



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA
CARRERA DE GEOCIENCIAS**

USO DE LA TOMOGRAFÍA SÍSMICA PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA DEL PIEDEMONTE AMAZÓNICO EN EL SENDERO CHUNCHO 2 EN LA RESERVA COLONSO-CHALUPAS, PROVINCIA DEL NAPO

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:
INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR

NELSON SANTIAGO MOLINA AYALA

Napo - Ecuador
2023



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA
CARRERA DE GEOCIENCIAS**

USO DE LA TOMOGRAFÍA SÍSMICA PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA DEL PIEDEMONTE AMAZÓNICO EN EL SENDERO CHUNCHO 2 EN LA RESERVA COLONSO-CHALUPAS, PROVINCIA DEL NAPO

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:
INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR: NELSON SANTIAGO MOLINA AYALA
TUTOR: PhD. JOSÉ SEBASTIÁN ARAUJO SORIA

Napo - Ecuador
2023

**DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y
RESPONSABILIDAD**

Yo, NELSON SANTIAGO MOLINA AYALA con documento de identidad N°0503608200, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Tena, 24 de marzo de 2023



Nelson Santiago Molina Ayala

C.I. 0503608200

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, NELSON SANTIAGO MOLINA AYALA, con documento de identidad N°0503608200, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: USO DE LA TOMOGRAFÍA SÍSMICA PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA DEL PIEDEMONTES AMAZÓNICO EN EL SENDERO CHUNCHO 2 EN LA RESERVA COLONSO-CHALUPAS, PROVINCIA DEL NAPO, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Tena, 24 de marzo de 2023



Nelson Santiago Molina Ayala
C.I. 0503608200

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el Trabajo de Integración Curricular Titulado: USO DE LA TOMOGRAFÍA SÍSMICA PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA DEL PIEDEMONTES AMAZÓNICO EN EL SENDERO CHUNCHO 2 EN LA RESERVA COLONSO-CHALUPAS, PROVINCIA DEL NAPO, en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: Nelson Santiago Molina Ayala, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 24 de marzo de 2023



.....
José Sebastián Araujo Soria
C.I: 1802672871

AGRADECIMIENTO

Primeramente, a mis padres por apoyarme económicamente a lo largo de toda mi formación académica, a mis hermanos por siempre estarme motivando y a mi tutor Ph.D. José Sebastián Araujo Soria quien supo guiarme para poder llevar a cabo este trabajo de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	III
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	IV
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
TABLA DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE IMÁGENES	VIII
INDICE DE TABLAS	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
ÁREA DE ESTUDIO Y GEOLOGÍA.....	3
ÁREA DE ESTUDIO.....	3
GEOLOGÍA	4
METODOLOGÍA.....	6
OBTENCIÓN DE DATOS.....	6
ANÁLISIS DE DATOS.....	7
RESULTADOS	10
DISCUSIÓN	12
CONCLUSIONES.....	16
BIBLIOGRAFÍA.....	1

ÍNDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1: Flujo del procedimiento metodológico para la tomografía sísmica	6
--	----------

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: Datos para generar el modelo inicial para la tomografía.....	9
--	----------

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación de la línea sísmica, en Napo, Ecuador.....	4
Figura 2: Mapa Geológico del área de estudio.....	5
Figura 3: Representación gráfica de los instrumentos para la adquisición de datos.....	7
Figura 4: Dromocronas de la línea sísmica para generar	8
Figura 5: Modelo inicial de cambio de velocidades	9
Figura 6: Convergencia de RMS a lo largo de las iteraciones	11
Figura 7: Curva L con valores de suavizado fijo horizontal de 0.9 y valores	11
Figura 8: Imagen de tomografía sísmica resultante.....	12
Figura 9: Imagen de las 3 unidades o estratos de terreno.....	13
Figura 10: Lugar de estudio (Punto A) en el sendero CHUNCHO 2,	15

