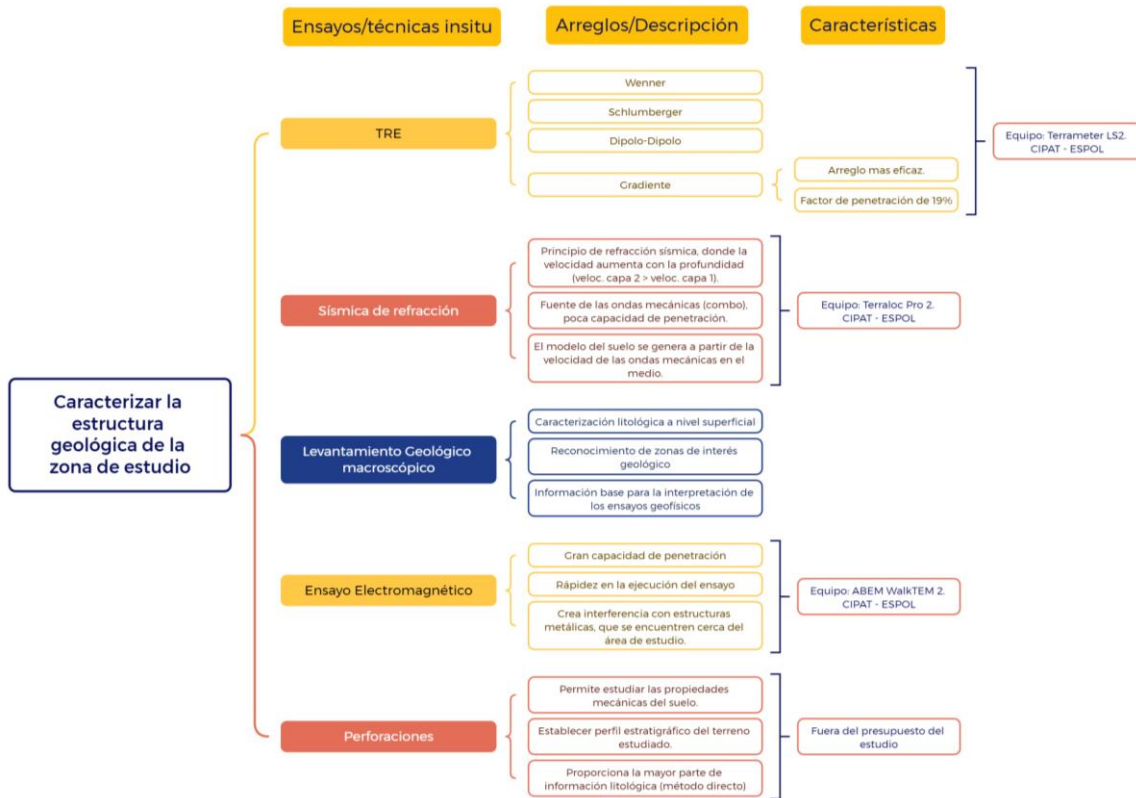


3.2.2 Fase II: Caracterización Geológica

Para la caracterización litológica del macro deslizamiento Llamacón, se emplearon métodos de exploración indirectos (geofísicos) y métodos de exploración in situ (levantamiento geológico), con el objetivo de correlacionar estas técnicas y así obtener resultados más confiables.

La Figura 17 que se presenta a continuación, detalla todos los métodos que fueron tomados en cuenta para la evaluación litológica del área de estudio, de los cuales fueron seleccionados los óptimos de acuerdo con las condiciones del entorno.

Figura 17. Metodologías consideradas para la determinación de la litología en la zona de estudio.



3.2.2.1 Levantamiento Geológico

Durante el trabajo en campo, se registraron observaciones sobre las características litológicas (Figura 18), estructuras geológicas (escarpes) y datos estructurales como rumbo y buzamiento. Se registraron coordenadas geográficas de los escarpes mapeados utilizando dispositivos de geolocalización (GPS de mano, marca Garmin), para su posterior digitalización. Además, se geolocalizaron puntos de interés, como manantiales, surgencias de agua y evidencia insitu para el procesamiento.

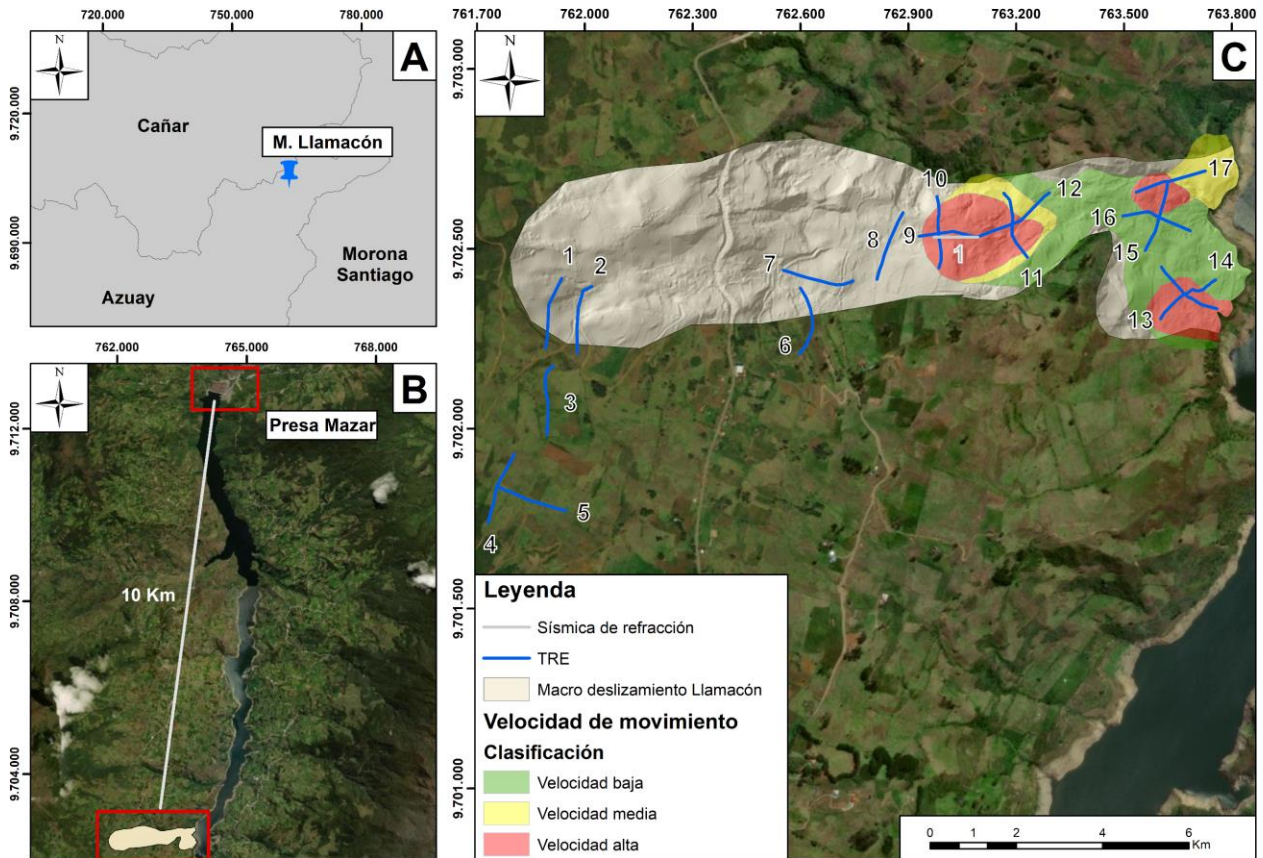
Figura 18. Toma de muestras para la descripción de características litológicas.



3.2.2.2 Ensayos Geofísicos

La Figura 19 que se presenta a continuación, detalla los ensayos geofísicos realizados sobre el macro deslizamiento Llamacón y la cantidad efectuada para cada metodología, contemplando 1 Ensayo de sísmica de refracción y 17 TRE.

Figura 19. Mapa de ubicación y ensayos realizados. A) Zona de estudio ubicado en la provincia del Azuay, B) Delimitación del área de estudio con respecto a la presa Mazar y, C) Ubicación de los ensayos realizados en la zona de Llamacón.



Nota. Información base de los movimientos de masa, adaptado de CELEC EP. Fuente: Robles & Guzmán (2017).

3.2.2.2.1 Ensayo geoelectrico: TRE

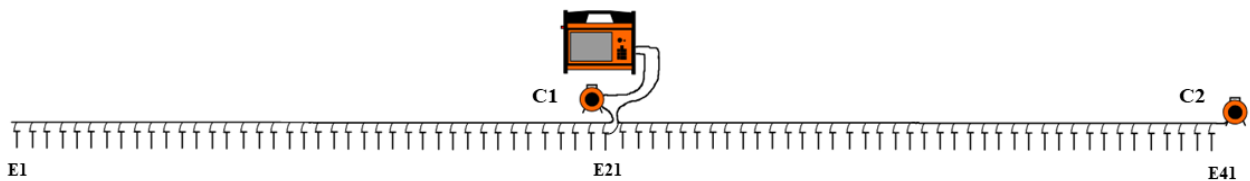
La TRE es una técnica geoelectrica que se utiliza para mapear y visualizar la distribución de las resistividades eléctricas en las capas subyacentes. Con el fin de caracterizar la susceptibilidad a los movimientos en masa del macro deslizamiento Llamacón, se realizaron 17 TRE (5 TRE en la parte alta, 3 TRE en la parte media y 9 TRE en la parte baja), las cuales fueron distribuidas con el objetivo de abarcar la mayor cantidad de puntos de interés. Para este ensayo geoelectrico, el equipo utilizado fue el Terrameter LS2 de la marca ABEM Guideline Geo. Este equipo se compone de 2 carretes de cable, 41 electrodos y 42 cables de doble lagarto, así como una batería de 12V. Cada TRE cubrió una extensión de 200 metros, con una profundidad

aproximada de 40 metros. En cada uno de los ensayos de TRE se utilizaron 41 electrodos con una separación de 5 metros entre sí. El producto final de esta técnica geofísica es un perfil en 2D de la distribución de las resistividades según los materiales presentes en el subsuelo.

Procedimiento para realizar el ensayo de TRE

1. Se colocó el equipo de resistividad geoelectrica (Terrameter LS2) en el centro de la zona de investigación.
2. Luego, se extendieron los cables de electrodos 1 y 2 en los laterales del equipo. Cada cable cuenta con una longitud de 100 metros de extensión cada uno (Figura 20).

Figura 20. Configuración de TRE utilizado en este proyecto, C1-C2: Cable de resistividad multinúcleo 1 y 2 respectivamente, E: electrodo.



Nota. Modificado de ABEM (2016).

3. Se clavaron los electrodos en el suelo con la ayuda de un combo, intentando siempre que formen una línea recta. A su vez, se definió el origen ($X=0$) y final del perfil ($X=200$ m), para no tener problemas en la fase de interpretación.
4. Los electrodos se clavaron 40 cm en el terreno para garantizar un buen contacto con el suelo.
5. Luego, se conectaron los electrodos con el cable de resistividad multinúcleo mediante el uso de lagartos. Se repitió el proceso hasta lograr que todos los electrodos estuviesen conectados en todos sus puntos.
6. Después, los cables de resistividad multinúcleo fueron conectados al equipo de resistividad en las terminales del Terrameter LS2.
7. Posteriormente, se creó un nuevo proyecto en el Terrameter LS2 donde se guardaron los datos tomados en campo y se configuró todas las variables del dispositivo (Tabla 4).

Tabla 4. Variables configuradas en el equipo Terrameter LS2.

Variables	Valor asignado
Número de electrodos	41
Espaciamiento entre electrodos	5 m
Tipo de arreglo	Gradiente
Corriente mínima	0.1 mA
Corriente máxima	1000 mA
Potencia máxima	400 W
Máximo voltaje de salida	200 V
Electrodo defectuoso	1000 ohm
Electrodo fallido	300000 ohm

8. Seguidamente, se testearon cada uno de los electrodos, en donde, si todos se encontraban bien conectados, se procedía a realizar la medición automáticamente, caso contrario se especificaba el número del electrodo que presentaba problema para que sea corregido (Tabla 5).

Tabla 5. Test de electrodos del equipo Terrameter LS2.

Electrodo óptimo	Electrodo defectuoso	Electrodo fallido
< 1000 ohm	1000 ohm – 300000 ohm	> 300000 ohm
Electrodo conectado correctamente	Electrodo con poca corriente de contacto	Electrodo desconectado

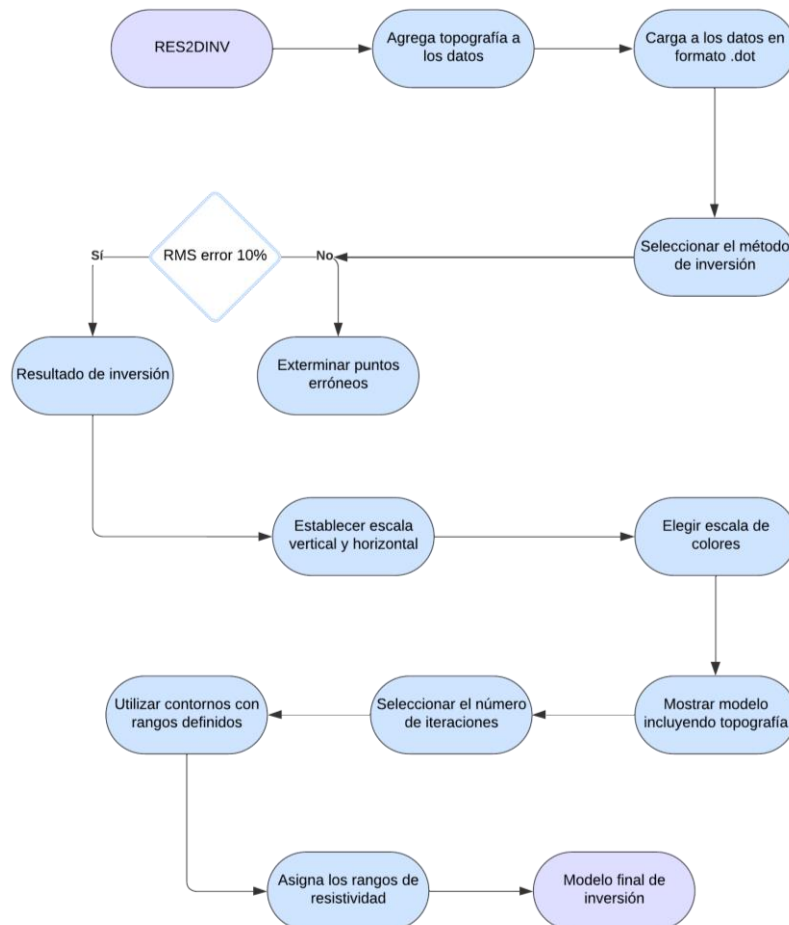
9. Finalmente, se procedió a realizar las mediciones, en las que se registraron 518 puntos.

Procedimiento para realizar el procesamiento de TRE.

Para la interpretación de los datos obtenidos, se utilizó el programa RES2DINV. En este proceso, se identificaron y corrigieron aquellos puntos que presentaban inconsistencias con respecto a los

otros puntos tomados, con el objetivo de minimizar el error a un valor inferior al 10%. Una vez corregidos los datos, se procedió a realizar la inversión de mínimos cuadrados, aplicando los procedimientos detallados en la Figura 21, para finalmente obtener la imagen final de la inversión.

Figura 21. *Flujograma para el procesamiento del TRE.*

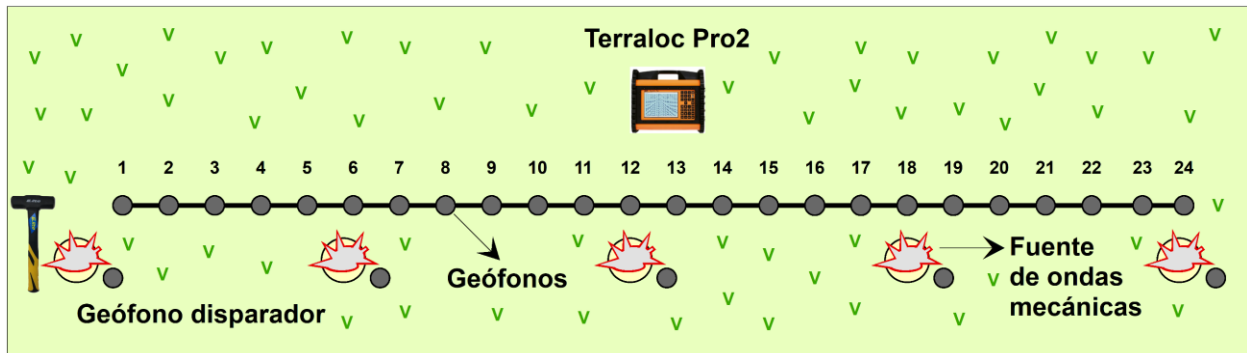


3.2.2.2.2 Sísmica de Refracción

La sísmica de refracción es una técnica de prospección geofísica que permite interpretar la estratigrafía de las capas subyacentes mediante la refracción de ondas mecánicas generadas por una fuente de energía. Para este ensayo se utilizó el equipo Terraloc Pro-2 (Figura 22) de la marca ABEM Guideline Geo, equipado con 24 geófonos de una frecuencia de 10 Hz, una placa de silicona y un combo de 8 Kg para generar las ondas mecánicas (Fuente de energía), además se utilizó un geófono extra que era colocado cerca de la fuente como punto de control. Se utilizaron

también 2 carretes de cable sísmico, cada uno con una longitud de 60 metros. Este estudio se realizó en sentido Este – Oeste en la parte baja del macro deslizamiento Llamacón, con una extensión longitudinal de 115 metros, donde se utilizaron 24 geófonos, a una distancia equidistante de 5 metros.

Figura 22. Configuración del ensayo de sísmica de refracción.

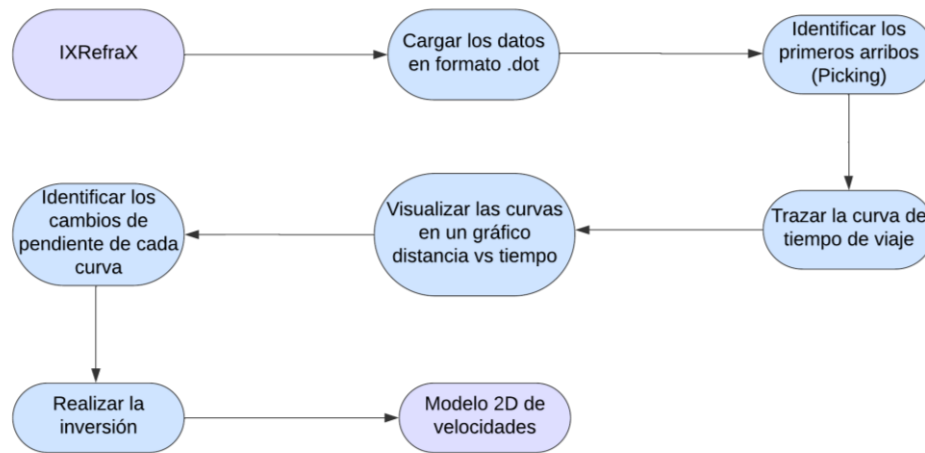


Procedimiento para realizar el ensayo de sísmica de refracción

1. Se colocó el equipo Terraloc Pro en el centro del área de estudio.
2. Posteriormente, se colocaron sobre el terreno 24 geófonos, espaciados cada 5 metros, tratando de formar una línea recta.
3. Los geófonos se conectaron al cable sísmico principal a través de sus pinzas (recordando que estas son de diferente tamaño y solo encajan en la conexión que le corresponde.)
4. Seguidamente se situó la fuente sísmica (en nuestro caso generada por el golpe de un combo) en una esquina de nuestro arreglo.
5. Luego se ubicó un geófono de control cercano a la fuente sísmica. La fuente sísmica en conjunto con el geófono disparador se fue desplazando a distintas posiciones (ver Figura 22).
6. Se procedió a almacenar los registros sísmicos en el equipo conforme se iban realizando los golpes. Cabe añadir que se efectuaron 3 golpes para cada ubicación.

Para el procesamiento de los datos sísmicos se utilizó el programa IXRefraX y se siguieron los pasos mostrados en la Figura 23.

Figura 23. Flujograma para el procesamiento de los ensayos de sísmica de refracción.



3.2.3 Fase III: Cálculo de Factor de Seguridad

3.2.3.1 Correlación Geomecánica Geofísica

En la fase III se llevó a cabo la correlación entre las resistividades del terreno y las propiedades geomecánicas del suelo, como la cohesión y el ángulo de fricción interna. Se estableció mediante la aplicación de ecuaciones empíricas derivadas de artículos científicos. Adicionalmente, se consultaron tablas con valores de estas propiedades obtenidas en ensayos de laboratorio sobre diversos materiales (Tabla 6) a fin de verificar que los resultados obtenidos con las ecuaciones empíricas se encontraran dentro de los rangos esperados.

Para el cálculo de los parámetros geomecánicos (cohesión, ángulo de fricción interna), se usó la Ecuación (3.1) y (3.2) respectivamente. Con el objetivo de proponer un criterio técnico conservador, se consideraron los valores mínimos dentro de los rangos establecidos para las resistividades, evaluando así los escenarios más críticos posibles.

$$c = -3E - 0.5 \cdot \rho^2 + 0.0918 \cdot \rho + 21.544 \quad (3.1)$$

Correlación entre la resistividad y la cohesión. **Fuente:** (Jusoh & Osman, 2017).

$$\phi = 4.7036 \cdot \ln(\rho) + 6.6297 \quad (3.2)$$

Correlación entre la resistividad y el ángulo de fricción interno. **Fuente:** (Jusoh & Osman, 2017)

Tabla 6. Valores referenciales de parámetros geomecánicos en esquistos.

Parameter	Value	Material remarks
Unit weight, γ (kN/m ³)	18-21	
Friction angle, ϕ (°)	32-35	CVM7 (disturbed material)
	45	Undisturbed gneiss
	25-30	Undisturbed gneiss (along foliation plane)
	30	Schist
	20-25	Schist (along foliation plane)
	30-40	Completely weathered rock
Cohesion, c (Kpa)	10-50	CVM7 (disturbed material)
	1000	Undisturbed gneiss
	200	Schist
	30	Completely weathered rock
Elastic modulus, E (MPa)	30 000	Undisturbed gneiss
	1000	Schist
	100	Completely weathered rock
Modulus of consolidation, M (MPa)	4000-8000	CVM7 (disturbed material)

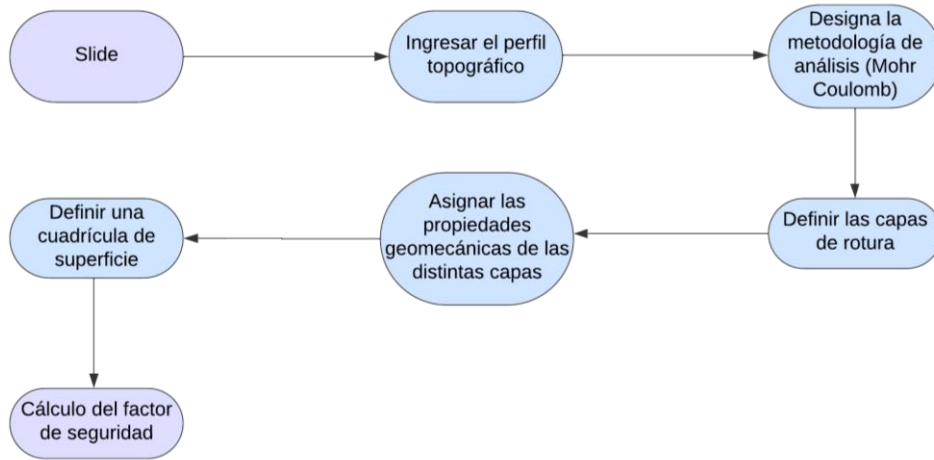
Nota. Datos tomados de Bonzanigo et al. (2007)

3.2.3.2 *SLIDE*

Es un programa que sirve para calcular el factor de seguridad de un talud. El factor de seguridad puede definirse como la razón que existe entre los momentos o fuerzas que se oponen al deslizamiento dividido al momento o fuerzas que provocan el deslizamiento.

A partir de la topografía obtenida sobre el macro deslizamiento Llamacón, se realizaron perfiles topográficos, tomando en cuenta las zonas que se consideren de mayor susceptibilidad. Para el cálculo del factor seguridad (Figura 24) se necesitaron parámetros geomecánicos de las capas subyacentes como (cohesión, ángulo de fricción, y peso unitario), calculados a partir de la relación entre la resistividad y las propiedades mecánicas intrínsecas de cada material, utilizando para el cálculo el menor valor de resistividad, con la finalidad de cubrir los peores escenarios posibles. Los factores de seguridad se calcularon mediante el método de Mohr-Coulomb.

Figura 24. *Flujograma realizado para el procesamiento en Slide.*



Capítulo 4

4.1 Resultados

4.1.1 Descripción Litológica

A lo largo del macro deslizamiento se identificó material coluvial con clastos que van de tamaño métrico a centimétricos, representados por fragmentos angulosos y sub-anguloso, de composición petrográfica variable y distintos grados de meteorización. Se encuentran distribuidos en una matriz arcillosa/limosa de color café (Figura 25).

Figura 25. *Material coluvial presente en el macro deslizamiento Llamacón*



Los bloques métricos (rodados) encontrados en el material coluvial presentan una composición andesítica, con vetillas estériles (sin presencia de sulfuros) (Figura 26).

Figura 26. *Rodados métricos presentes en el macro deslizamiento Llamacón*



En la parte baja del macro deslizamiento Llamacón, se observó el afloramiento de esquisto en las coordenadas X: 763775, Y: 9702535, Z: 2154. Este esquisto presentaba plegamientos debido a los esfuerzos tectónicos característicos de la región. Además, se observaron vetillas de cuarzo que también mostraban signos de plegamiento (Figura 27).

Figura 27. Afloramiento de esquisto plegado en la parte baja del macro deslizamiento Llamacón

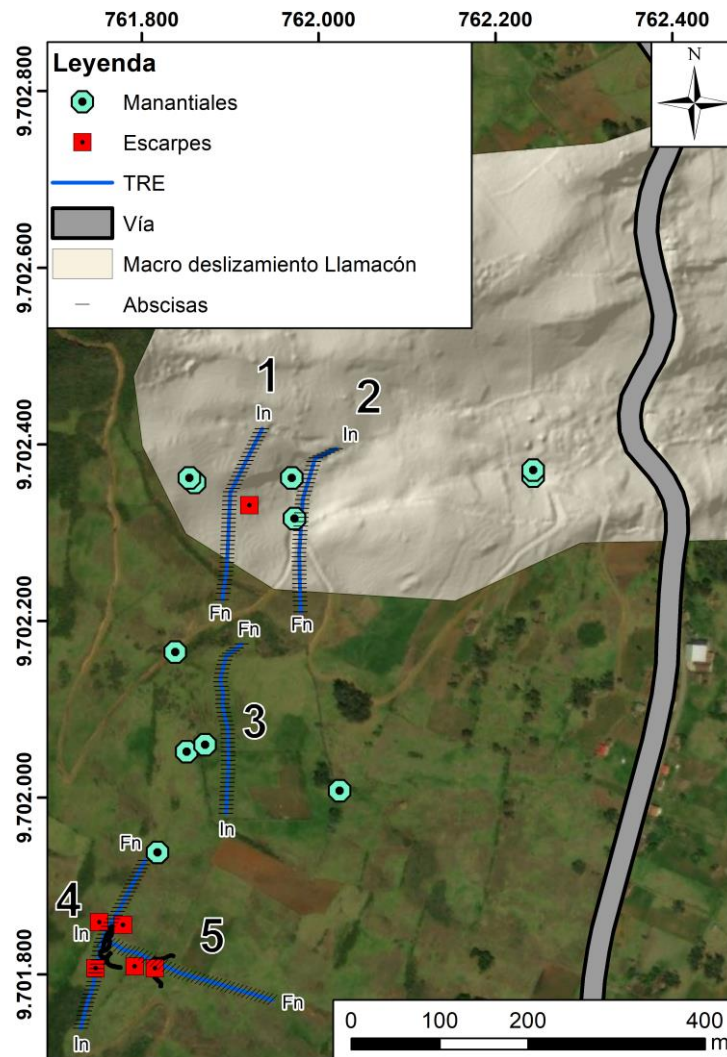


4.1.2 Interpretación Geofísica

4.1.2.1 Parte alta

En la parte alta del macro deslizamiento Llamacón se realizaron 5 TRE, de los cuales 3 se encuentran fuera de la huella del macro deslizamiento, esto debido a que, los ensayos fueron ubicados con el objetivo de cubrir zonas de interés mapeadas por personal de CELEC EP como escarpes, que se localizan predominantemente en la parte alta del área de estudio y manantiales (Ojos de agua), ubicados principalmente en la parte baja y media del sector (ver Figura 28).

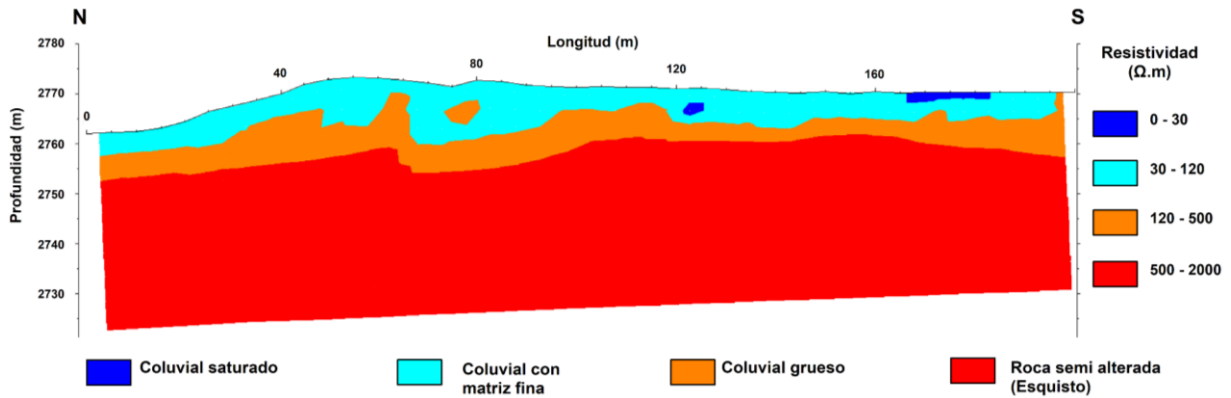
Figura 28. Mapa de Ubicación de TRE (Parte alta).



Nota. Las abreviaturas mencionadas corresponden a In: Inicio y Fn: Fin

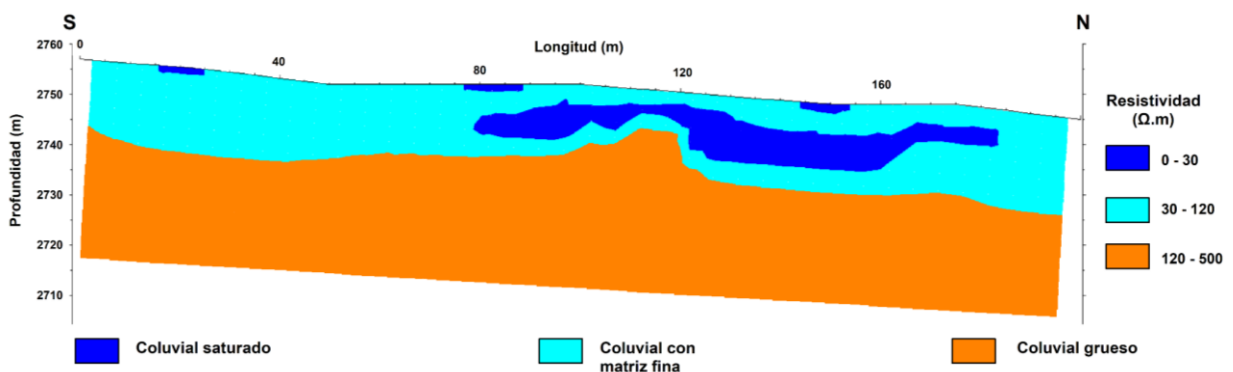
La TRE-01 (Figura 29) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 10 a 2000 $\Omega \cdot m$ aproximadamente. Las tonalidades celestes tienen un espesor aproximado de 5 metros, que evidencian un coluvial con matriz fina (30-120 $\Omega \cdot m$); luego a lo largo del perfil la resistividad baja ($\leq 30 \Omega \cdot m$) representando zonas de coluvial saturado con tonalidades azul. A su vez, se visualizan 2 capas, una de espesor de 2 metros de color naranja (120-250 $\Omega \cdot m$) asociadas a un coluvial grueso y una franja con un espesor aproximado de 30 metros de color rojo (500-2000 $\Omega \cdot m$) categorizándolo como esquistos levemente meteorizados (roca semi alterada).

Figura 29. TRE O1 (Parte alta).



La TRE-04 (Figura 30) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 10 a 500 $\Omega \cdot m$ aproximadamente. A lo largo del perfil de S-N, las tonalidades de coloración azul ($\leq 30 \Omega \cdot m$) representa las zonas de coluvial saturadas, las cuales se encuentran con un espesor de aproximadamente 5 metros desde la abscisa 80 a 185 metros (longitudinalmente). A su vez, el material coluvial con matriz fina (30-120 $\Omega \cdot m$) presenta un espesor mayor a 10 metros; seguido de esta capa se presenta una de coloración naranja (120-500 $\Omega \cdot m$) de un espesor aproximado de 25 metros con un aumento de los valores de resistividades asociados a la presencia de material coluvial grueso.

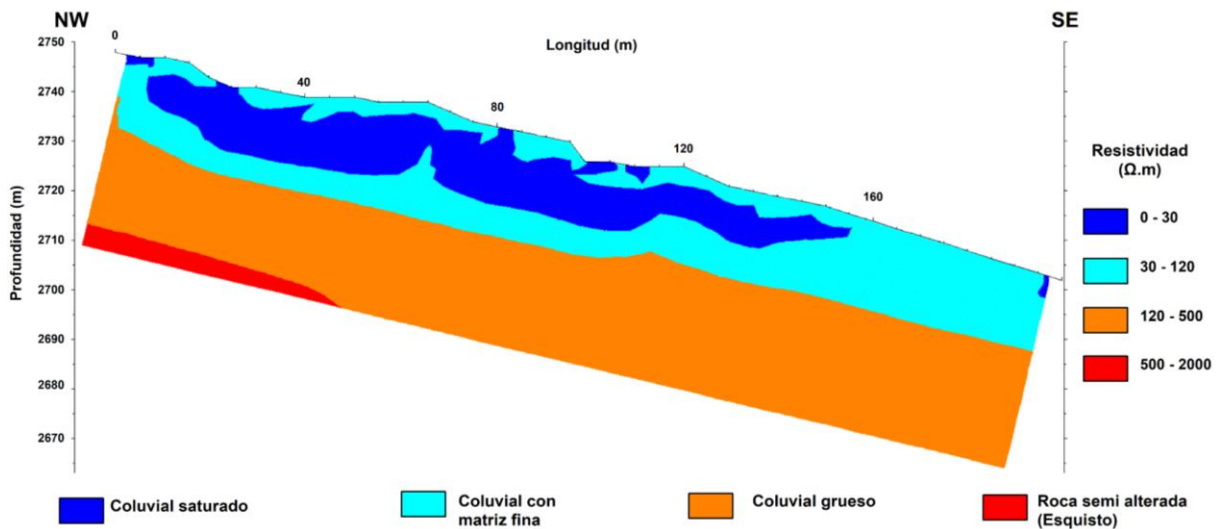
Figura 30. TRE O4 (Parte alta).



La TRE-05 (Figura 31) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 10 a 2000 $\Omega \cdot m$ aproximadamente. Las tonalidades de color azul ($\leq 30 \Omega \cdot m$) representa coluviales saturados, algunas de estas zonas se manifiestan en campo como

manantiales; los valores de resistividad aumentan indicando un coluvial con matriz fina (30-120 $\Omega\cdot m$) representadas mediante tonalidades celestes. Luego, se pueden diferenciar 2 capas, cuyos valores de resistividad aumentan de forma proporcional a la profundidad a la que se encuentran. La primera capa de coloración naranja (120-500 $\Omega\cdot m$) se asocia con un coluvial grueso y la segunda capa de tonalidades rojas (500-2000 $\Omega\cdot m$) contiene esquistos levemente meteorizados.

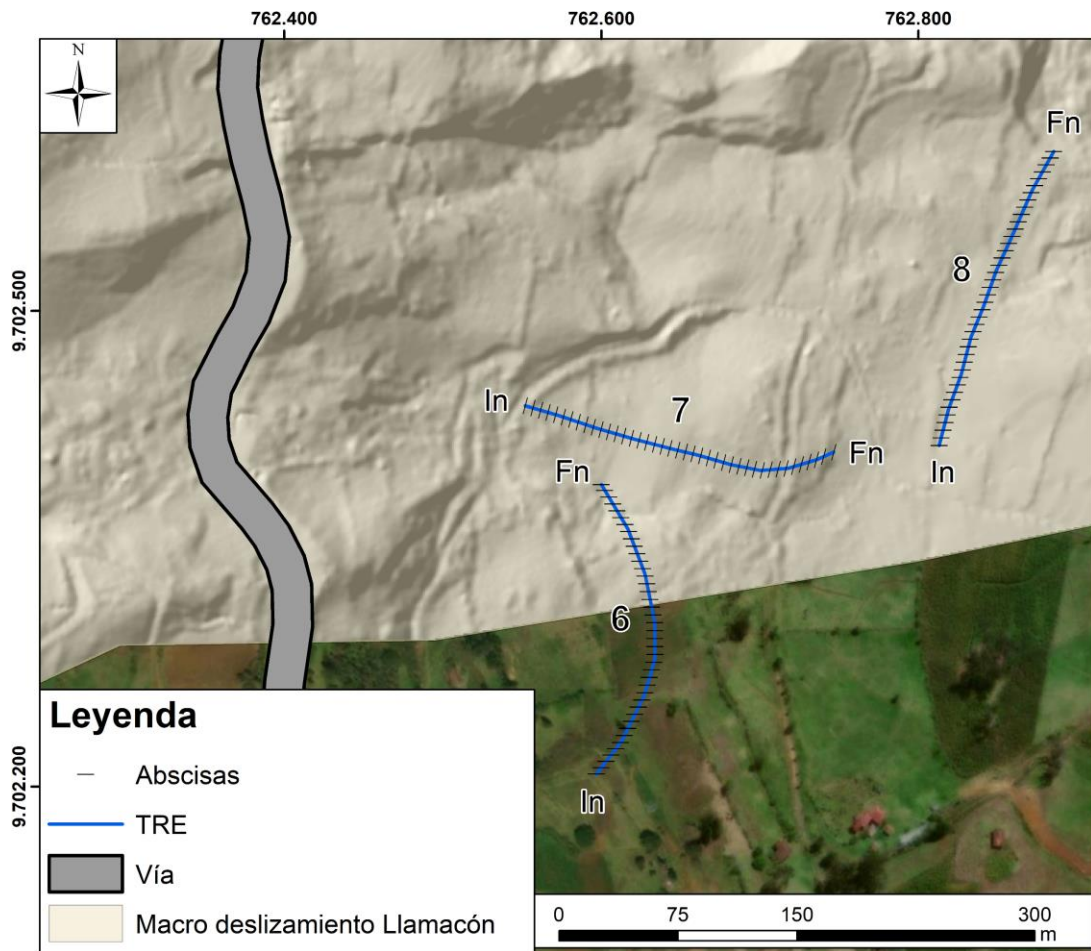
Figura 31. TRE O5 (Parte alta).



4.1.2.2 Parte media

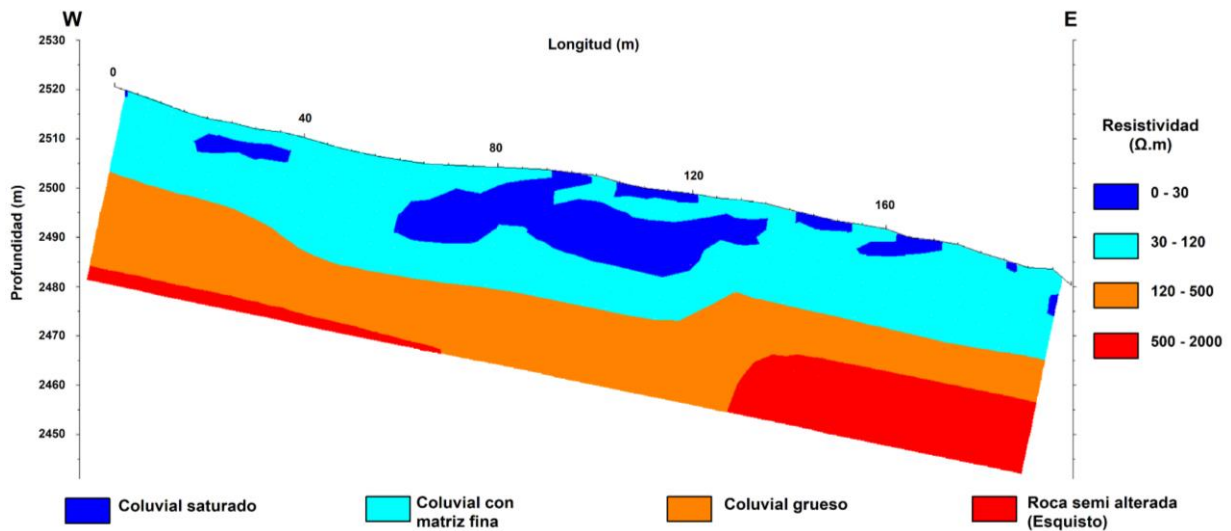
En la parte media del macro deslizamiento Llamacón se realizaron 3 TRE, alcanzando una longitud de 200 metros longitudinalmente y una capacidad de penetración de 40 metros aproximadamente (ver Figura 32).

Figura 32. Mapa de Ubicación de TRE (Parte media).



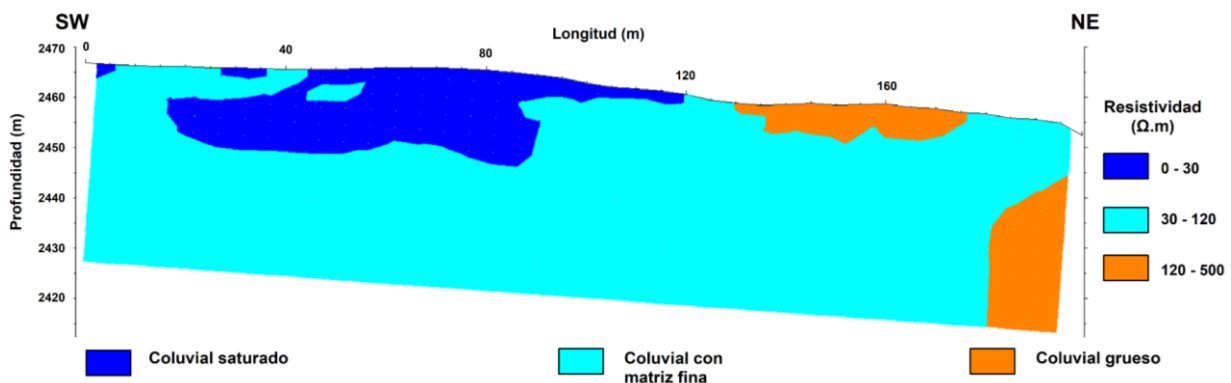
La TRE-07 (Figura 33) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 10 a 2000 $\Omega \cdot m$ aproximadamente. Las tonalidades celestes (30-120 $\Omega \cdot m$) representan las zonas de coluviales con matriz fina; mientras que, las tonalidades azules que van a lo largo del perfil de O-E representan coluviales saturados ($\leq 30 \Omega \cdot m$), las cuales concuerdan con los manantiales visualizados en campo. Por otro lado, se visualizan dos capas, la de coloración naranja (120-500 $\Omega \cdot m$) con un espesor de 10 metros aproximadamente representa la presencia de coluvial grueso, finalmente se identifica una capa de coloración roja (500-2000 $\Omega \cdot m$) con un espesor de 15 metros que representan esquistos levemente meteorizados con un espesor de aproximadamente 8 metros.

Figura 33. TRE O7 (Parte media).



La TRE-08 (Figura 34) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 13 a 500 $\Omega \cdot m$ aproximadamente. A lo largo del perfil de SW-NE se visualiza una tonalidad celeste que representa material coluvial con matriz fina (30-120 $\Omega \cdot m$), mientras que en la parte superficial se pueden evidenciar coluviales saturados ($\leq 30 \Omega \cdot m$) de coloración azul que va desde la abscisa 0 a la 5 y de la 15 a la 120. En la parte NE del perfil los valores de resistividad aumentan (120-500 $\Omega \cdot m$) con un espesor de aproximadamente 30 metros debido a la presencia de coluvial grueso, representadas por tonalidades naranjas.

Figura 34. TRE O8 (Parte media).