RESUMEN

La tomografía de refracción sísmica es un método geofísico que se lleva a cabo en la superficie terrestre, permite analizar el perfil de velocidad de las ondas P, para determinar la distribución de los estratos del subsuelo. Este método utiliza geófonos (12 en este caso) dispuestos en una línea sísmica para la adquisición de datos, que fueron tratados y analizados en complementos del software seismager (Pickwin, Plotrefa y Geoplot) y el software Matlab, para el debido proceso de limpieza de señales, generación de dromocronas, generación del modelo inicial, generación de la tomografía, gráficas de errores y curva L. Se logró identificar 3 estratos que presentan velocidades crecientes con el aumento de la profundidad, que van desde los 0.50 a 1.26 km/s. Los estratos identificados desde un orden más superficial a profundo corresponden a: material superficial muy meteorizado (0.50 a 0.67 km/s), granito en estado de suelo arenoso (0.75 a 0.92 km/s) y gravas-arenas (1.09 a 1.2 km/s).

Palabras clave: tomografía sísmica, sendero Chuncho 2, reserva Colonso-Chalupas, granito de Abitagua, meteorización.

ABSTRACT

Seismic refraction tomography is a geophysical method carried out at the earth's surface that allows analyzing the P-wave velocity profile to determine the distribution of subsurface strata. This method uses geophones (12 in this case) arranged in a seismic line for data acquisition, which was treated and analyzed in complements of seismager software (Pickwin, Plotrefa, and Geoplot) and Matlab software for the due process of signal cleaning, travel-time curves generation, initial model generation, tomography generation, error plots, and L-curve. Three strata were identified with increasing velocities and depths ranging from 0.50 to 1.26 km/s. The strata identified from a shallower to deeper order correspond to; highly weathered surface material (0.50 to 0.67 km/s), granite in a sandy soil state (0.75 to 0.92 km/s), and gravel-sand (1.09 to 1.2 km/s).

Keywords: seismic tomography, Chuncho 2 trail, Colonso-Chalupas reserve, Abitagua granite, weathering.

INTRODUCCIÓN

La tomografía sísmica pertenece al grupo de los métodos geofísicos que se pueden llevar a cabo en la superficie terrestre, esta analiza el perfil de velocidad de las ondas P. Estas ondas son transmitidas por el interior del suelo, son de tipo compresivas y se propagan en materiales sólidos y líquidos, mientras que su velocidad depende de la densidad del material que atraviese (Basurto 2013). Este método utiliza sensores dispuestos a lo largo de una línea de prospección, buscando medir los tiempos de recorrido que tienen las ondas P al atravesar por el medio geológico hacia los sensores (Edward et al. 2022). La función de este método ayuda a establecer la distribución de los estratos de la estructura del subsuelo, mediante la obtención y análisis de los perfiles sismo-estratigráficos a partir de la interpretación de las curvas de tiempo versus separación de geófonos (Rinaldi et al. 2016). El principio en el que se basa este método es en la Ley de Snell, esta menciona que cuando una onda choca con una superficie de separación de dos medios litológicos, una parte de la onda se refleja, mientras que la otra parte entra en el otro medio, cambiando de dirección (Agustín 2015).

Dentro de las aplicaciones más importantes de este método tenemos que es posible observar el nivel de cementación y compacidad de complejos sedimentarios, determinar la profundidad de basamento de construcciones, determinar condiciones de meteorización y fracturación de un macizo rocoso, profundidad del techo de roca, detectar fallas geológicas, en síntesis, la determinación de las propiedades físicas del subsuelo (Imani et al. 2021; Rinaldi et al. 2016; Pérez et al. 2013). Esta técnica geofísica es muy conocida y frecuentemente empleada en la ingeniería, debido a que cubre un área de estudio más grande en comparación a otras técnicas, además que es económica y rápida de llevar a cabo (Tungka 2022).

Estudios demuestran la aceptación de este método para la caracterización de terrenos, como el de Velásquez (2015) que su objetivo era caracterizar los suelos de la Central Hidroeléctrica Palmira mediante el uso del método de tomografía sísmica de refracción (Quito), donde detectó tres estratos diferenciados por la propagación de velocidades de ondas P en m/s, dentro de estos estratos estaban capas con potencias muy marcadas, suelos, coluviales, y profundidades de mayor consolidación. Así mismo, Azwin et al. (2013) en su investigación que tuvo como objetivo caracterizar el subsuelo de un sitio en Kaki Bukit, Perlis (Malasia). Realizaron tres líneas sísmicas paralelas, utilizando un sismógrafo ABEM Terraloc MK8 de 24 geófonos a una separación de 2m. Encontraron la presencia de

cuatro unidades litoestratigráficas con velocidades que aumentan con la profundidad, entre las características de los materiales encontrados están: suelo superior (300-500 m/s) y con sobre carga de forma, piedra caliza muy fracturada y meteorizada (500-800 m/s), y un lecho de roca caliza (> 2000 m/s). Estas investigaciones son importantes dentro de nuestro estudio porque nos permiten identificar y verificar semejanzas tanto metodológicas como de resultados, porque tienen una metodología en común.

Existen fuentes que ayudan a relacionar las velocidades de onda con los materiales geológicos, mostrando las velocidades para las ondas de compresión que posee cada tipo de roca o sedimento. Como es el caso del material superficial, arena-grava, arena saturada que comprende velocidades de entre: 0.24 a 0.61 km/s, 0.46 a 0.92 km/s y 1.22 a 1.83 km/s respectivamente (ASTM 2000). Por otra parte, Ugwoke (2022) en su estudio que analiza parámetros de velocidad de onda P (Nigeria), encontró que la velocidad de una zona meteorizada poco profunda varía de entre 0.35 a 0.63 km/s y una zona no meteorizada profunda varía 1.5 a 1.9 km/s. Así mismo, Olona et al. (2010) en su estudio sobre las propiedades geotécnicas y la meteorización de un macizo granítico mediante métodos sísmicos, menciona que las velocidades para un granito muy desgastado van desde 0.5 a 0.9 km/s.

La reserva Colonso-Chalupas ubicada dentro del piedemonte amazónico del Ecuador, dentro de un contexto geológico se encuentra descrita a una escala general (Cuenca et al. 2018). Pero es necesario una descripción a una escala más específica, que permita aportar en gran medida al entendimiento geológico a detalle del sector, además de que sirva como fuente de información para estudios posteriores. Por tal razón, este estudio se enfoca en el uso de la tomografía sísmica y busca responder si, ¿es posible realizar una caracterización estructural y estratigráfica del suelo y subsuelo de un sector en el sendero CHUNCHO 2 cercano a la comunidad Alto Tena basado en un modelo de velocidad de ondas sísmicas?, mediante la determinación y análisis de perfiles sísmico-estratigráficos que permitan dar a conocer la geología del suelo y subsuelo.

ÁREA DE ESTUDIO Y GEOLOGÍA

Área De Estudio

El área de estudio se encuentra específicamente en el sendero CHUNCHO 2, sector Alto Tena, parroquia Muyuna, Cantón Tena perteneciente a la provincia del Napo (figura 1). La zona de estudio a la que pertenece el sector a una escala en macro se encuentra caracterizada por tener relieves de tipo colina mediana, con alturas que van desde 640 a 840 m.s.n.m, pendientes de 8 a 13% (MAAE 2013). Entre los climas predominantes de la zona tenemos: clima ecuatorial meso térmico Semi Húmedo, tropical mego térmico húmedo y megatérmico lluvioso. Las temperaturas promedio mensual y anual son 24° y 25° centígrados respectivamente, mientras que la precipitación promedio anual es > 3800 mm y mensual es > 300 (Cuenca et al. 2018). La figura 1 nos proporciona información acerca del área de estudio que se encuentra ubicada dentro de la Reserva Biológica Colonso Chalupas, específicamente en el sendero CHUNCHO 2, además se detallan aspectos como: las formaciones, ríos y poblaciones.

formaciones que comprenden esta área son: la Formación Tiyuyaku del Paleoceno Superior-Eoceno, comprende materiales geológicos como: conglomerados densos, cantos rodados y subangulares o cantos rodados, la arenisca varía de arenisca fina a gruesa, y glauconíticas, con intercalaciones de arcillolitas rojas o verdes. También está el granito de Abitagua de edad Jurásica comprendido por monzogranito de biotita rosa, de grano medio o grueso a granito de biotita megacrístico de feldespato K (Chunga 2017; Litherland et al. 1994). La figura 2 nos brinda información acerca de las formaciones presentes en la zona de estudio, la presencia de una falla, además la línea sísmica se encontraba cercana a la red hidrográfica aproximadamente a unos 5 m de distancia y presentaba una pendiente con una inclinación, aproximada de $\theta = 16^\circ$.