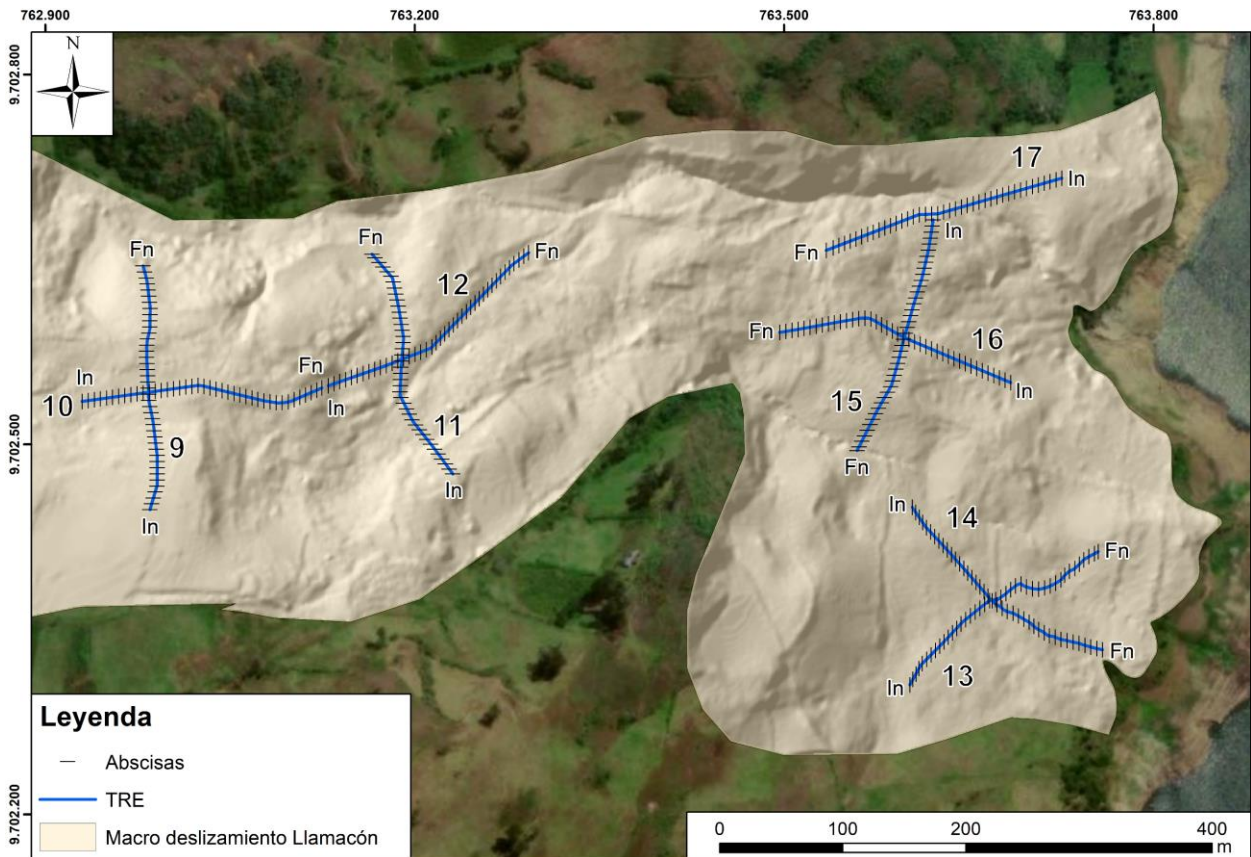


4.1.2.3 Parte baja

En la parte baja del macro deslizamiento Llamacón se realizó la mayor parte de ensayos, efectuando 9 TRE que alcanzaron una extensión de 200 metros longitudinalmente y una capacidad

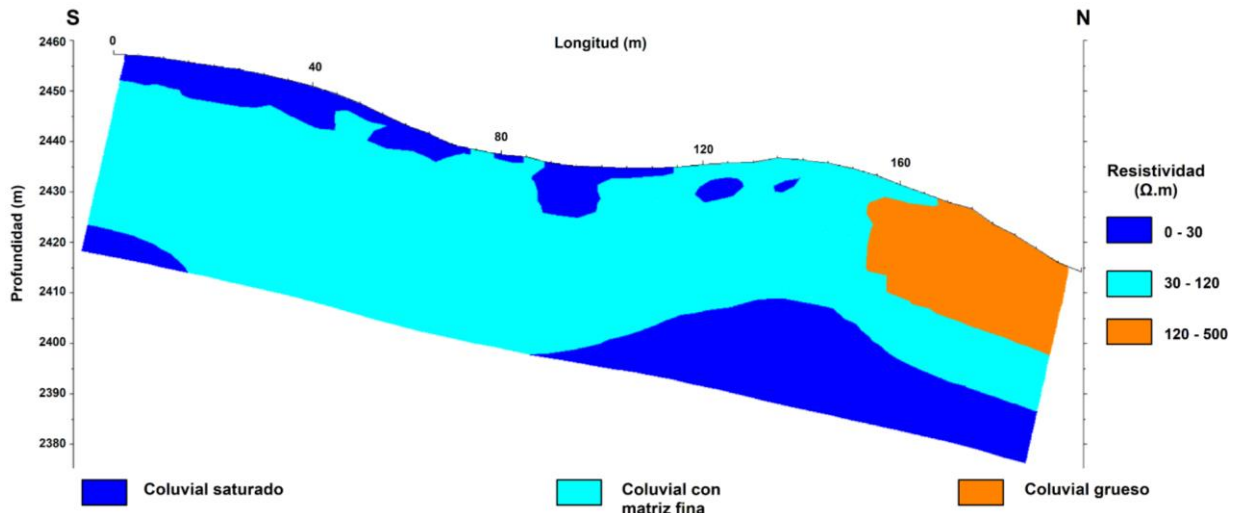
de penetración de 40 metros aproximadamente. Se priorizó esta zona debido a los resultados del monitoreo por hitos topográficos realizado por CELEC EP, donde se conoció el movimiento constante que presentaba esta zona (ver Figura 35).

Figura 35. Mapa de Ubicación de las TRE (Parte baja).



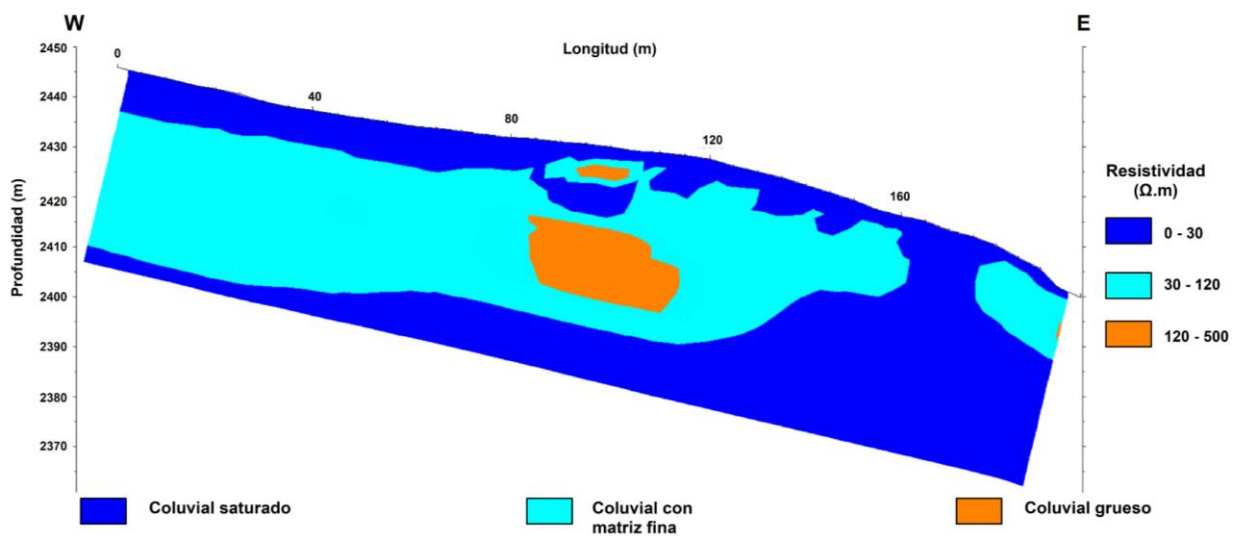
La TRE-09 (Figura 36) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 5 a 400 $\Omega \cdot m$ aproximadamente. A lo largo del perfil, se observan en su mayoría zonas de coluvial saturado, siendo representadas por una capa de un espesor de 30 metros aproximadamente de tonalidades celestes (30-120 $\Omega \cdot m$) y categorizando al material coluvial con matriz fina. Mientras que, en la parte superior e inferior con un espesor de 5 a 10 metros aproximadamente, se puede observar tonalidades azules que representan zonas de coluvial saturado ($\leq 30 \Omega \cdot m$). Al norte del perfil, las tonalidades naranjas evidencian un aumento de los valores de resistividades de (120-500 $\Omega \cdot m$) respectivamente, donde estos valores representan al material coluvial grueso.

Figura 36. TRE O9 (Parte baja).



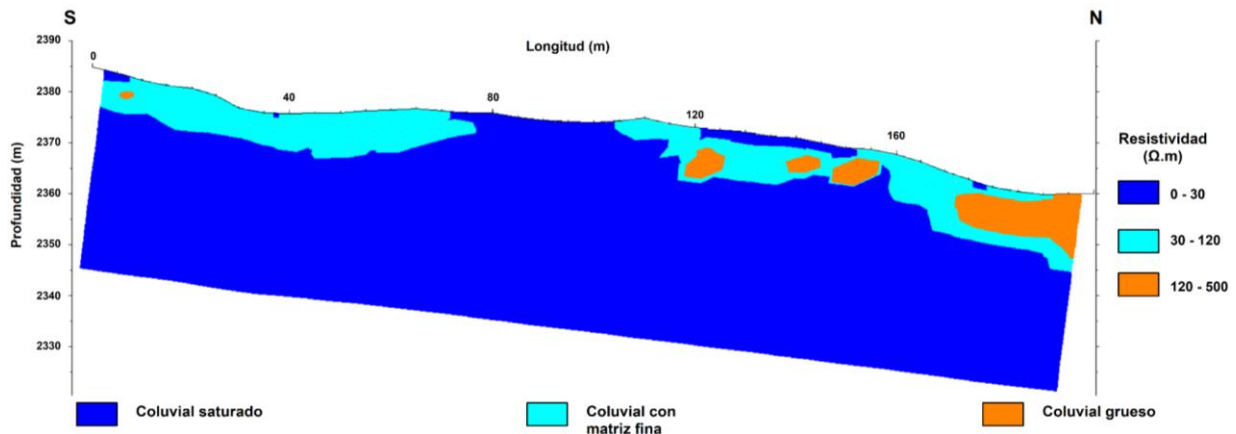
La TRE-10 (Figura 37) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 1 a 500 $\Omega \cdot m$ aproximadamente. En su mayoría a lo largo del perfil se visualizan zonas coluviales saturados ($\leq 30 \Omega \cdot m$) con un espesor de 5-10 metros en ciertos sitios, los cuales concuerdan con manantiales identificados en campo. A su vez, existe una capa de un espesor de 20 metros, donde se observa la presencia de material coluvial con matriz fina (30-120 $\Omega \cdot m$) y en medio de esta franja se puede evidenciar tonalidades naranjas donde las resistividades aumentan (120-500 $\Omega \cdot m$), lo cual representa la presencia de coluvial grueso.

Figura 37. TRE 10 (Parte baja).



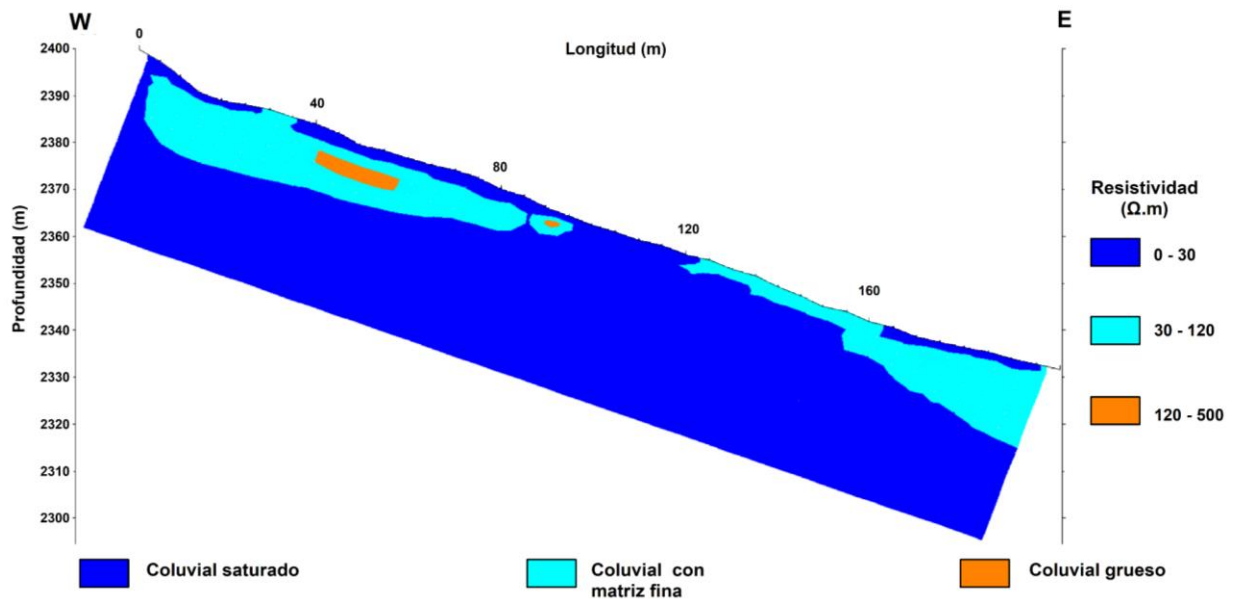
La TRE-11 (Figura 38) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 1 a 500 $\Omega\cdot\text{m}$ aproximadamente. A lo largo del perfil predominan las zonas del material coluvial saturado ($\leq 30 \Omega\cdot\text{m}$), teniendo al norte mayor presencia, longitudinalmente entre la abscisa 160 a 180 metros. Por otro lado, se encuentra una capa de color celeste con un espesor de aproximadamente 30 metros donde aumentan los valores de resistividad (30-120 $\Omega\cdot\text{m}$) que representan al material coluvial con matriz fina. En la parte central del ensayo, entre la abscisa 85 a 115 metros, los valores de resistividades son mayores (120-500 $\Omega\cdot\text{m}$) debido a que hay presencia de coluvial grueso.

Figura 38. TRE 11 (Parte baja).



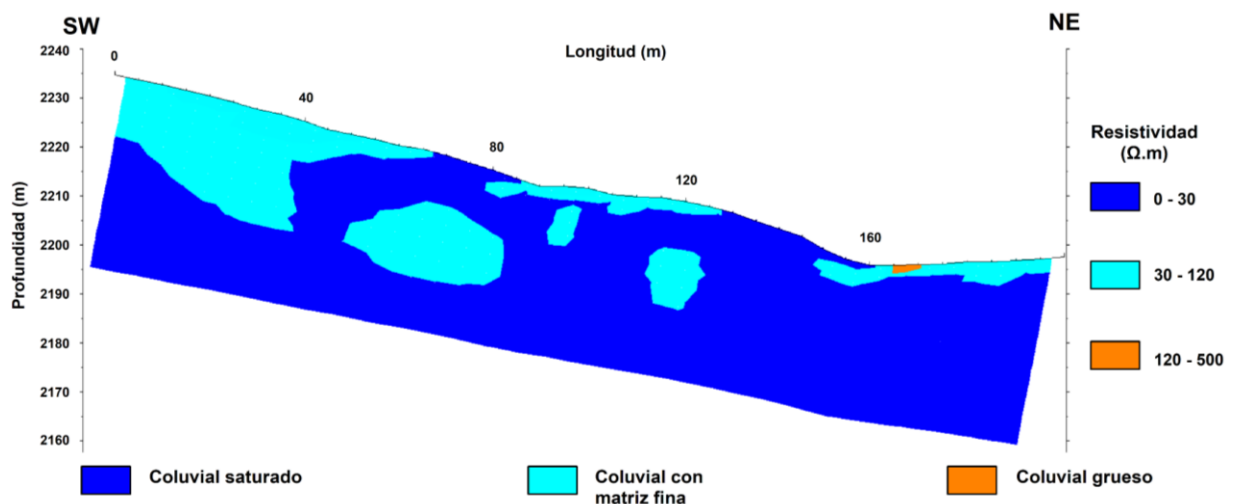
La TRE-12 (Figura 39) alcanzó una profundidad de 40 metros aproximadamente con una variación de valores de resistividad que van de 1 a 500 $\Omega\cdot\text{m}$ aproximadamente. En su mayoría se observan zonas de tonalidad azul que representan el material coluvial saturado ($\leq 30 \Omega\cdot\text{m}$), dicha saturación tiene mayor espesor a partir de la abscisa 90 hasta los 100 metros. A su vez, se visualizan tonalidades celestes que concuerdan con coluvial con matriz fina (30-120 $\Omega\cdot\text{m}$). Por otro lado, a partir de la abscisa 120 metros de la parte este del perfil, los valores de resistividad aumentan debido a la presencia de coluvial grueso (120-500 $\Omega\cdot\text{m}$) representado por las tonalidades naranjas.

Figura 39. TRE 12 (Parte baja).



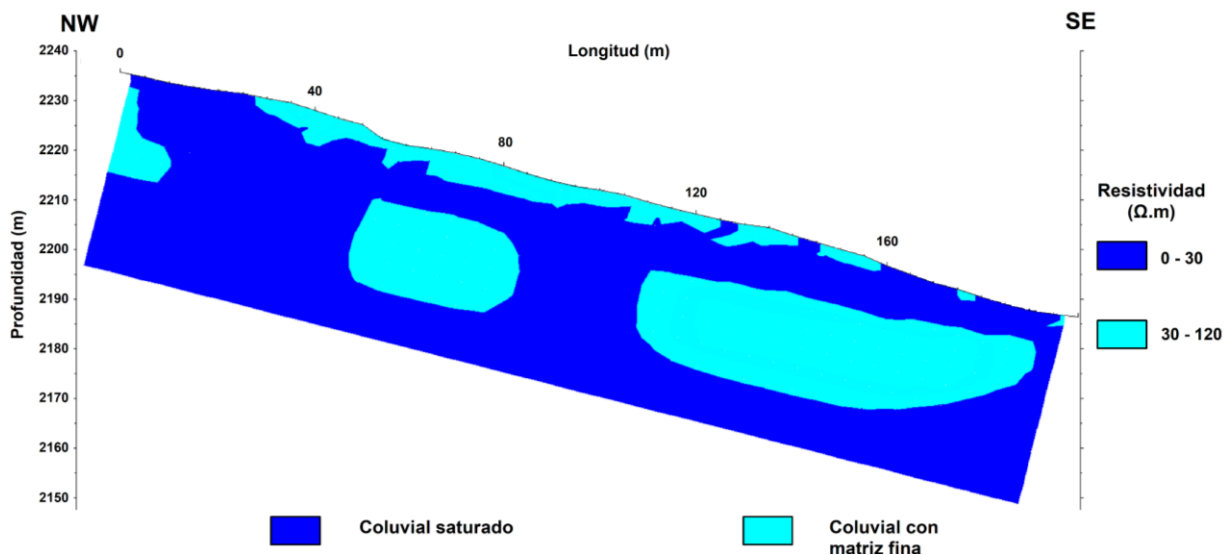
La TRE-13 (Figura 40) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividades entre 1.00 a 250 $\Omega \cdot m$ aproximadamente. A lo largo del perfil de SW-NE se aprecian coluviales saturados de coloración azul, teniendo bajos valores de resistividad ($\leq 30 \Omega \cdot m$). En medio del coluvial saturado se puede apreciar tonalidades celestes que evidencian la presencia de material coluvial con matriz fina (30-120 $\Omega \cdot m$) y luego en la abscisa 165 a la 170 con un espesor de aproximadamente 2 metros se visualiza que los valores de resistividad aumentan con una coloración naranja que evidencian la presencia de coluvial grueso (120-500 $\Omega \cdot m$).

Figura 40. TRE 13 (Parte baja).



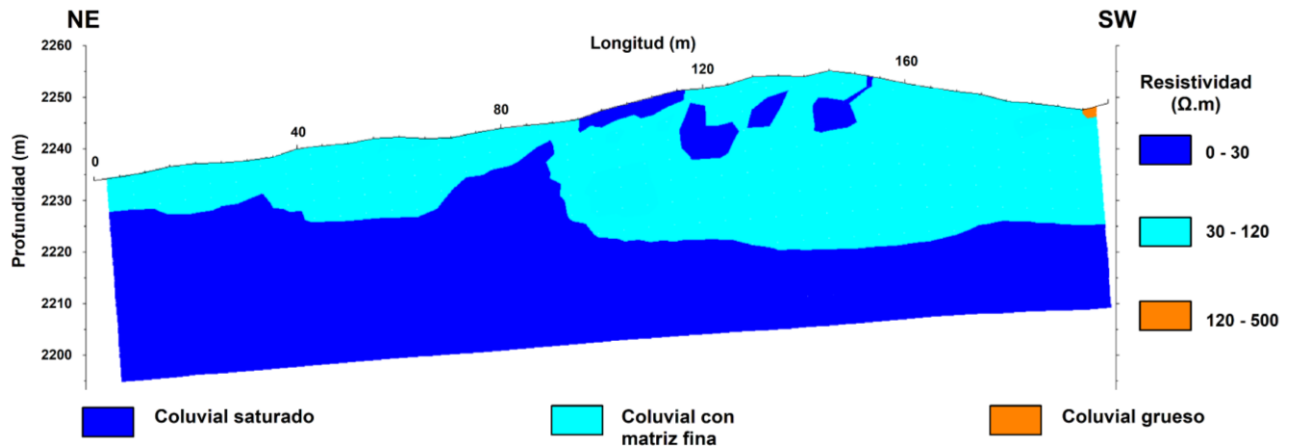
La TRE-14 (Figura 41) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 1 a 120 $\Omega\cdot m$ aproximadamente. A lo largo del perfil de NW-SE se observa una zona de coluviales saturados ($\leq 30 \Omega\cdot m$). Los valores de resistividad aumentan evidenciando el material coluvial matriz fina (30-120 $\Omega\cdot m$), el cual se presenta en la zona superficial desde la abscisa 30 a 160 con un espesor de aproximadamente de 5 metros, también se visualiza en el NW del perfil y en la abscisa 55 a 85 con un espesor mayor a 10 metros. Finalmente, esta coloración celeste se observa a partir de la abscisa 115 a 195 con un espesor de 18 metros aproximadamente.

Figura 41. TRE 14 (Parte baja).



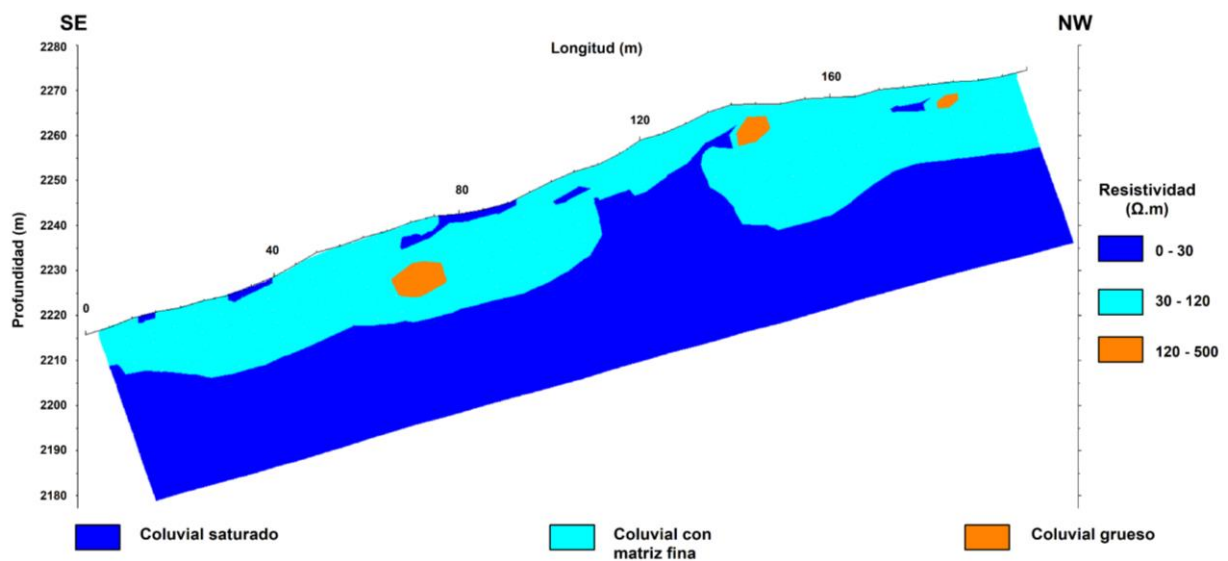
La TRE-15 (Figura 42) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 1 a 250 $\Omega\cdot m$ aproximadamente. A lo largo del perfil de NE-SW hay zonas de coluvial saturadas de coloración azul ($\leq 30 \Omega\cdot m$), las cuales se encuentran en la superficie que se evidencian en campo como manantiales y a partir de los 7 metros de profundidad hasta la abscisa 90 se visualiza una capa saturada con un espesor de 30 metros, luego de esa abscisa el espesor disminuye hasta los 17 metros aproximadamente. En la parte superficial hay tonalidades celestes (30-120 $\Omega\cdot m$) que evidencian coluviales con matriz fina y en la parte superficial una pequeña zona de coluvial grueso (120-500 $\Omega\cdot m$).