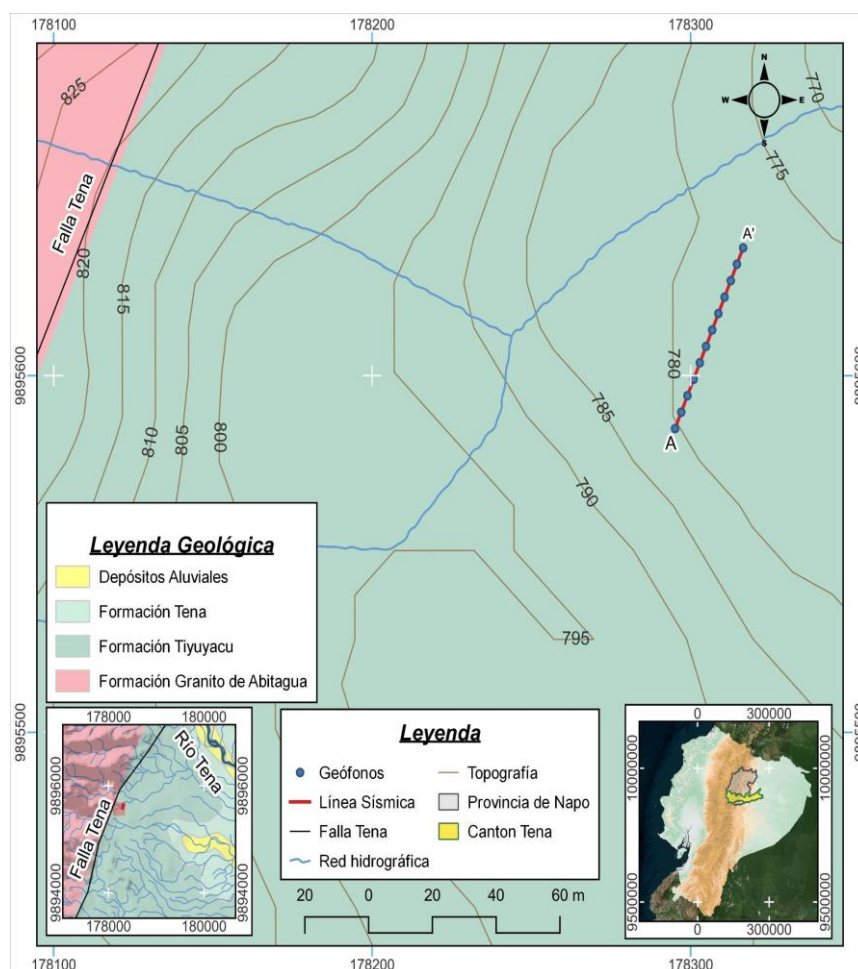


Figura 2: Mapa Geológico del área de estudio.
Realizado por: Nelson Molina

Fuentes: La falla geológica Tena del estudio de Egeuz et al. (2003) y la cartografía geológica de Duque et al. (2015).

METODOLOGÍA

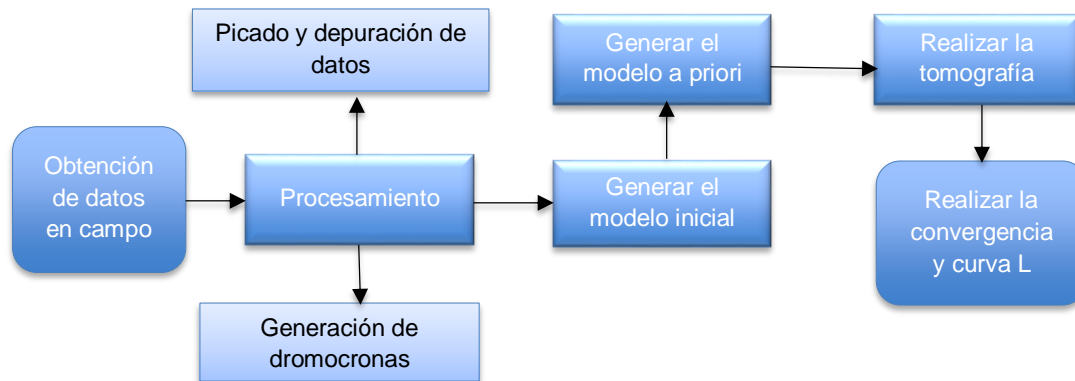


Imagen 1: Flujo del procedimiento metodológico para la tomografía sísmica.
 Realizado por: Nelson Molina