Figura 42. TRE 15 (Parte baja).



La TRE-16 (Figura 43) alcanzó una profundidad de 40 metros con una variación de valores de resistividad entre 1 a 500 $\Omega\cdot m$ aproximadamente. A lo largo del perfil SE-NW se observan zonas de coluvial saturadas en la superficie y una capa ($\leq 30 \Omega\cdot m$) de aproximadamente 25 metros de espesor, encima de dicha capa se encuentra una zona de coloración celeste (30-120 $\Omega\cdot m$) con un espesor de 15 metros que representa al material coluvial con matriz fina. De la abscisa 65 a la 75 la resistividad de los materiales aumenta debido a la presencia de coluvial grueso (120-500 $\Omega\cdot m$) que se visualiza en tonalidades naranjas.

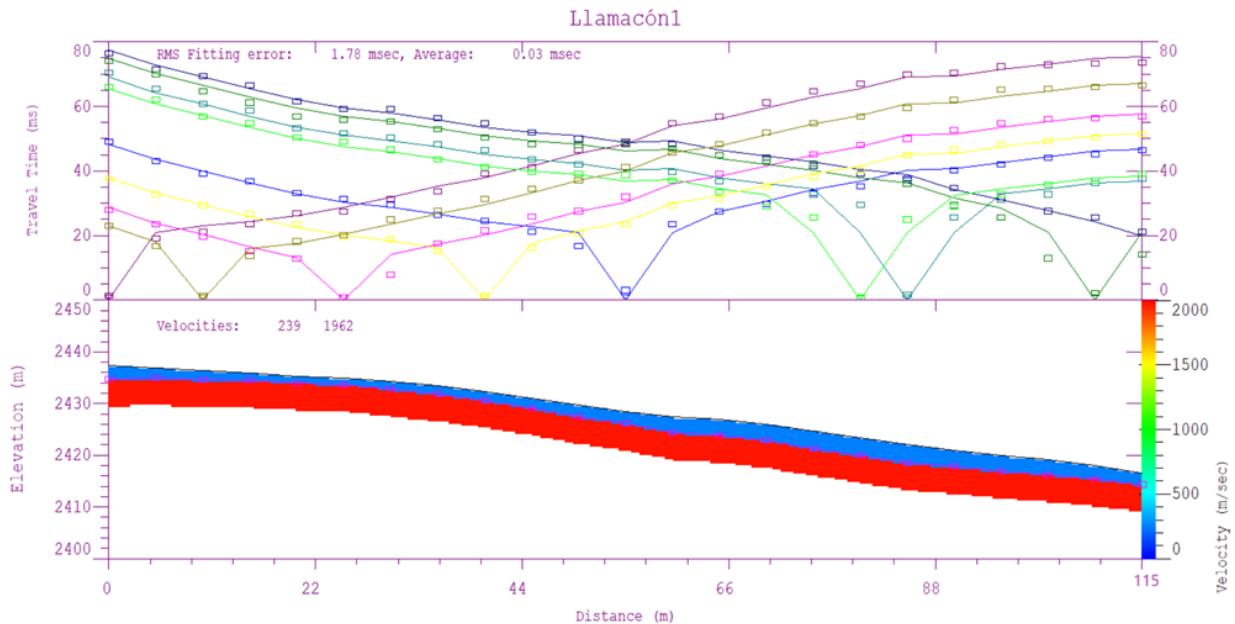
Figura 43. TRE 16 (Parte baja).



4.1.2.4 Sísmica de refracción

El ensayo de sísmica de refracción (Figura 44) alcanzó una profundidad de 8 metros y una extensión longitudinal de 115 metros (ver Figura 19). A lo largo de este perfil se diferencian 2 capas. En la primera capa se observan velocidades de 250 m/s aproximadamente con un espesor de 3 metros correspondiente a suelo coluvial de matriz fina (arcillo limosa). Cabe añadir que en la zona donde se realizó el ensayo se encontraba saturada, por lo cual al emplear este método geofísico existiría una limitante ya que las velocidades de las ondas P aumentan significativamente con la presencia de fluidos y no se podrían identificar los diferentes niveles de saturación. A una profundidad de 3 metros se encuentra la segunda capa con velocidades promedio de propagación de ondas "P" de alrededor de 2000 m/s y un espesor de 5 metros, correspondiente a suelo coluvial compuesto principalmente por clastos y material más grueso.

Figura 44. Ensayo de Sísmica de refracción.



4.1.3 SLIDE

Para calcular el factor de seguridad en el programa SLIDE, se requirió obtener el valor de los parámetros geomecánicos como el ángulo de fricción interna y cohesión que serán estimados

a partir de los valores de resistividades, tomando el valor mínimo de cada rango (Tabla 7), para la consideración de condiciones conservadoras.

Tabla 7. *Rango de resistividades para Llamacón.*

Rangos de resistividades		
	0 - 30	Coluvial Saturado
	30 - 120	Coluvial con matriz fina
	120 - 500	Coluvial grueso
	500 - 2000	Roca semi alterada (Esquisto)

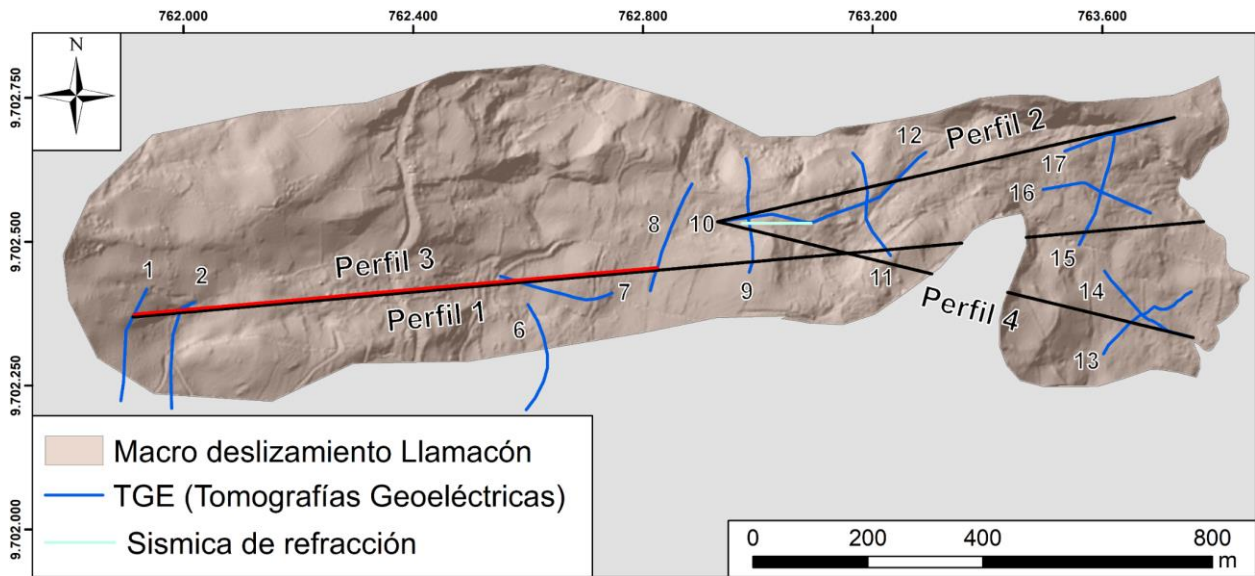
Además de los parámetros antes mencionados se requirió conocer el peso específico (Tabla 8), propiedad intrínseca de cada material, que se obtuvo mediante estudios previos realizados en la presa Mazar.

Tabla 8. *Parámetros Geomecánicos de Llamacón.*

Rangos de resistividad	Resistividad	Ángulo de fricción interno (°)	Cohesión (KN/m²)	Peso Específico (g/cm³)
0 - 30	10	17.5	22.5	1.7
30 - 120	30	22.6	24.3	2
120 - 500	120	29.1	32.6	2.2
500 - 2000	500	35.9	67.4	2.4

Para el análisis de la inestabilidad del macro deslizamiento Llamacón, se realizaron 4 perfiles en sentido E-W (Figura 45), el perfil 1 (Figura 46 y Figura 47) evaluando todo el macro deslizamiento, perfil 2 (Figura 48 y Figura 49) y perfil 4 (Figura 52 y Figura 53) analizando la parte baja de Llamacón y el perfil 3 (Figura 50 y Figura 51) parte media y alta de la zona de estudio. Estos valores se compararán con los rangos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), para el FS de corte mínimo.

Figura 45. Ubicación de los perfiles realizados a lo largo del macro deslizamiento Llamacón.



Para el cálculo factor de seguridad, se tomaron en cuenta taludes en condición estática y pseudo estáticas, en donde la demanda sísmica para los análisis pseudo estáticos es el 60% de la aceleración máxima en el terreno (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015), que en el caso de Llamacón es 0.25 (valor máximo), siendo 0.15 el valor usado para el cálculo.

Figura 46. Perfil 1 en condiciones estáticas.

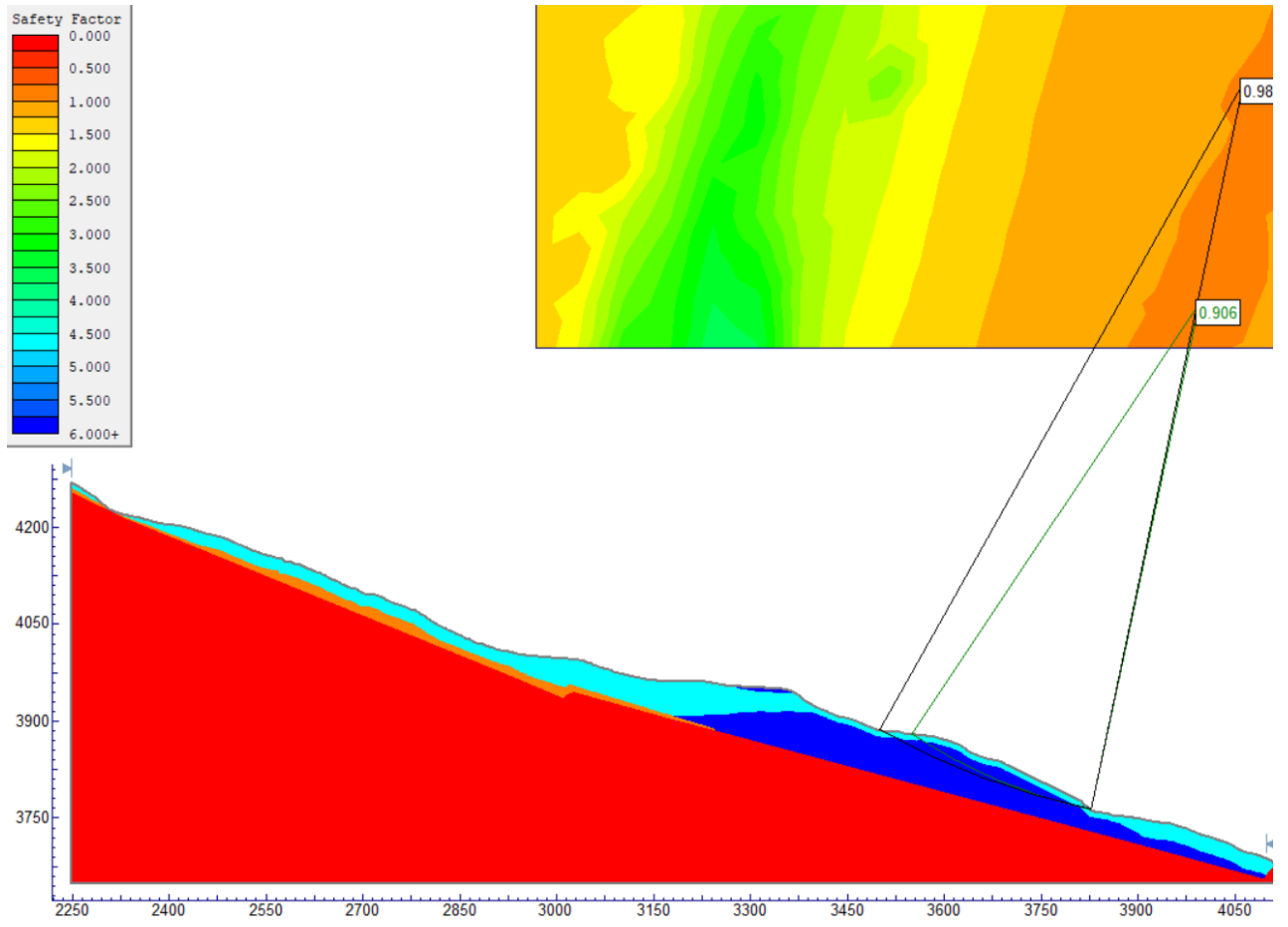
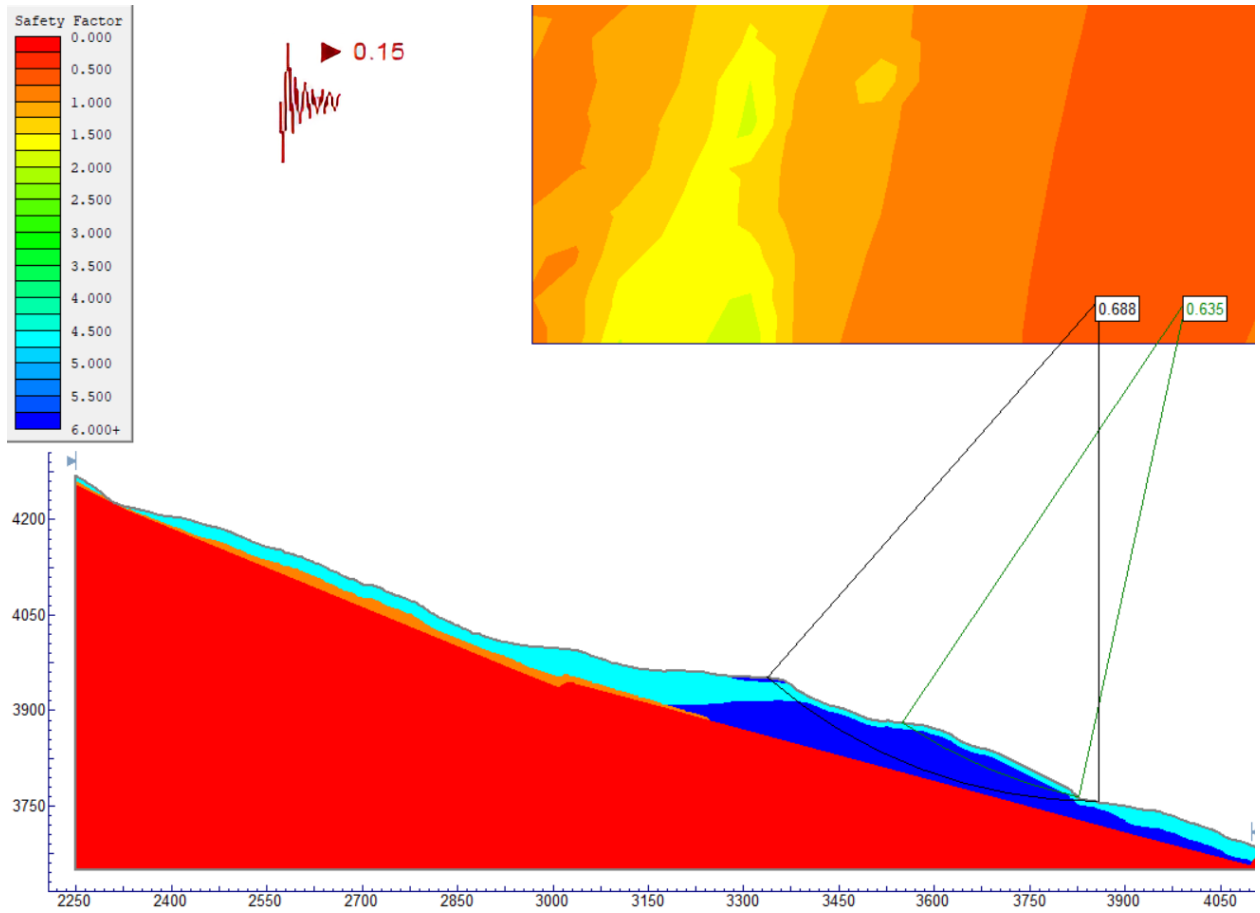


Figura 47. Perfil 1 en condiciones pseudo estáticas.



El perfil 2 correspondiente a la Figura 48 y Figura 49, se encuentra ubicado en sentido SW-NE en la parte baja del macro deslizamiento, alcanzando una longitud aproximada de 800 metros y una altura desde la base de 285 metros.

Figura 48. Perfil 2 en condiciones estáticas.

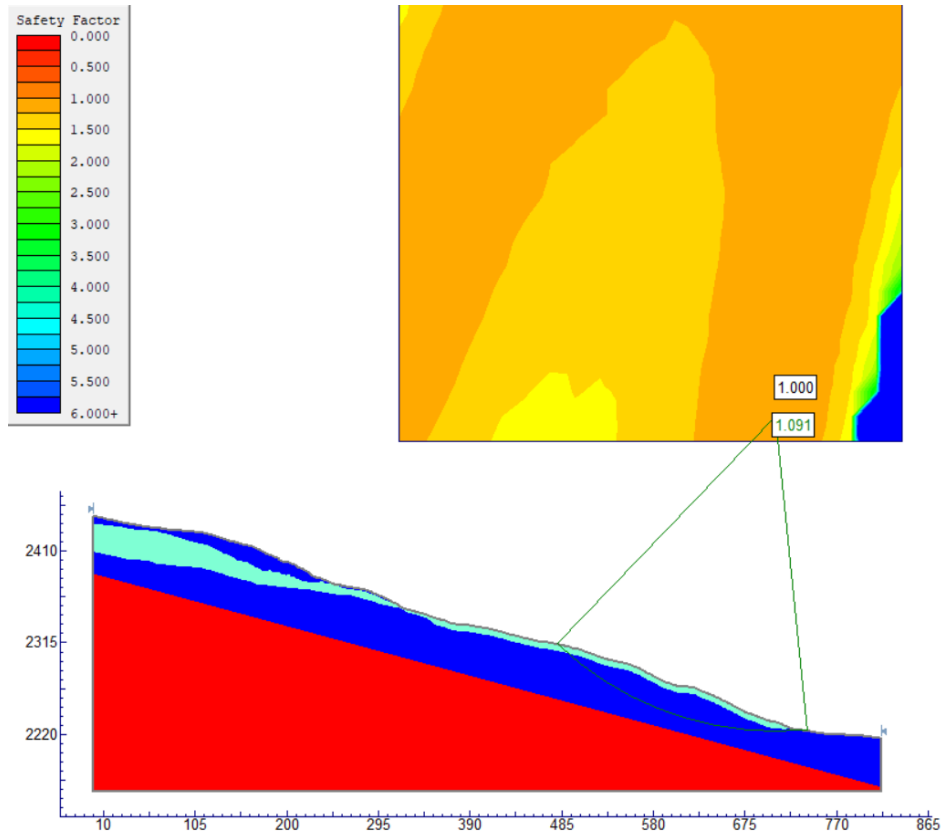
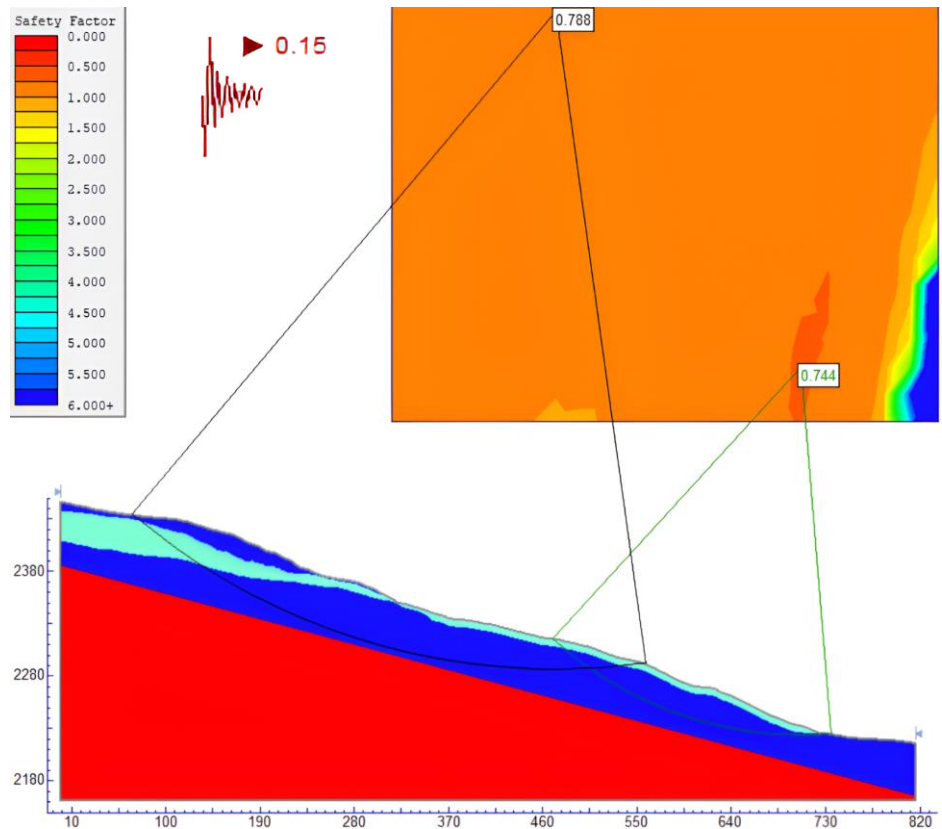


Figura 49. Perfil 2 en condiciones pseudo estáticas.



El perfil 3 correspondiente a la Figura 50 y Figura 51, se encuentra ubicado en sentido SW-NE en la parte alta y media del macro deslizamiento, con una extensión longitudinal aproximada de 950 metros y una altura desde la base de 370 metros.

Figura 50. Perfil 3 en condiciones estáticas.

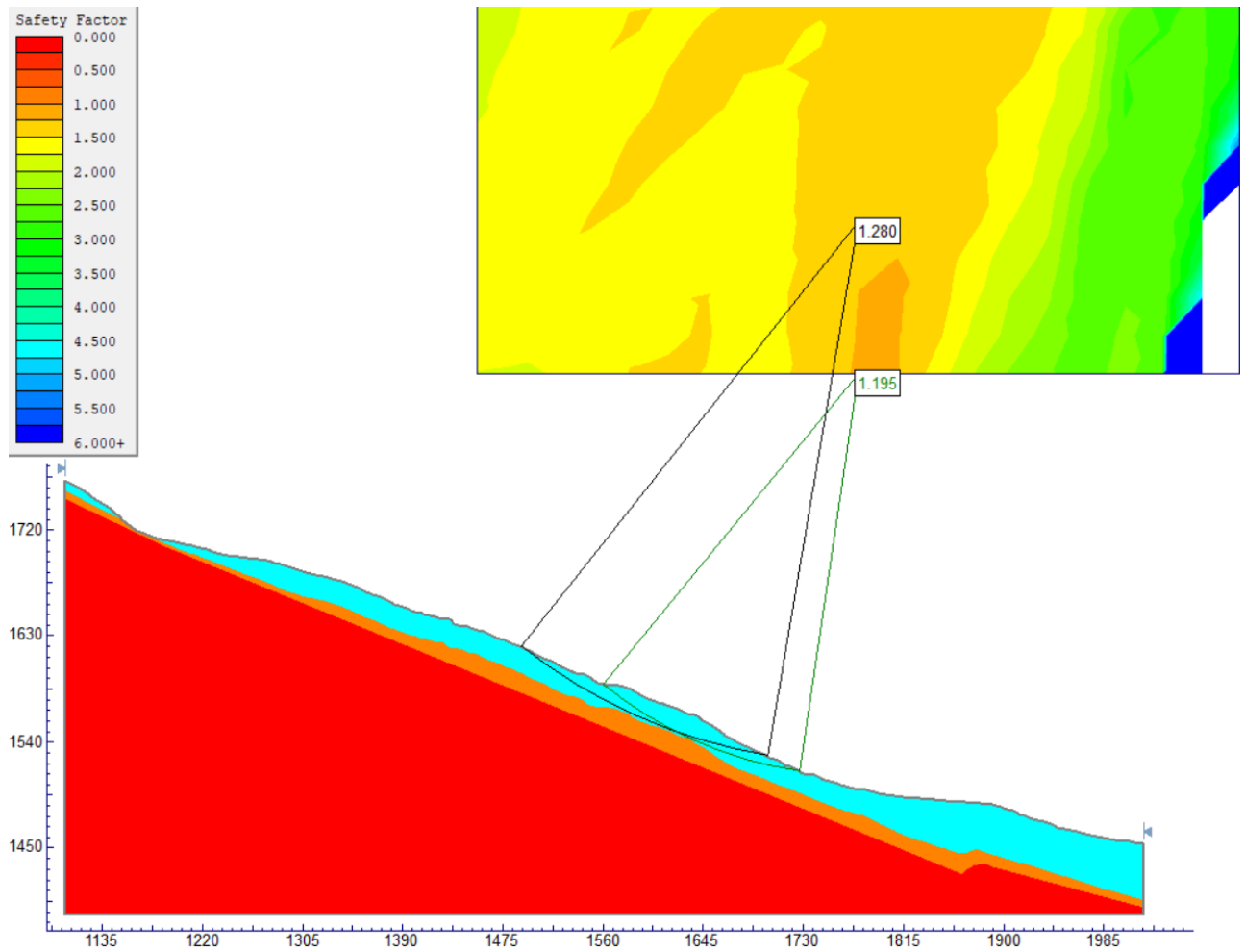
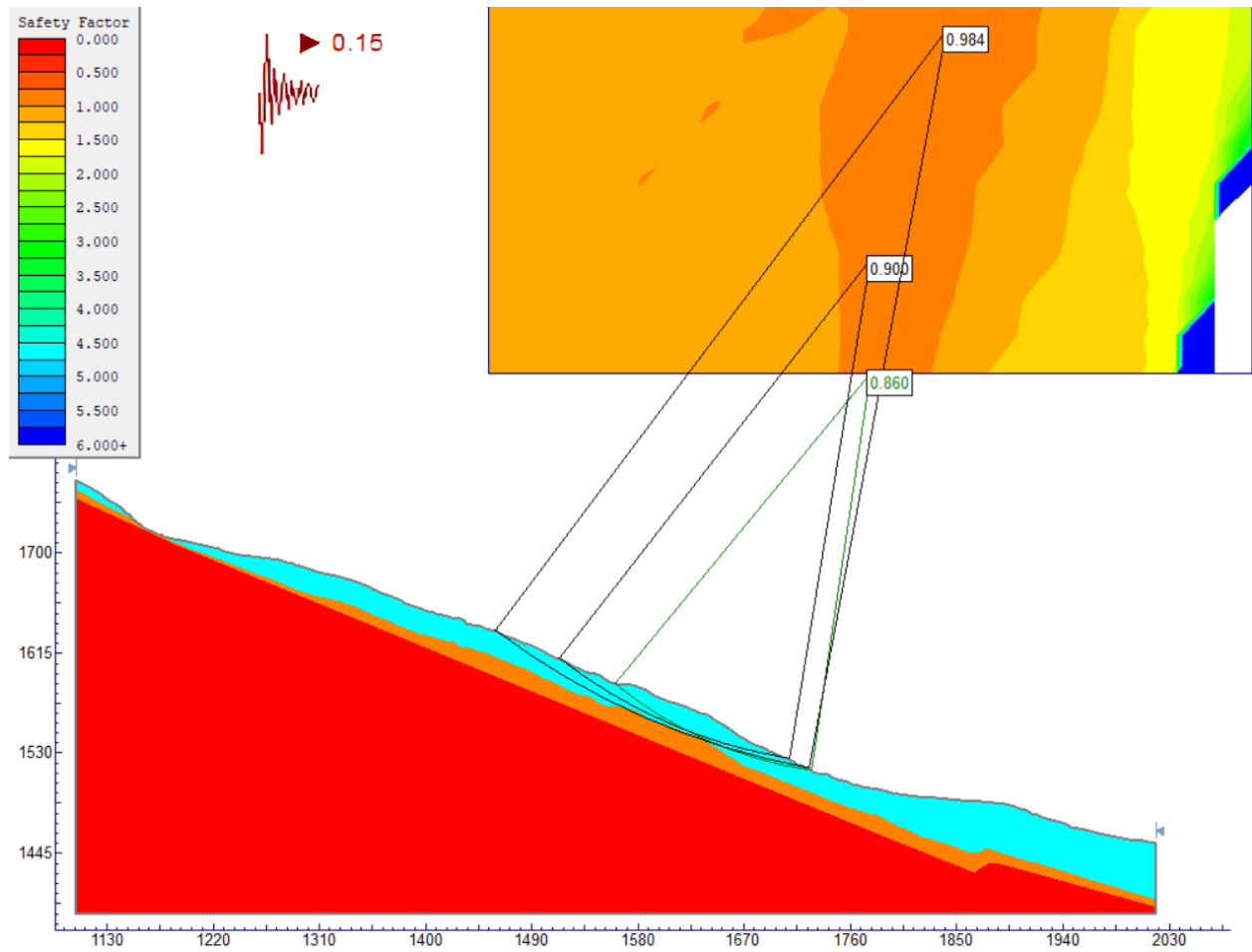


Figura 51. Perfil 3 en condiciones pseudo estáticas.



El perfil 4 correspondiente a la Figura 52 y Figura 53, se encuentra ubicado en sentido NW-SE en la parte baja del macro deslizamiento Llamacón, con una extensión longitudinal aproximada de 850 metros y una altura desde la base de 320 metros.

Figura 52. Perfil 4 en condiciones estáticas.

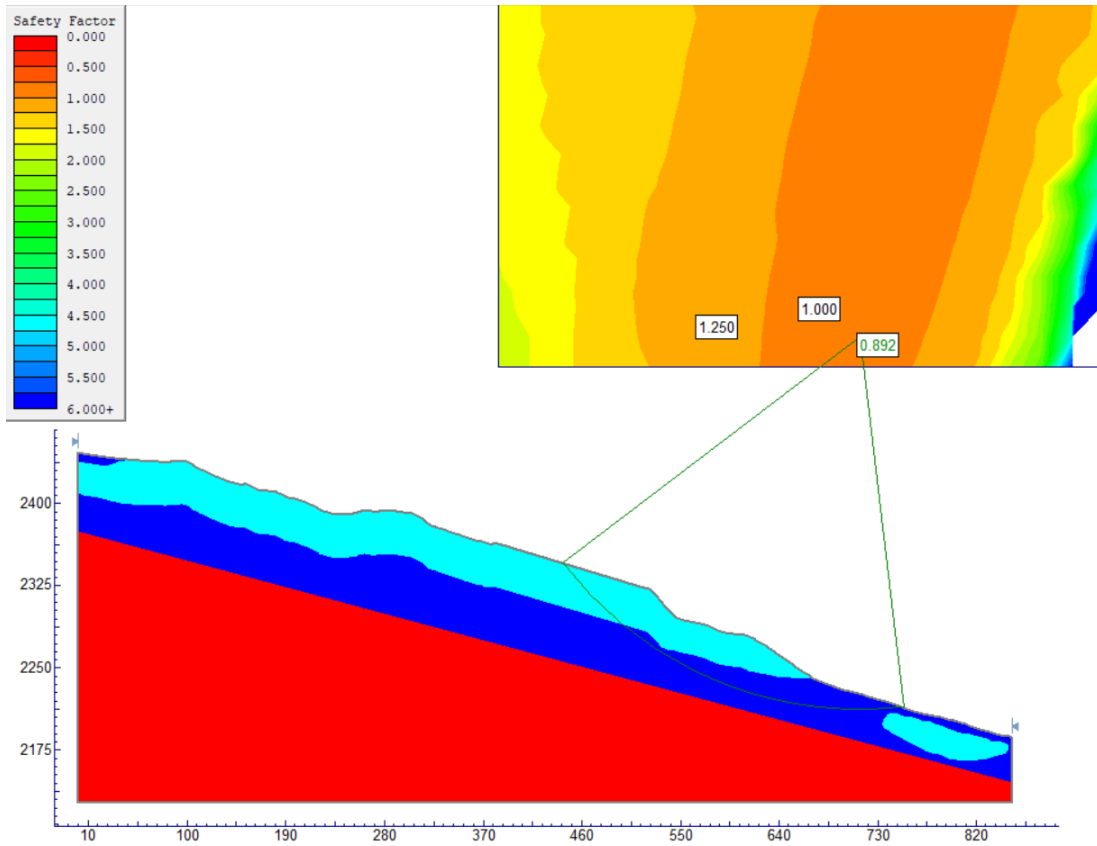
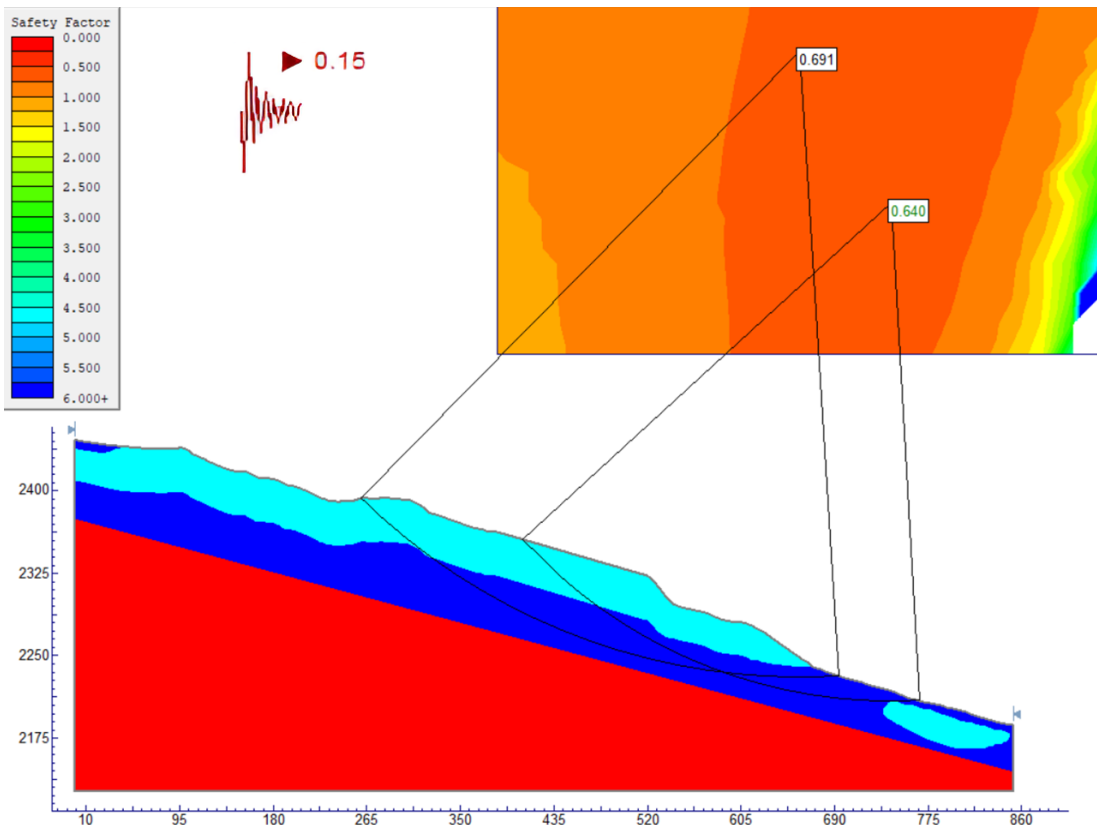


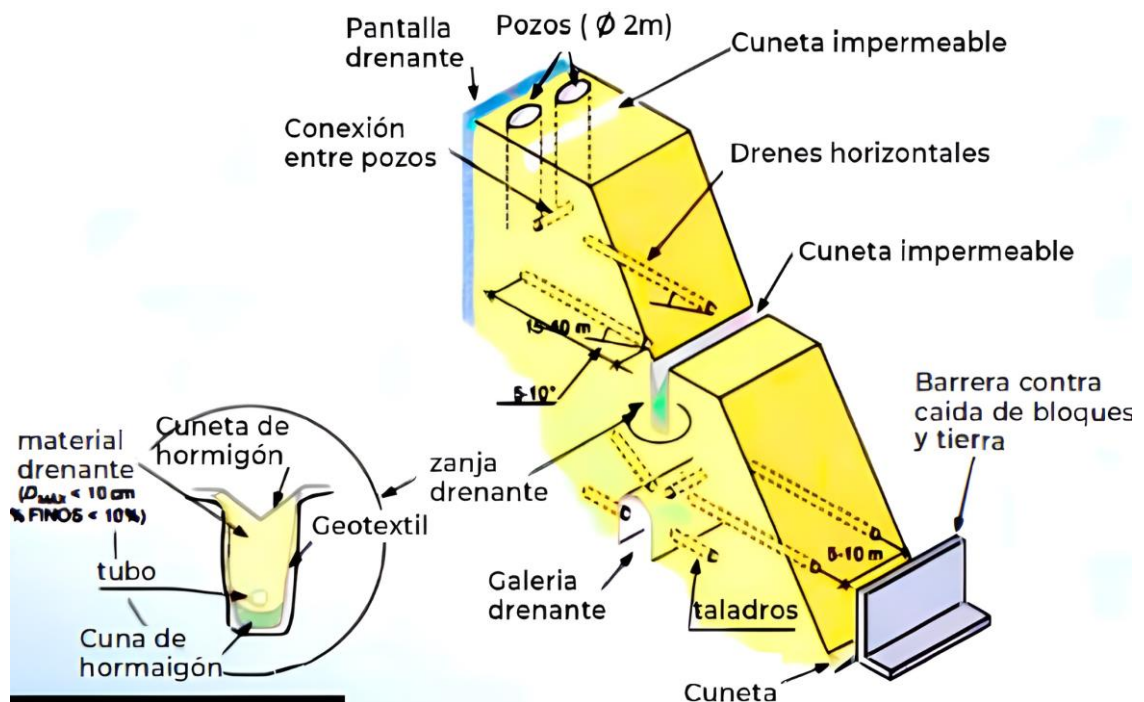
Figura 53. Perfil 4 en condiciones pseudo estáticas.



4.1.4 Planteamiento de estrategias de mitigación

En base a criterio de expertos, donde se ha tomado en cuenta un enfoque multidisciplinario como el geológico, geotécnico y geofísico (Figura 54), se han planteado las siguientes estrategias de mitigación (Figura 55). Cabe recalcar que estos resultados y propuestas son preliminares, ya que en una fase posterior del proyecto se realizarán los estudios a mayor profundidad (mayor a 40m) para el diseño de las medidas de mitigación. El alcance del presente proyecto es el planteamiento de estrategias generales en base a la profundidad de investigación obtenida.

Figura 54. Estrategias: drenaje y protección de taludes.



Nota. Datos tomados de Gonzales De Vallejo (2004).

4.1.4.1 Pozos de agua

Construcción de pozos de extracción de 20 a 30 metros en la parte media del macro deslizamiento dado que se tiene información de la profundidad del macizo rocoso, esto ayudaría a reducir la saturación de la zona y favorecería el desarrollo sostenible de la comuna de Llamacón.

Además, se recomienda la implementación de piezómetros a una profundidad estimada entre 20 a 30 metros en la parte media para monitorear como varía el nivel freático en temporada de lluvia y época de estiaje.

4.1.4.2 Reconformación del talud

En base al alcance de los estudios realizados en este proyecto, esta estrategia se colocaría en la parte baja del macro deslizamiento, cercano a la TRE 12 (Figura 39) donde la pendiente es aproximadamente 26.57° . Esta estrategia permitiría suavizar las pendientes, creando zonas menos susceptibles a la erosión debido a que el agua de escorrentía se desplaza más lentamente. Sumado a esto, se reducen las fuerzas que actúan sobre el talud como la gravedad, estabilizando la zona y permitiendo implementarla con otras estrategias como la construcción de pozos (Gonzales De Vallejo, 2004).

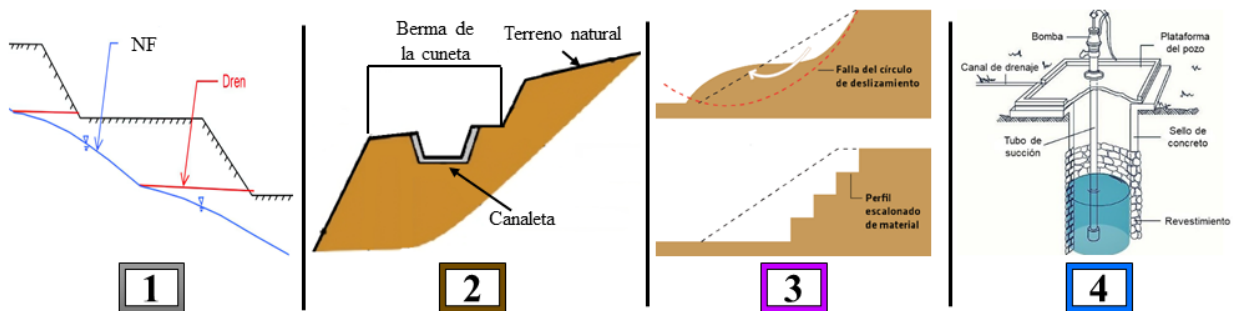
4.1.4.3 Canaletas

Como estrategias preventivas y de mitigación para los tomadores de decisión, se recomienda colocar las canaletas en la parte media y baja del macro deslizamiento, permitiendo dirigir y controlar la escorrentía superficial, evitando que el agua se acumule en áreas críticas del talud, y reduciendo la infiltración. Una de las principales ventajas es su bajo coste de implementación y son relativamente fáciles de mantener, lo que asegura su efectividad a largo plazo (Gonzales De Vallejo, 2004).

4.1.4.4 Drenes

Esta alternativa se colocaría en la base de Llamacón ya que permite evacuar el agua al interior del talud, mejorando la resistencia de los materiales y disminuyendo las presiones intersticiales en el suelo, que es uno de los principales factores de desestabilización. Al reducir estas presiones se mejora la resistencia y se minimiza el riesgo de deslizamientos (Gonzales De Vallejo, 2004).

Figura 55. Planteamiento de estrategias de mitigación planteadas en el macro deslizamiento Llamacón.

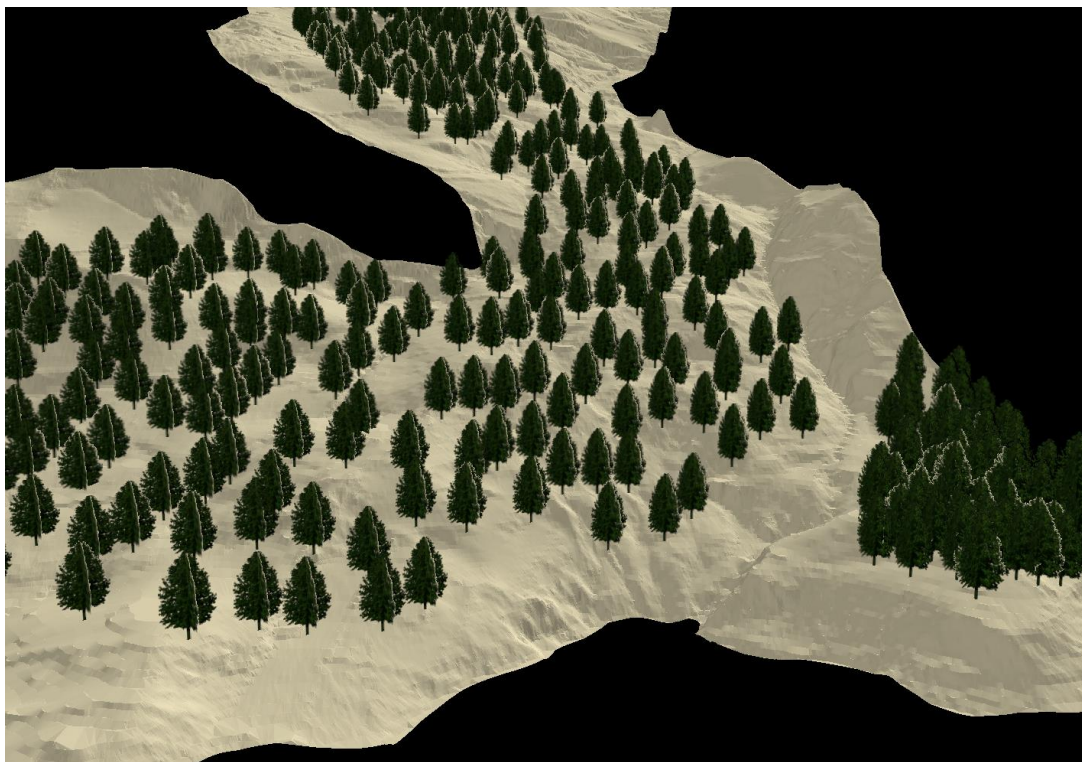


Nota. 1: Drenes en el pie del macro deslizamiento, 2: Canaletas, 3: Reconformación de taludes y 4: pozos de extracción de agua. Modificado de Smet & Van Wijk (2002).

4.1.4.5 Reforestación

Se recomienda implementar reforestación (Figura 56) en todo el macro deslizamiento con un enfoque principal en la parte baja, como una solución a largo plazo con especies vegetales autóctonas de la zona, puesto que ayuda a mejorar la estabilización del suelo, absorbe la humedad y previene la erosión.

Figura 56. Visión conceptual de reforestación.



4.2 Discusión

Para el estudio del macro deslizamiento Llamacón se realizaron 17 TRE, de las cuales se ubicaron 5 en la parte alta, 3 en la parte media y 9 en la parte baja. A esta última zona se le dio un enfoque prioritario debido al movimiento anual registrado, lo cual es monitoreado por personal de CELEC EP, en donde se han registrado desplazamientos de más de 1000 mm / año.

Por otro lado, mediante las TRE realizadas en las partes alta y media, se pudieron observar valores de resistividad más altos, los cuales varían de 500 – 2000 $\Omega\cdot m$ representando la capa de roca (esquistos) y 250 – 500 $\Omega\cdot m$ que corresponde a coluvial grueso (con bloques).

Lo observado en las TRE se correlaciona con la inspección de campo realizada, en la que se logró identificar rodados métricos y capas de coluvial grueso, especialmente en la parte alta y media del macro deslizamiento, y en menor medida en la parte baja del mismo. La composición de los rodados se determinó mediante una descripción con lupa, encontrando minerales como cuarzo, hornblenda, plagioclasas y feldespatos.

Sin embargo, de acuerdo con el mapa geológico de la zona y la topografía del sector, la única formación que se encuentra aflorando tanto en la zona de estudio como en sus alrededores es la formación El Pan, la cual está compuesta por esquistos.

En cuanto a la interpretación de las TRE, se ha podido identificar que los mayores valores de resistividad se encuentran en la parte alta y media del macro deslizamiento, presentando en la parte alta valores de resistividad entre 20 a 2000 $\Omega\cdot m$ aproximadamente, esto debido a la presencia de la capa de esquisto y andesita. A su vez, analizando las TRE de la parte media, existen patrones rangos que se repiten, con la diferencia de que el grado de saturación aumenta un poco en ciertas zonas de forma superficial y se observa plegamiento en la capa de esquisto.