Obtención De Datos

Para el registro en campo de los datos fue necesario el uso del sismógrafo de marca Geometrics (modelo Es-3000). Se trazó una línea sísmica comprendida por 12 geófonos a una distancia de 2.5 m cada uno, recorriendo un total de 27.5 m de longitud (figura 3). Las distancias entre geófonos fueron establecidas de acuerdo a la disponibilidad de espacio para el tendido sísmico, debido a que a mayor distancia del tendido sísmico ya se encontraban obstáculos (árboles). Según Medina (2022) la distancia entre geófonos varía de 1 m a más, donde a mayor separación se obtendrá información a mayor profundidad. En este caso la profundidad de análisis escogida fue de 20 m y debido a los obstáculos para el tendido sísmico. La línea se encuentra en el sendero CHUNCHO 2 con una orientación NE-SW (figura 1). Después de haber instalado los instrumentos del sismógrafo se procedió a configurar y ejecutar el Software Seismodule Controller para la obtención de las ondas P (datos), además se realizaron golpes de prueba para comprobar el adecuado funcionamiento de los geófonos. Mediante percusiones (una por geófono) con un martillo de 6 kg sobre una placa de acero se procedió a la obtención de los datos.

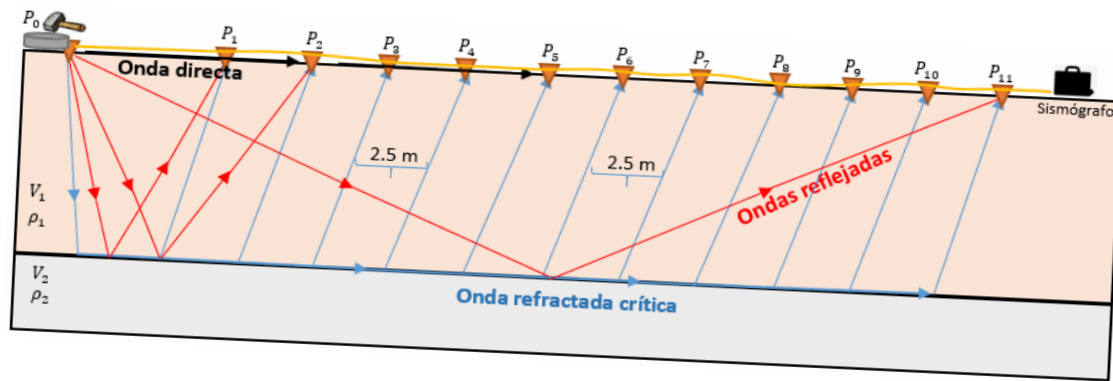


Figura 3: Representación gráfica de los instrumentos para la adquisición de datos.
Realizado por: Nelson Molina

La sismica de refracción se basa en el principio de las primeras llegadas de la onda P. Estas ondas pueden ser la onda directa (que es la que viaja por la interfaz aire-suelo) o la onda refractada (que viaja por la interfaz de los medios litológicos). La onda directa llega primero a los geófonos iniciales y viaja con la velocidad del medio litológico más cercano a la superficie. Mientras que a los geófonos posteriores llega primero la onda refractada. Estas ondas refractadas utilizan el principio de la ley de Snell, son producto de que la onda pase por un ángulo crítico que hace que la onda se refracte (cambie de dirección) y no se refleje. Este cambio de dirección ocurre cuando la onda pasa de un medio litológico a otro distinto como consecuencia del aumento de la velocidad de propagación a medida que incrementa la profundidad (De Berlín & Wiechert 2020).