En contraste con la zona alta y media de Llamacón, la parte baja presenta rangos de resistividad que varían de 1 a 500 $\Omega\cdot m$, donde los valores más altos describen la presencia de bloques y rocas centimétricas de esquistos en la base del talud de Llamacón. Los valores bajos de

resistividad representan la saturación que existe en toda esta zona, esto se encuentra respaldado con la saturación de todo el terreno que fue visualizado en campo.

Otro método geofísico que se utilizó fue la sísmica de refracción. Se realizó 1 ensayo en la misma zona que la TRE 10 para así poder correlacionarlos. En este ensayo se obtuvieron velocidades de 300 y 2000 m/s, los cuales corresponden a suelos coluviales de grano fino, principalmente de composición arcillosa, y suelos coluviales gruesos, que presentan mayor contenido de clastos, respectivamente.

Es importante recalcar que la capacidad de penetración de dicho ensayo fue menor de lo esperado, ya que solo se logró alcanzar 8 metros aproximadamente, esto debido a que el principio de la sísmica de refracción permite pasar de un medio con menor velocidad a un medio con mayor velocidad, pero no viceversa. Esto fue corroborado con la TRE debido a que debajo de la capa de suelos coluviales más gruesos y húmedos se encontraba una capa saturada, lo que disminuía la velocidad de propagación de las ondas y a su vez no permitía a la sísmica una mayor penetración.

En el cálculo del factor de seguridad en Slide se creó un modelo que represente la distribución de las capas en el terreno, integrando datos estructurales como rumbo y buzamiento tomados en campo. Para elaborar el perfil en Slide se creó un modelo que satisfaga lo visto en campo, además de los datos obtenidos en las tomografías, en donde por ejemplo en la TRE 07, se podía observar a las capas plegándose. Basados en todos estos datos se realizaron perfiles que posteriormente fueron ingresados al programa Slide, asignándoles los parámetros geomecánicos calculados previamente a partir de la correlación entre las resistividades y dichos parámetros, logrando así obtener un factor de seguridad para taludes en condición estática de 0.98 para el perfil 1 y factor de seguridad de 1.091 para el perfil 2, 1.195 para el perfil 3 y 0.892 para el perfil 4, siendo este último el menor valor obtenido. Estos resultados se corroboran con los vistos en campo ya que al SE de la parte baja del macro deslizamiento (donde se ubica el perfil 4) se encontró una zona con terrenos no cohesivos (arcillosos) saturados que presentaban licuefacción.

Para una valoración más integral, se tomaron en cuenta taludes en condiciones pseudo estáticas. En la zona de Llamacón el coeficiente sísmico es de 0.25, pero para el cálculo se considera el 60% de este valor, debido a que estos son los rangos máximos que se encuentran en la zona y se trata de no sobreestimar las condiciones sísmicas. El factor de seguridad obtenido para el perfil 1, perfil 2, perfil 3 y perfil 4 fueron 0.635, 0.744, 0.86 y 0.64 respectivamente.

Analizando estos valores, se puede concluir que están muy por debajo de los estándares establecidos por el NEC en donde establece que para taludes estáticos el factor mínimo de seguridad es de 1.5 y para taludes pseudo estáticos el factor mínimo es de 1.05 (Tabla 9). En base a la información procesada de las TRE, es posible indicar que en la zona de estudio podrían ocurrir dos tipos de deslizamientos, en la parte superior y media del área del tipo rotacional, debido a que se presentan en las TRE variación en los valores de resistividad, valores bajos (materiales saturados, suelos cohesivos como arcillas) y en la parte inferior la resistencia es alta (capa de roca dura o materiales no cohesivos). En la parte baja, los tipos de deslizamientos que podrían generarse son del tipo flujos de tierra debido a las zonas de baja resistividad que representan material desplazado (material saturado de agua o arcilloso) y la variación de la resistividad según la concentración de agua a lo largo de la pendiente.

Tabla 9. Comparación entre el FS NEC y el FS obtenido

Elemento evaluado	Factor de Seguridad (FS)	
	Estático	Pseudo estático
NEC	1.5	1.05
Perfil 1	0.908	0.635
Perfil 2	1.091	0.744
Perfil 3	1.195	0.86
Perfil 4	0.892	0.64

Nota. Datos tomados del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2015).

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

En el macro deslizamiento Llamacón se identificaron 2 tipos de litologías, esquistos, y material coluvial con bloques de roca, este último con diferentes grados de saturación y tipologías de clastos. En la parte baja del área de estudio se registraron zonas saturadas, escarpes y pendientes pronunciadas (30–45°) como factores determinantes en la inestabilidad del sector.

El análisis de las TRE indica que en la zona de estudio pueden ocurrir deslizamientos rotacionales en las zonas altas y medias de la región de estudio, debido a la presencia de suelos cohesivos saturados (como arcillas) y una capa subyacente de alta resistividad, probablemente roca dura. En la parte baja, podrían presentarse flujos de tierra, asociados a materiales saturados de baja resistividad, como suelos desplazados o arcillosos.

La correlación geológica/geofísica permitió identificar los diferentes materiales del subsuelo basado en los valores de resistividad, determinando en la parte baja zonas saturadas de 5–40 metros de espesor (coluvial saturado) con resistividades $\leq 30 \Omega \cdot m$. En la parte alta, se determinó la presencia de material coluvial con zonas de saturación locales de 5-7 metros de espesor aproximadamente, que se observaban en superficie como manantiales, además en la parte media se visualizaron bloques de esquistos con resistividades de 500 – 2000 $\Omega \cdot m$.

Al Este del área de estudio, se registraron los mínimos valores de FS correspondiente al perfil 4 en condiciones estáticas (Figura 52) y pseudo estáticas (Figura 53) con valores de 0.89 y 0.64 respectivamente, evidenciando la inestabilidad en el pie del talud según la NEC, donde se establecieron estrategias de mitigación como la construcción de canaletas y drenes. Además, debido al espesor del coluvial saturado en la parte media se recomienda la construcción de pozos de agua de 20 a 30 metros que reduzcan la saturación y favorezcan el desarrollo sostenible de la comunidad.

5.2 Recomendaciones

- Realizar ensayos geofísicos complementarios que permitan correlacionar las TRE realizadas. Métodos geofísicos como el Sondeo Electromagnético Transitorio (TDEM), el cual puede alcanzar profundidades mayores a los 100 metros, que permitirían observar el contacto entre el material coluvial y el esquisto en la parte baja del macro deslizamiento, mejorando la precisión en el modelamiento de la distribución de las capas subsuperficiales.
- Los datos obtenidos en campo fueron tomados en época de estiaje, por ende, se recomienda realizar ensayos geofísicos en época de lluvia para poder realizar una comparación sobre la variación de los FS obtenidos.
- Realizar más ensayos de TRE al NE de la zona de estudio, para ajustar la proyección de las capas en el análisis de estabilidad de taludes.
- Se recomienda realizar una reforestación que ayude a la prevención de la erosión y estabilización del suelo.
- En cuanto a la limitación del estudio, es importante señalar que este trabajo se centra específicamente en la realización de ensayos de TRE, los cuales tienen como objetivo evaluar las condiciones geológicas hasta una profundidad determinada. Dado que se trata de una tesis de grado, el alcance de este estudio está enfocado en el levantamiento geofísico, sin entrar en una caracterización detallada de las capas subyacentes. Por lo tanto, los resultados obtenidos se limitan a la interpretación geofísica de las áreas evaluadas, sin abordar estudios más complejos o exhaustivos.
- Los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna se estimaron debido a la falta de ensayos geotécnicos directos a mayor profundidad. Por lo tanto, se recomienda realizar ensayos geotécnicos a muestras obtenidas mediante calicatas y perforaciones que permitan corroborar dichos parámetros estimados y así obtener un FS más preciso.

6. Bibliografía

- ABEM. (2016). *User Manual Terrameter LS2*. <https://www.guidelinegeo.com/support-service-advice-training/resource-center/>
- Banegas, H., & Calderón, M. (2012). *Informe Anual de Monitoreo Año - 2012*.
- Bianchizza, C., & Frigerio, S. (2013). Domination of or adaptation to nature? A lesson we can still learn from the Vajont. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 523–530.
- Blikra, L. H., Braathen, A., Anda, E., Stalsberg, K., & Longva, O. (2002). Rock avalanches, gravitational bedrock fractures and neotectonic faults onshore northern West Norway: Examples, regional distribution and triggering mechanisms. *Geological Survey of Norway Report, 2002*, 16.
- Bonzanigo, L., Eberhardt, E., & Loew, S. (2007). Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part I. Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(10), 1157–1180.
- Bristow, C. R. (1973). *Guide to the geology of the Cuenca Basin, southern Ecuador*. Ecuadorian Geological and Geophysical Society.
- Corominas, J., & de Caminos, I. (2004). Tipos de rotura en laderas y taludes. *Ingeniería Del Terreno Ingeoter4*. Ed: López Jimeno, Carlos. *Universidad Politécnica de Madrid*, 191–213.
- Corominas, J., & García Yagüe, A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. *IV Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables*. Granada, 3, 1051–1072.
- Corporación Eléctrica del Ecuador. (1998). *Informe Final Proyecto Hidroeléctrico Mazar*. Informe Interno.
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 43(1).
- CTN & SIGTIERRAS. (2015). *Manual de Identificación de Geoformas*. Catálogo descriptivo de

objetos geomorfológicos del Ecuador.

- Domínguez, R. Z. (1999). EL Deslizamiento de la Josefina “Tragedia Nacional.” *Obtenido de Deslizamiento de La Josefina" Tragedia Nacional": [https://Dspace.Ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30019/2/Deslizamiento% 20Josefina. Pdf](https://Dspace.Ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30019/2/Deslizamiento%20Josefina.Pdf).*
- Fernández-García, P., Mas, R., Rodas, M., del Villar, F. J. L., & Garzón, M. G. (1989). Los depósitos aluviales del Paleógeno basal en el sector suroriental de la cuenca del Duero (provincia de Segovia): Evolución y minerales de la arcilla característicos. *Estudios Geológicos*, 45(1–2), 27–43.
- Ferrer Gijon, M. (1988). Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas. *Riesgos Geológicos*, 175–201.
- Finlay, P. J., Fell, R., & Maguire, P. K. (1997). The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 811–824.
- Flores, E. P. (2011). Incidencia de la Josefina en el Cantón Paute: 1993-1995. *Escuela De Historia Y Geografía*.
- Gonzales De Vallejo. (2004). *Ingeniería geológica*. Pearson.
- Gonzalez de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación Madrid, Spain:
- Harden, C. (2001). Sediment movement and catastrophic events: The 1993 rockslide at La Josefina, Ecuador. *Physical Geography*, 22(4), 305–320.
- Jian, W., Wang, Z., & Yin, K. (2009). Mechanism of the Anlesi landslide in the three gorges reservoir, China. *Engineering Geology*, 108(1–2), 86–95.
- Jusoh, H., & Osman, S. B. S. (2017). The correlation between resistivity and soil properties as an alternative to soil investigation. *Indian Journal of Science and Technology*.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration* (Vol. 4). John Wiley & Sons.

- Litherland, M. (1994). The metamorphic belts of Ecuador. *Overseas Mem Br Geol Surv*, 11, 1–147.
- Martínez Pagán, P. (2014). *Prospección Geofísica 2. Métodos sísmicos:(principios básicos, sísmica de refracción)*.
- Matsukura, Y. (1996). The role of the degree of weathering and groundwater fluctuation in landslide movement in a colluvium of weathered hornblende-gabbro. *Catena*, 27(1), 63–78.
- Melentijevic, S. (2005). *Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada*. Caminos.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la construcción NEC - SE - GC*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Ecuador Consolida La Producción Eléctrica A Partir De Fuentes Renovables*. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/>
- Molina, G. A. R., Rinaldi, V. A., & Taborda, R. (2004). Tomografía Geo eléctrica: Desarrollo y Potenciales Aplicaciones en Geotecnia. *XVII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, SINERGIA*.
- Municipio de Paute. (2019). *Parroquia Guarainag*. <https://www.paute.gob.ec/paute/parroquias/parroquia-guarainag/>
- Oviedo-Ocaña, E. R. (2018). Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental. *Revista de La Universidad Industrial de Santander. Salud*, 50(3), 191–192.
- Ricardo, A., Sanz, V., Martí, S. S., & Orrego, A. D. (2015). Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos. *Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo, Valencia, España*, 1–5.
- Rivera, M., Piedra, R., & Paripanca, Y. (2016). Ensayos geofísicos de refracción sísmica y medición de ondas de corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de

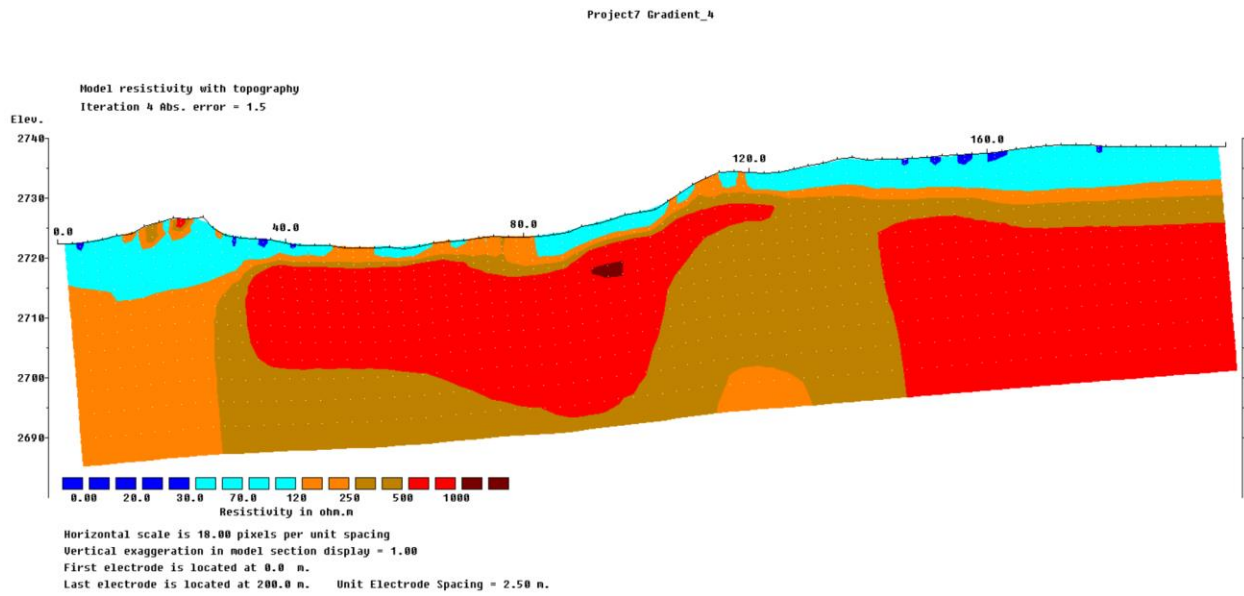
- edificaciones. *Universidad Nacional de Ingeniería*, 6.
- Robles, J., & Guzmán, P. (2017). *Informe de análisis de susceptibilidad de zonas inestables para prospección e implementación de instrumentación*. Informe Interno
- Sarkar, S., & Kanungo, D. P. (2004). An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(5), 617–625.
- Senagua-Empresa Pública ESPOL TECH. (2014). *Mapa Hidrogeológico. 1:250000*.
- Smet, J., & Van Wijk, C. (2002). Small Community Water Supplies: Technology. *People And*.
- Suarez, J. (2009). Zonificación de susceptibilidad amenaza y riesgo. *Recuperado El*, 2.
- Tarbut, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra* (Vol. 1). Pearson Educación Madrid.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- Villacís, R., & Granja, D. (2014). *Informe De Monitoreo Geológico, Macro – Deslizamiento Llamación*. Informe Interno
- Villacorta, S., Fidel, L., & Zavala Carrión, B. (2012). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 69(3), 393–399.
- Wróbel, M., Stan-Kłęczek, I., Marciniak, A., Majdański, M., Kowalczyk, S., Nawrot, A., & Cader, J. (2022). Integrated geophysical imaging and remote sensing for enhancing geological interpretation of landslides with uncertainty estimation—A case study from Cisiec, Poland. *Remote Sensing*, 15(1), 238.
- Zhou, B. (2019). Electrical resistivity tomography: a subsurface-imaging technique. *Applied Geophysics with Case Studies on Environmental, Exploration and Engineering Geophysics*.