Análisis De Datos

Para el procesamiento de los datos obtenidos en campo fue necesario el software SeisImager que usa los complementos Pickwin, Plotrefa y Geoplot. Primero se usó el complemento Pickwin, donde se realizó un proceso de picado manual, seguidamente se seleccionó las primeras llegadas de las ondas P y se eliminó las señales perturbadas como producto de los ruidos del ambiente. Una vez obtenidos los sismogramas corregidos en Pickwin, con la ayuda del complemento Plotrefa se generó las dromocronas (figura 4).

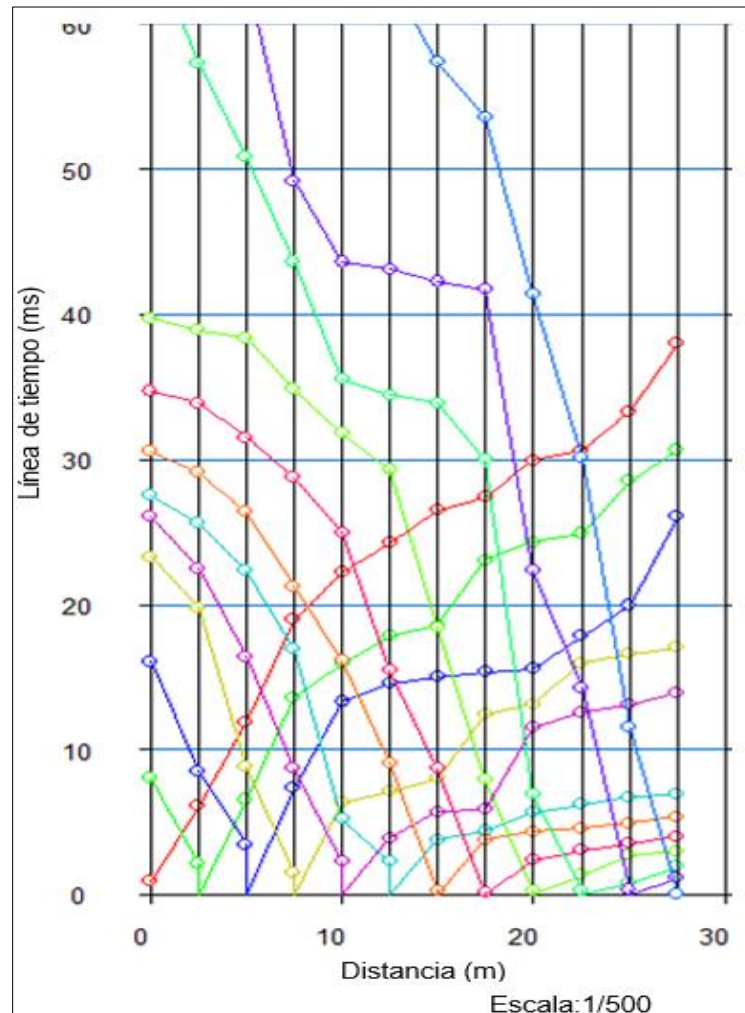


Figura 4: Dromocronas de la línea sísmica para generar el modelo inicial.
Realizado por: Nelson Molina

De igual manera usando el complemento Plotrefa se utilizaron los parámetros de la Tabla 1 que permitieron generar un modelo inicial de cambio de velocidades (figura 5), necesarios para realizar la tomografía final que nos permitió identificar las unidades litoestratigráficas. Los parámetros de profundidad se determinaron trazando los rayos sísmicos. Los parámetros de velocidad máxima y mínima fueron definidos de tal manera que sus valores se expresen explícitamente después de algunas iteraciones de prueba con la tomografía.

Tabla 1: Datos para generar el modelo inicial para la tomografía.