7. Anexos

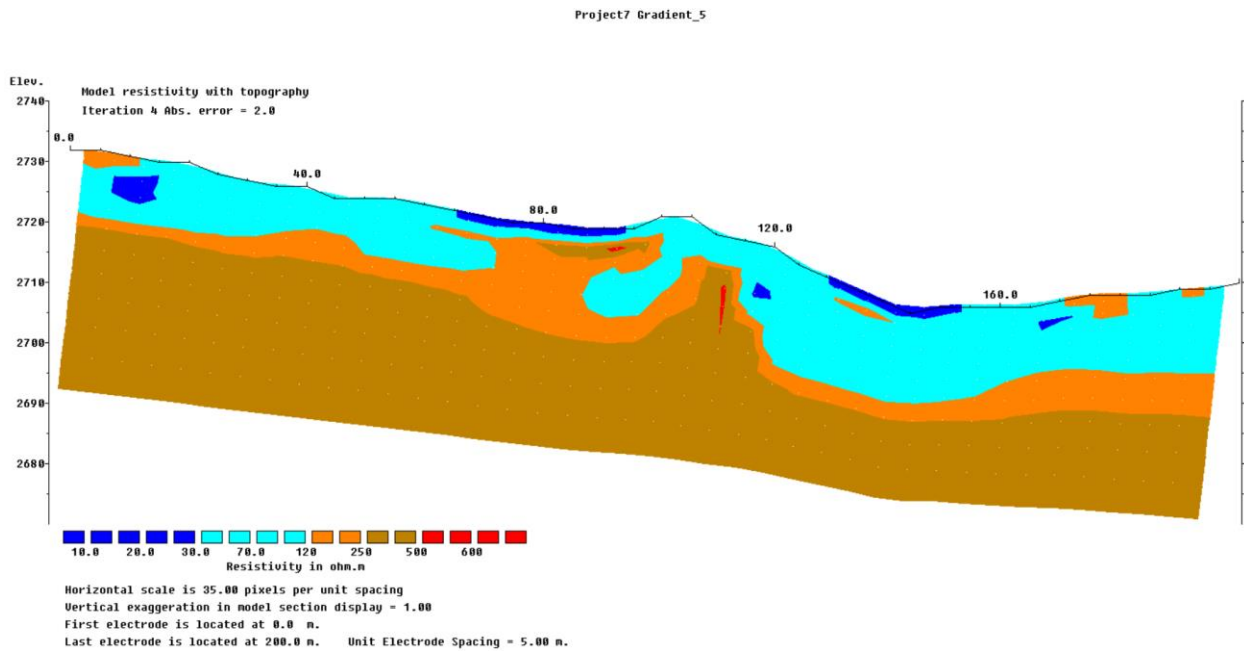
Tomografía de Resistividad Eléctricas

Parte alta

TRE 02



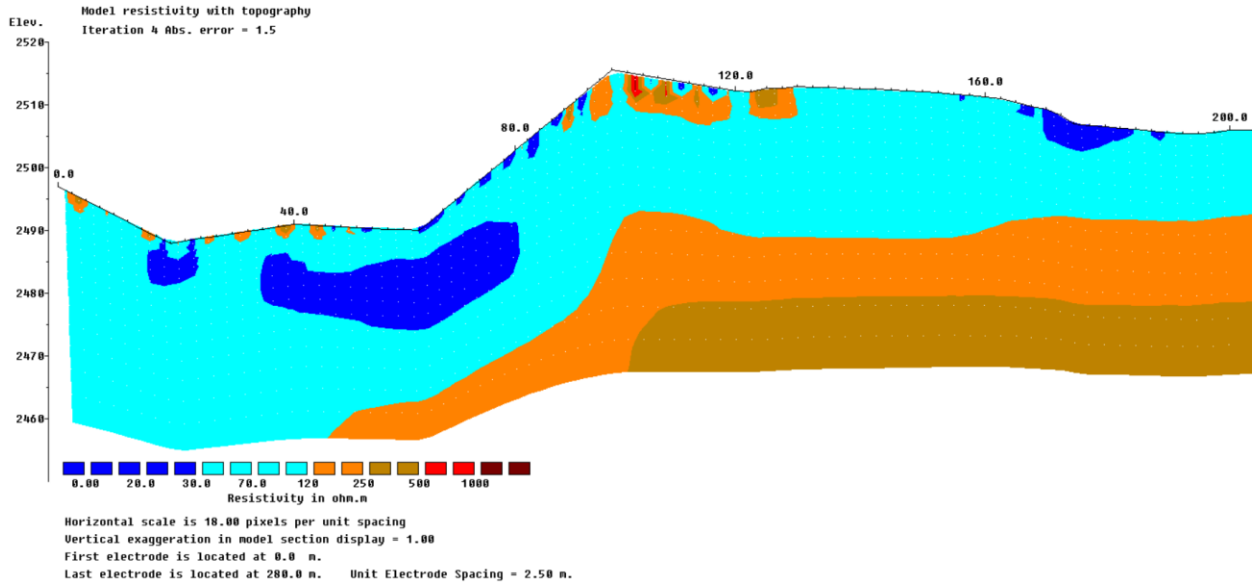
TRE 03



Parte media

TRE 06

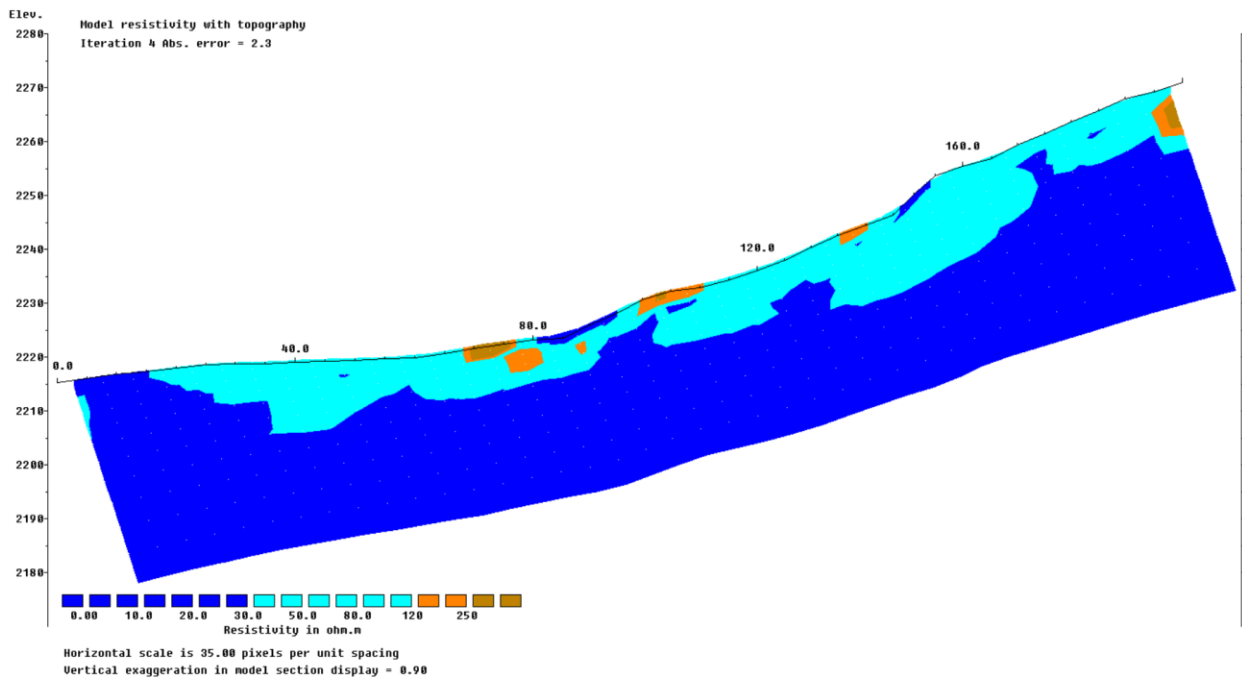
Project7 Gradient_8

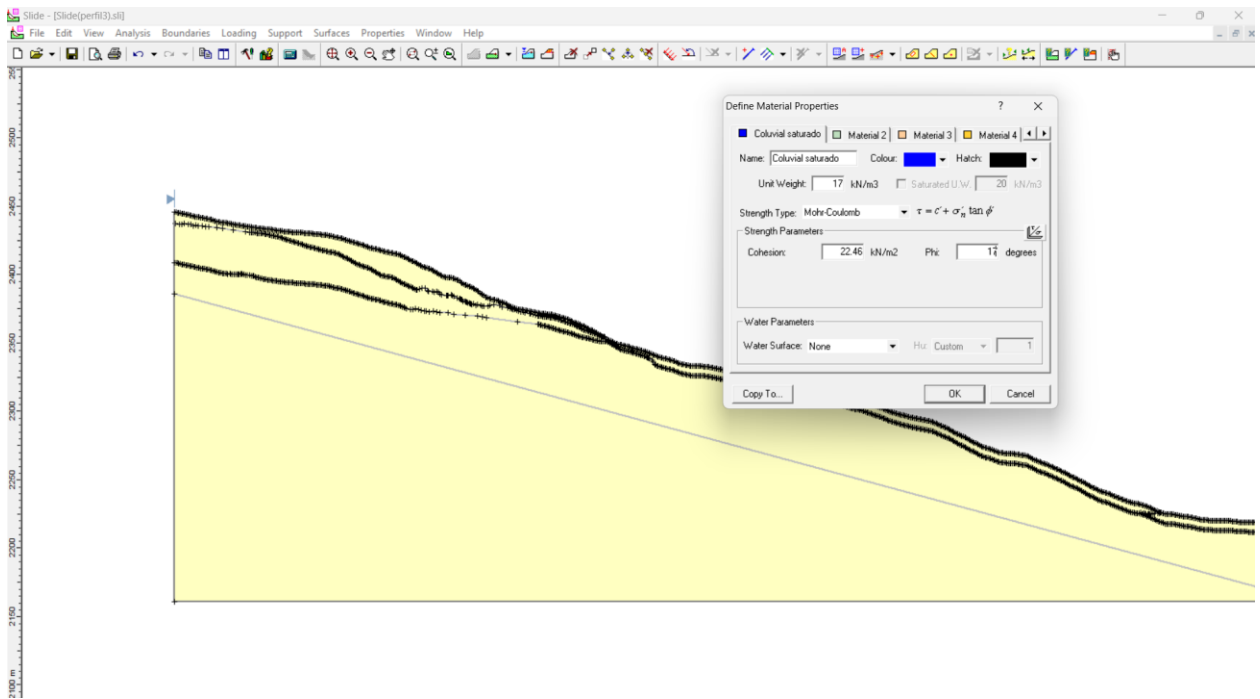
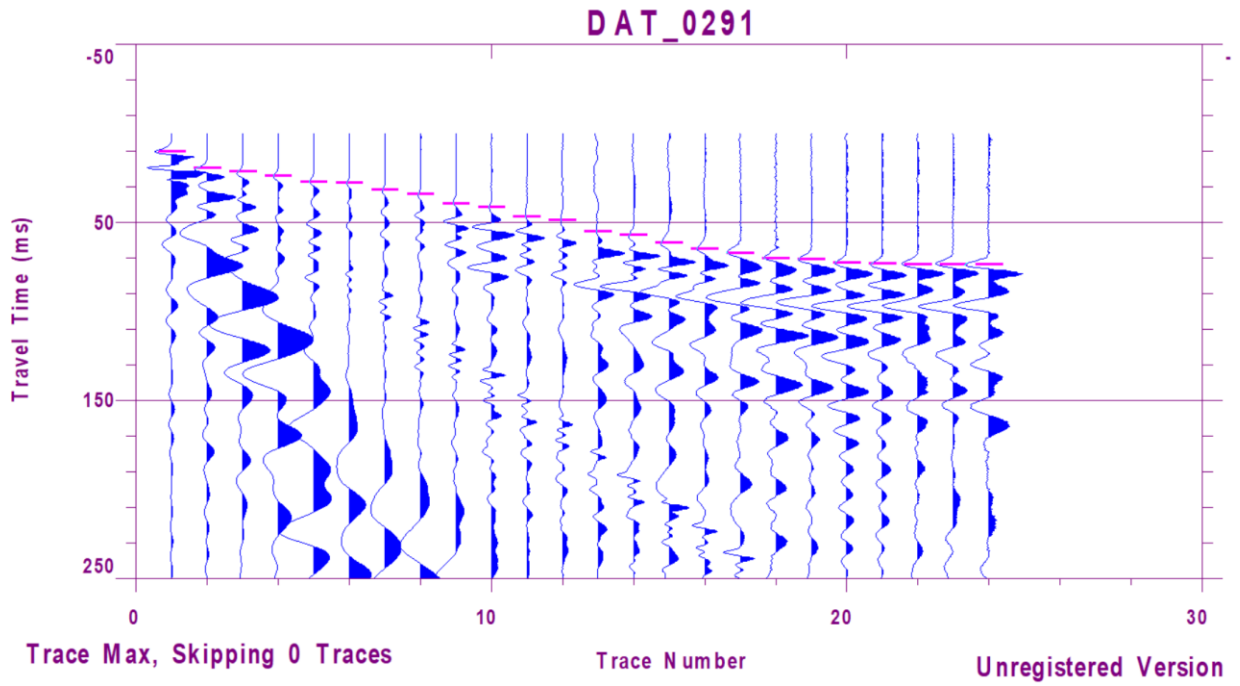


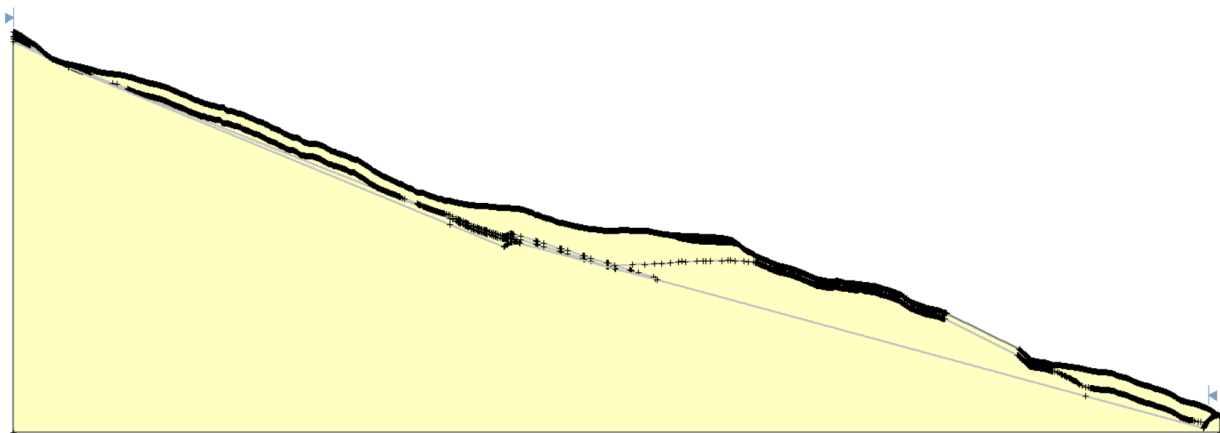
Parte baja

TRE 17

LLANACON B Gradient_9







Definición de materiales en Slide

Define Material Properties

Coluvial Saturado Coluvial húmedo Coluvial y roca seca

Name: Coluvial Saturado Colour: Blue Hatch: Black

Unit Weight: 17 kN/m³ Saturated U.W.: 20 kN/m³

Strength Type: Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters: Cohesion: 22.5 kN/m² Phi: 17 degrees

Water Parameters: Water Surface: None Hu: Custom 1

Copy To... OK Cancel

Define Material Properties

Coluvial Saturado Coluvial húmedo Coluvial y roca seca

Name: Coluvial húmedo Colour: Cyan Hatch: Black

Unit Weight: 20 kN/m³ Saturated U.W.: 20 kN/m³

Strength Type: Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters: Cohesion: 24.3 kN/m² Phi: 22.6 degrees

Water Parameters: Water Surface: None Hu: Custom 1

Copy To... OK Cancel

Define Material Properties

Coluvial húmedo Coluvial y roca seca Andesita meteorizada

Name: Coluvial y roca seca Colour: Orange Hatch: Black

Unit Weight: 22 kN/m³ Saturated U.W.: 20 kN/m³

Strength Type: Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters: Cohesion: 32.5 kN/m² Phi: 29 degrees

Water Parameters: Water Surface: None Hu: Custom 1

Copy To... OK Cancel

Define Material Properties

Andesita meteorizada Esquisto alterado Material 6

Name: Andesita meteorizada Colour: Yellow Hatch: Black

Unit Weight: 25 kN/m³ Saturated U.W.: 20 kN/m³

Strength Type: Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters: Cohesion: 44.5 kN/m² Phi: 32.6 degrees

Water Parameters: Water Surface: None Hu: Custom 1

Copy To... OK Cancel

Define Material Properties

Andesita meteorizada
 Esquisto alterado
 Material 6

Name:
 Colour:
 Hatch:

Unit Weight: kN/m3
 Saturated U.W. kN/m3

Strength Type: Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters:

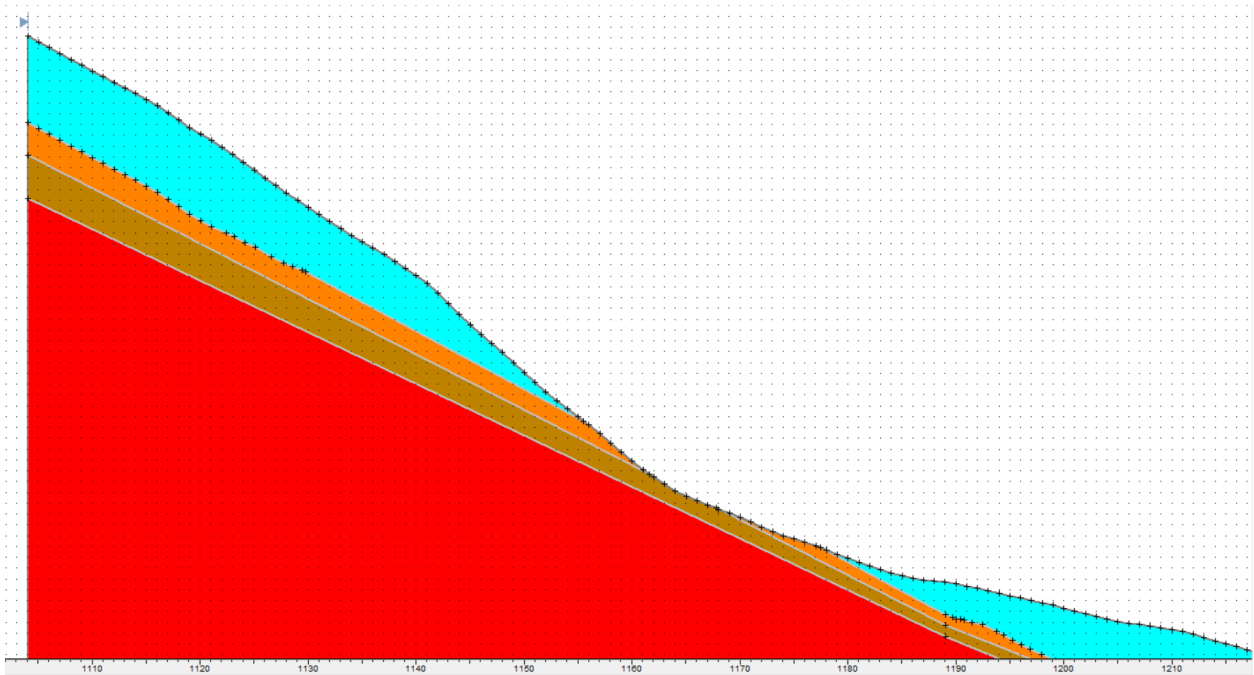
 Cohesion: kN/m2

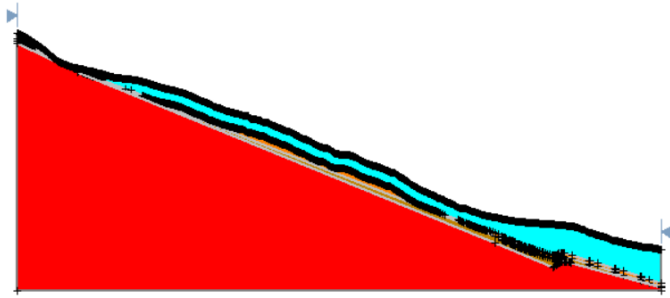
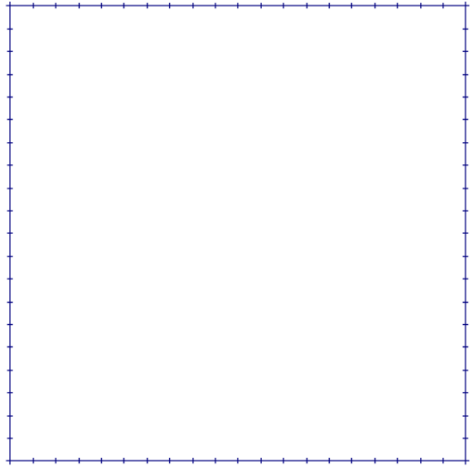
 Phi: degrees

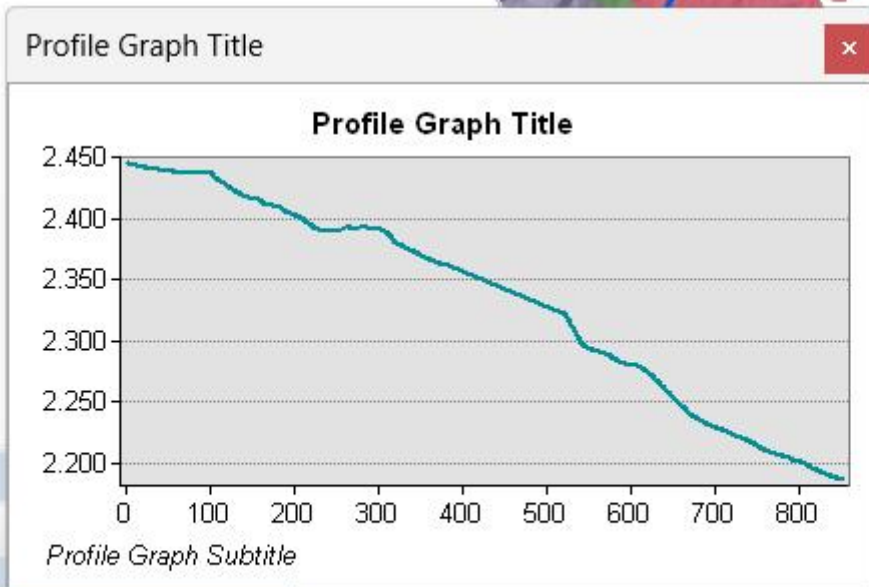
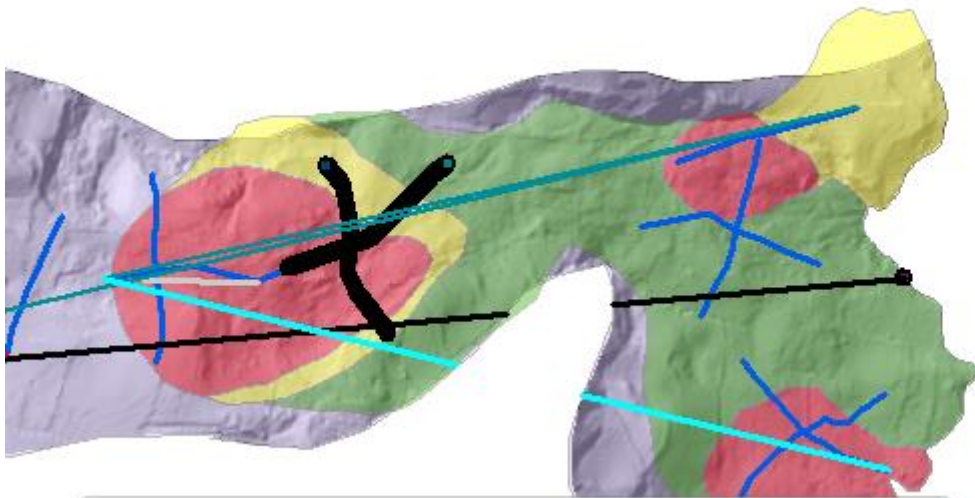
Water Parameters:

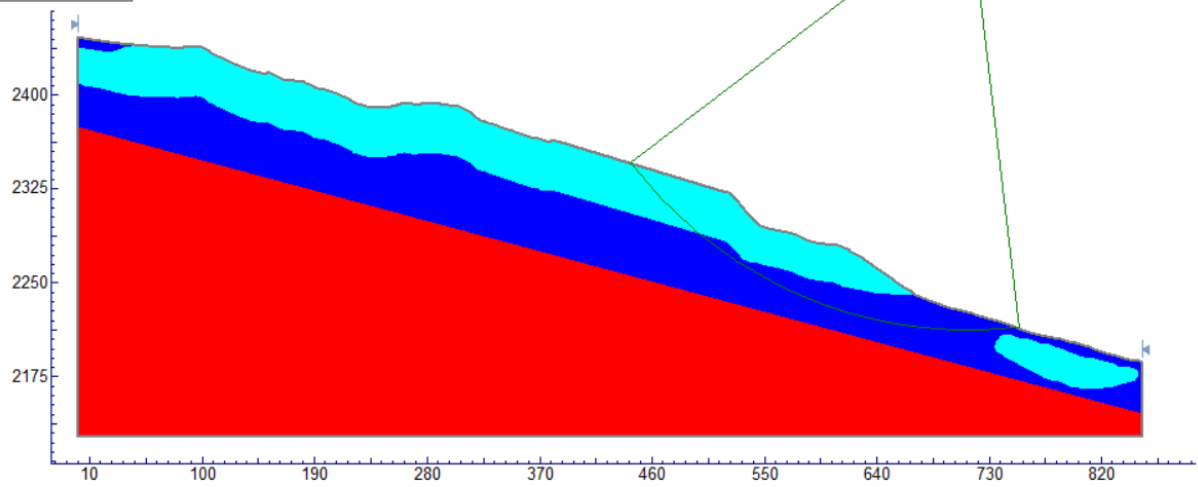
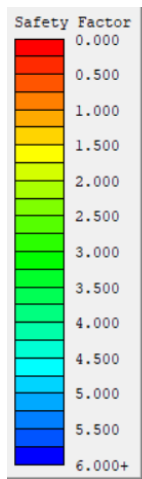
 Water Surface:

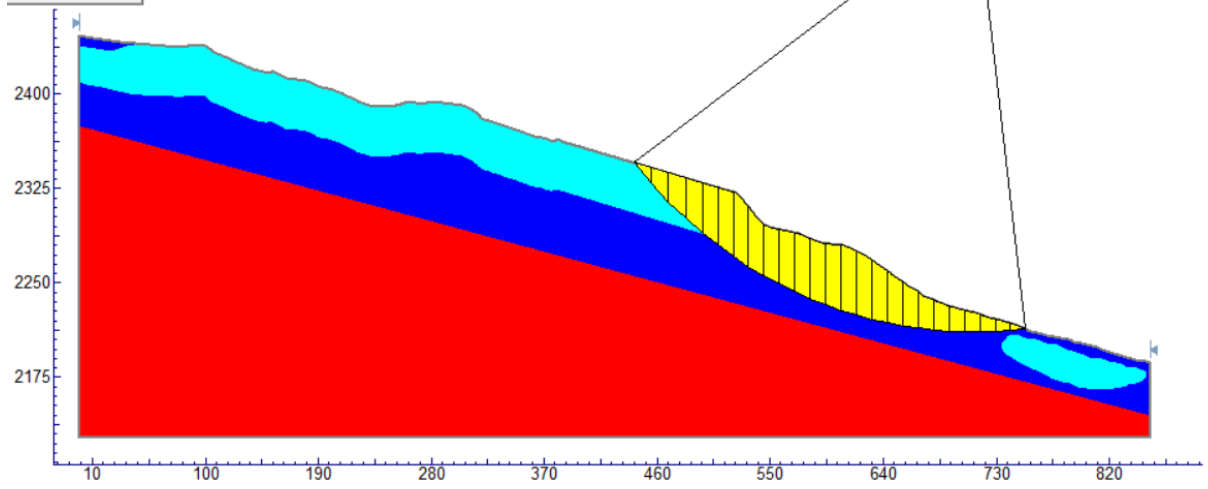
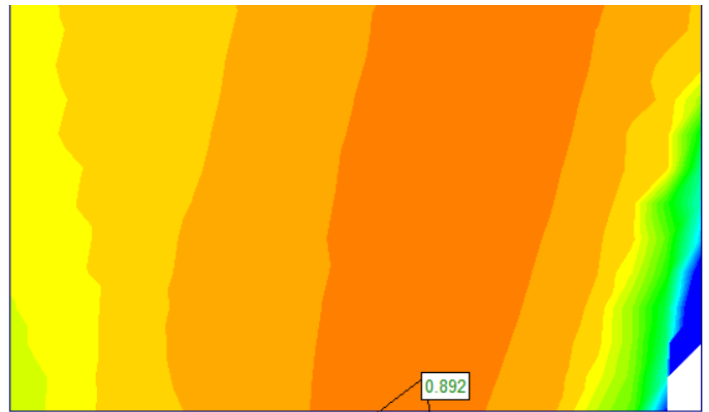
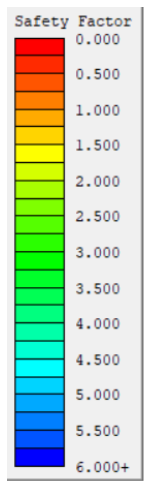
 Hr:

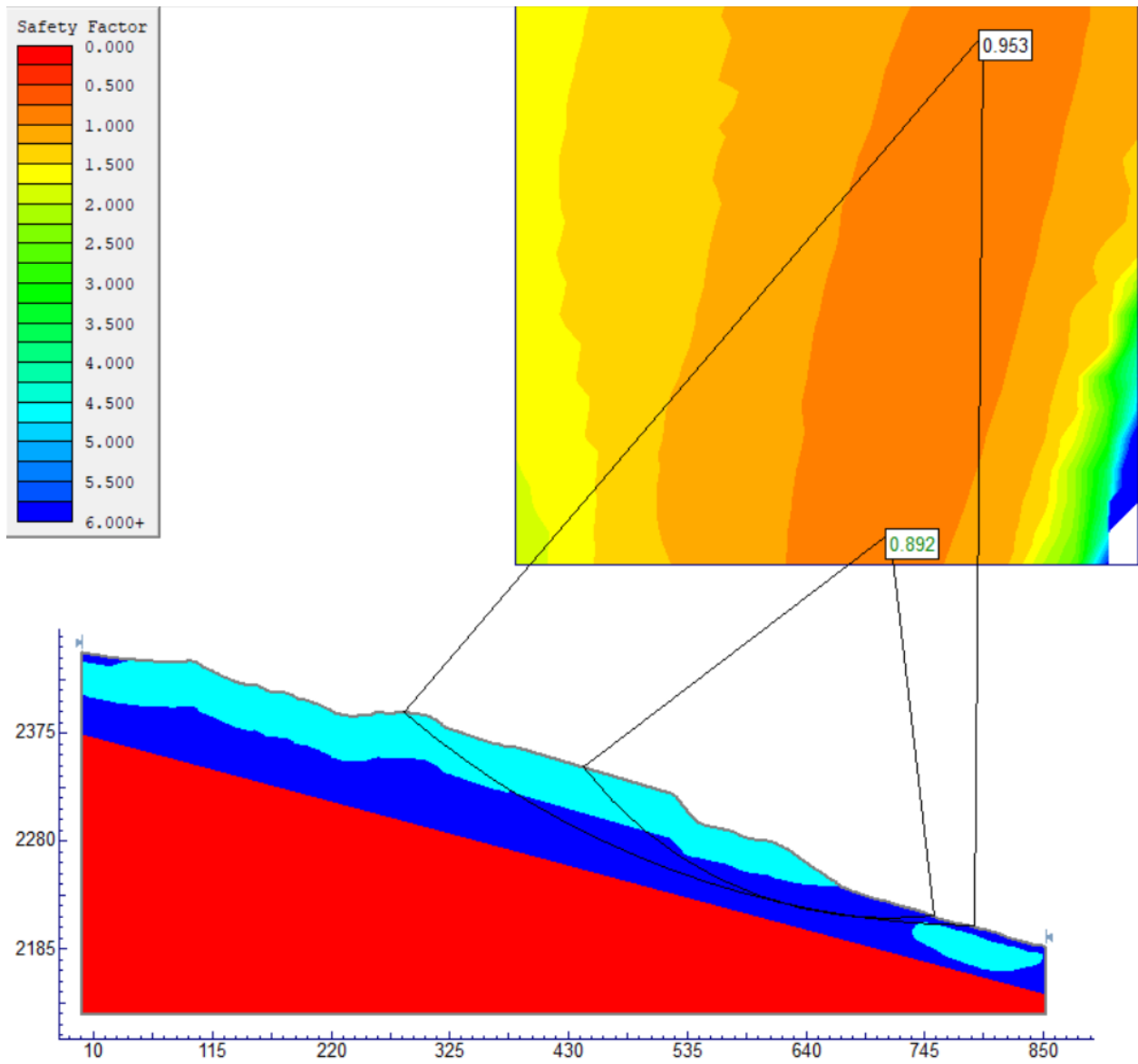


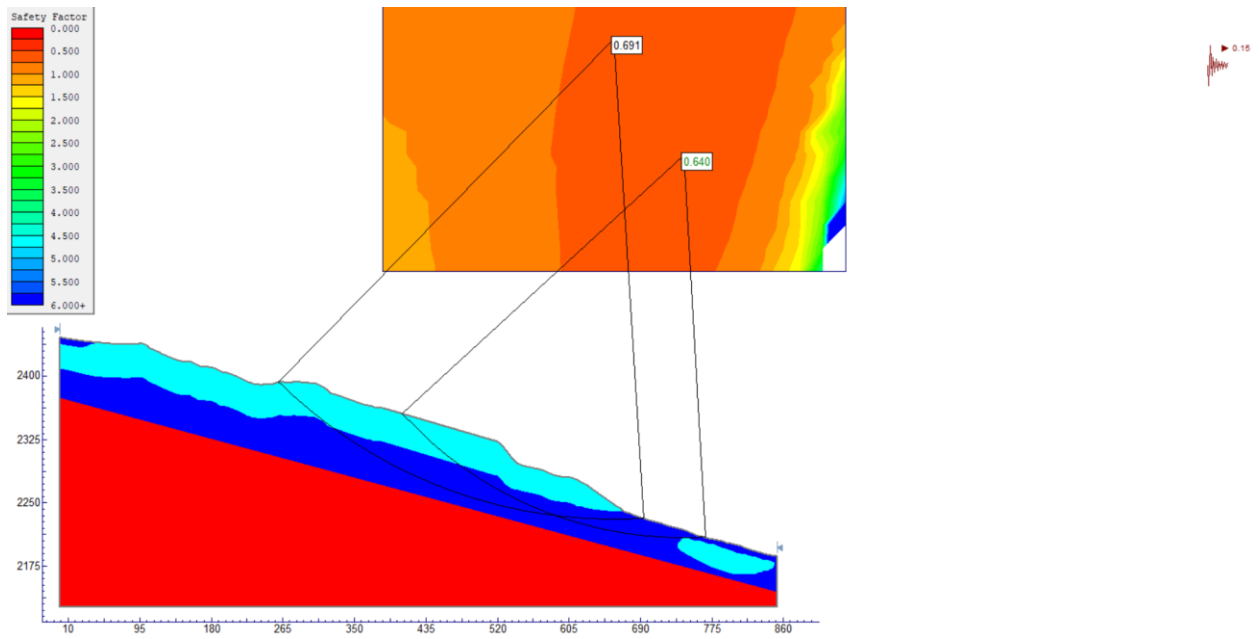


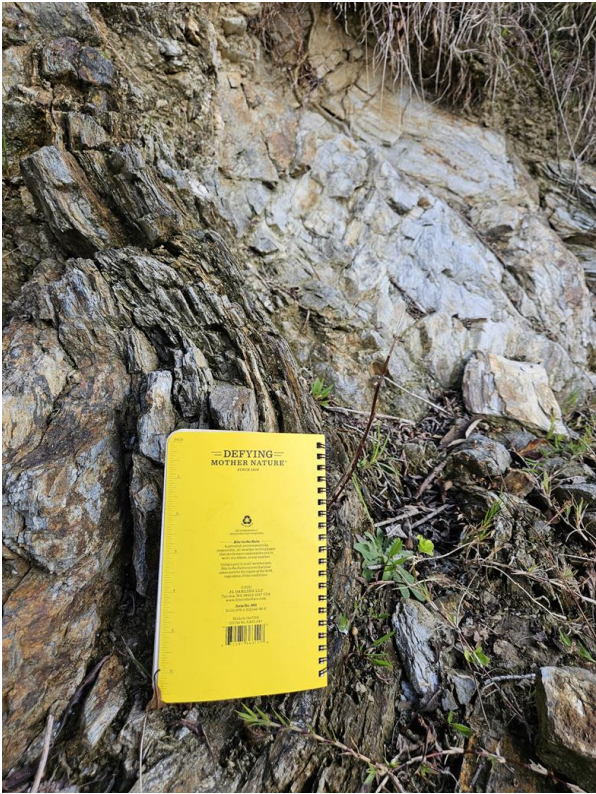












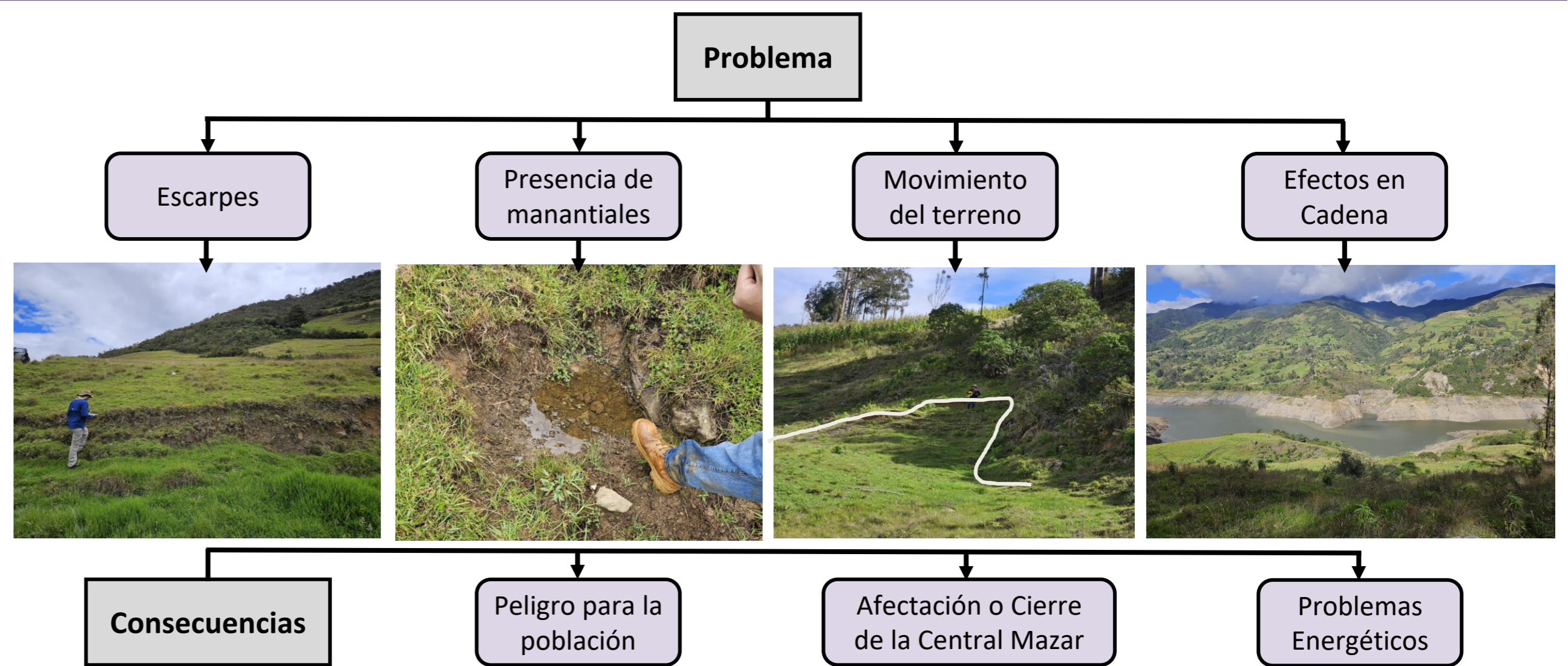




Evaluación geológica y geofísica del macro deslizamiento Llamacón, Central hidroeléctrica Mazar, Paute – Ecuador.

PROBLEMA

El macro deslizamiento Llamacón está ubicado sobre un **coluvial inestable**, con pendientes estimadas de 45° y alta pluviosidad, lo que provoca la inestabilidad del sector. Desde **1984**, fue identificado por INECEL como un área de **alto riesgo a deslizarse**.



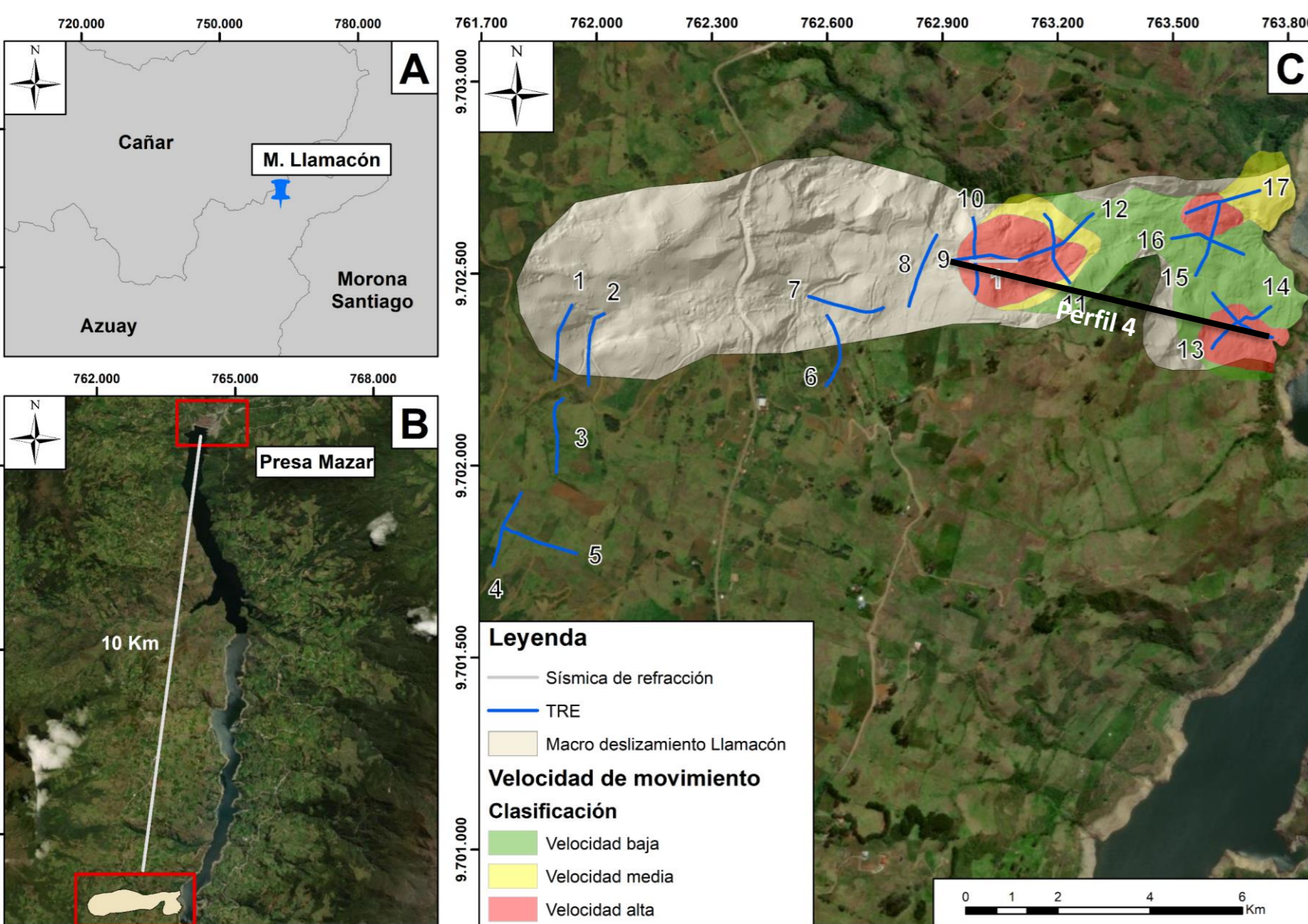
OBJETIVO GENERAL

Evaluar el **macro deslizamiento** en la comunidad de Llamacón mediante un **enfoque geológico y geofísico**, para la definición de **estrategias de mitigación** que aseguren la **sostenibilidad** en el sector.

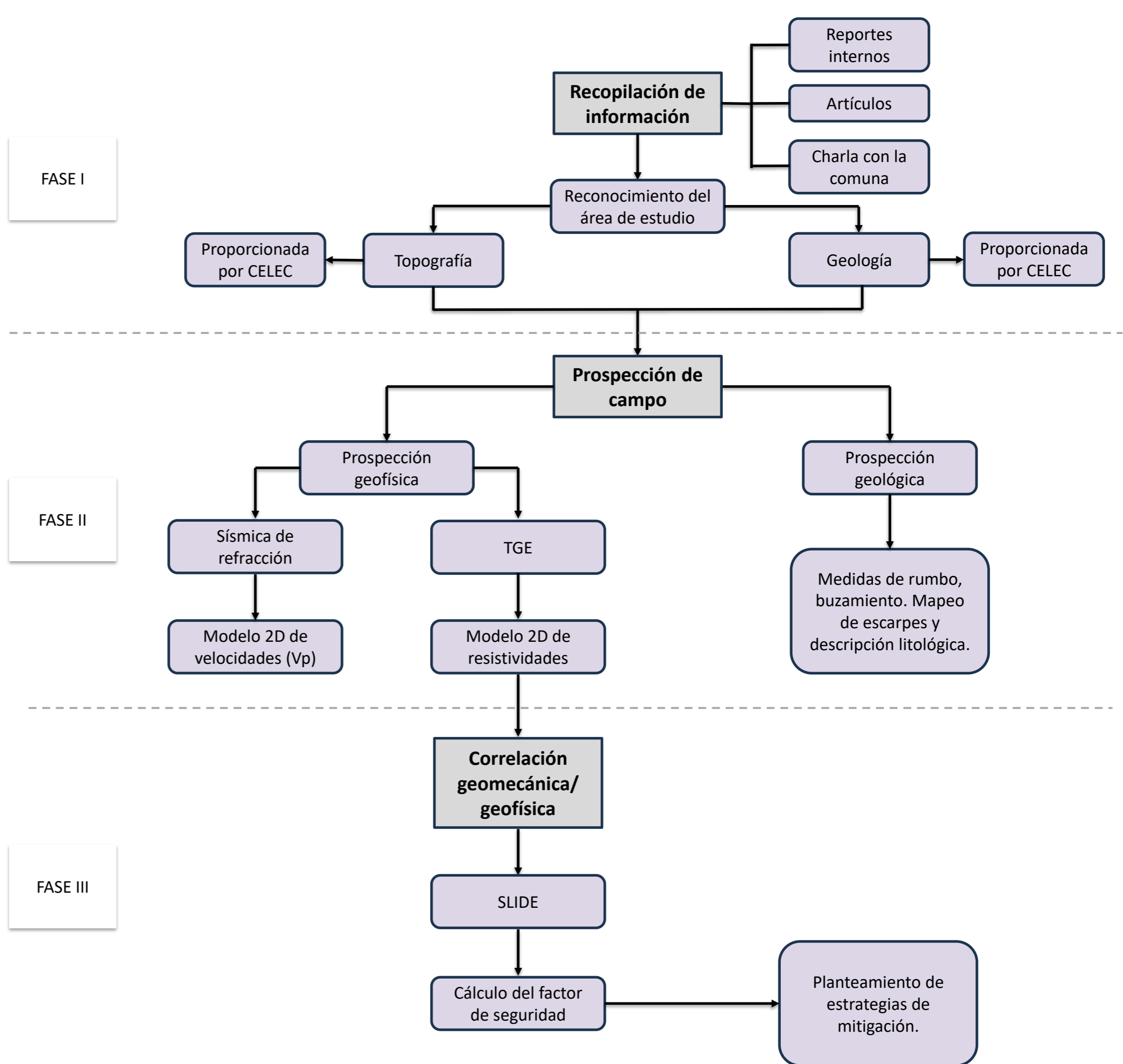
PROPUESTA

El macro deslizamiento Llamacón se encuentra en la parroquia **Guarainag**, en el cantón Paute, provincia del Azuay, a **2400 m.s.n.m** y está situada aproximadamente a **10 km** del embalse Mazar.

Para la **prospección geofísica** se realizaron **17 tomografías geoeléctricas (TGE)** y **1 ensayo de sísmica de refracción**.

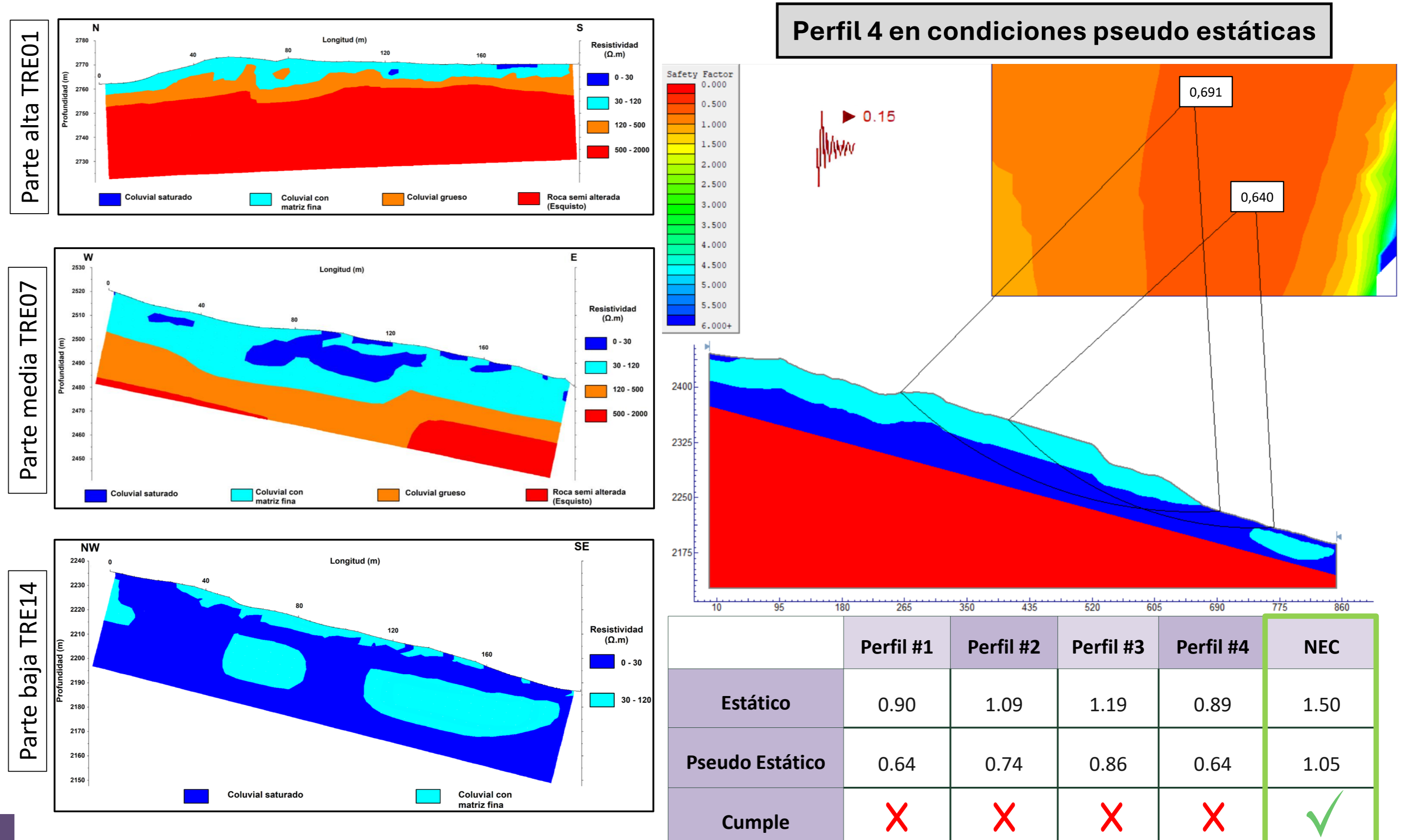


A) Zona de estudio, provincia del Azuay, B) Delimitación del área de estudio con respecto al embalse Mazar y, C) Ubicación de los ensayos en Llamacón.



RESULTADOS

- En la interpretación de las TGE, se identificaron que los **menores valores de resistividad** se encuentran en la **parte baja (1 – 500 Ω·m)** del macro deslizamiento, esto debido a un **mayor grado de saturación** del terreno y que el **espesor del material coluvial** es **mayor a 40m**.
- En el análisis de estabilidad de taludes, mediante el cálculo de **FS** se determinaron **rangos entre 0.64 – 0,86**.



CONCLUSIONES

- En el macro deslizamiento **Llamacón** se identificaron **3 tipos de litologías, esquistos, bloques de andesitas y material coluvial**. En la **parte baja** del área de estudio se registraron **escarpes y pendientes pronunciadas (45°)** como factores determinantes en la **inestabilidad** del sector.
- La **correlación geológica/geofísica** permitió **caracterizar el subsuelo** en base a los **valores de resistividad y velocidades de ondas P**, determinando en la **parte baja** zonas **saturadas de 5–40 m de espesor (Coluvial saturados)**, que representan una mayor **susceptibilidad al deslizamiento**.

- Al Este del área de estudio, se registraron los **mínimos valores de FS**, evidenciando la **inestabilidad** en el **pie del talud**, donde se establecieron como medidas de mitigación la **construcción de pozos de agua, canaletas superficiales y drenes**. Debido a los **cambios topográficos abruptos** se sugiere la **construcción de terrazas escalonadas** y el establecimiento de un **plan de reforestación**.



BIBLIOGRAFÍA

SCAN ME