	Profundidad hasta la parte superior de la capa más baja (m)	Velocidad máxima (Km/s)	Velocidad mínima (Km/s)	# de capas	Elevación en la parte inferior izquierda del modelo (m)	Elevación en la parte inferior derecha del modelo(m)
Línea sísmica	20	0.5	1.5	10	770 (20m)	730 (20m)

Realizado por: Nelson Molina

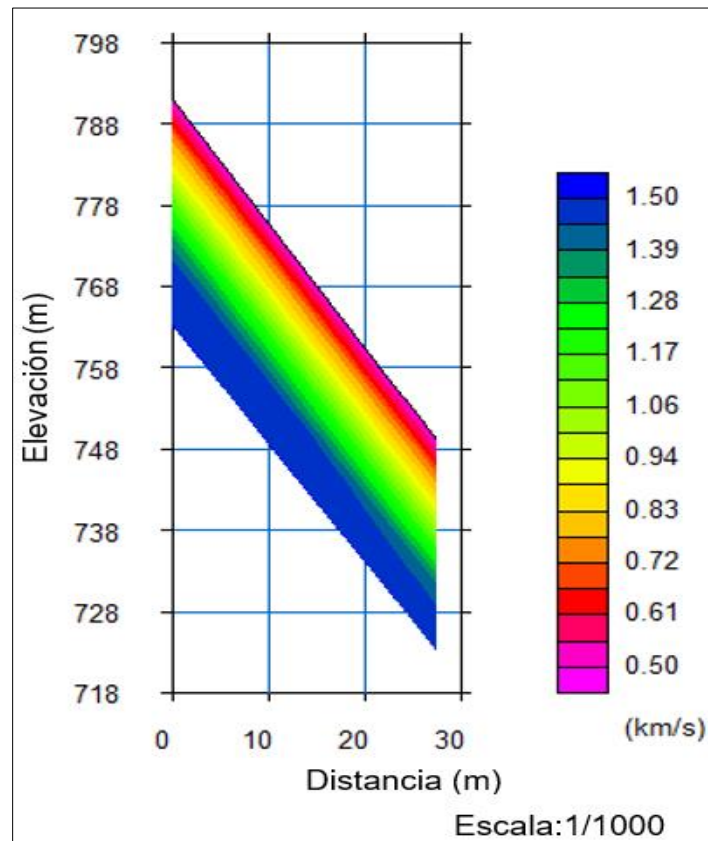


Figura 5: Modelo inicial de cambio de velocidades generado para la línea sísmica.

Realizado por: Nelson Molina

El complemento Plotrefra realiza una inversión temporal con los tiempos de las primeras llegadas para determinar las velocidades de los estratos del terreno mediante técnicas de mínimos cuadrados, usando el método de tiempo de retardo con el objetivo de estimar profundidades, el software ajusta las profundidades de cada estrato, por efecto de la superficie topográfica. Este proceso se hace en forma iterativa hasta encontrar un modelo que se ajuste a la geología superficial del terreno investigado (Huarca 2018, Geomatrix Earth Science 2009). Para esto se establecieron 50 iteraciones y 8 nodos, con pasadas de

suavizado horizontal de 2 y vertical 1. Se realizaron todas las pruebas numéricas posibles a pasos de $\lambda = 0.1$, variando el suavizado vertical y manteniendo el horizontal o viceversa.

Al ejecutar la inversión temporal se generan errores que miden la calidad de la inversión de mínimos cuadrados, estos errores fueron graficados usando el sistema de cómputo numérico Matlab, para observar la mayor convergencia y menor oscilación en los diferentes suavizados. Para regularizar esta inversión y seleccionar el modelo óptimo, se utilizó el criterio de la curva L que dispone de la Norma L1, Norma L2 y Norma infinita (Tarantola 2005; Zhdanov 2002;). Según Hansen (1999) en la curva L cada punto se encuentra asociado a un valor λ . Por tal razón la solución consiste en encontrar el punto de inflexión que representa el valor óptimo y este se encuentra separado por las partes horizontales y verticales de la curva. Finalmente usando este modelo se generaron las tomografías finales.

RESULTADOS

La figura 6 nos permite observar el RMS obtenido por el modelo de inversión, en el cual, para nuestra línea sísmica, el suavizado se mantuvo en 0.9 horizontal, mientras que el suavizado vertical fue variando de 0.3 -1, donde al momento de aplicar las 50 iteraciones el error se mantuvo más estable. Mientras que la mejor curva L para nuestra línea sísmica, mostró que los valores más adecuados de suavizado fueron de 0.9 horizontal y 0.7 vertical, con sus puntos de inflexión en $\lambda = 0.7$. En la gráfica 7 podemos observar 3 gráficos de curvas L que representan los tipos de normas: norma L2(izquierda), norma L1(centro) y norma infinita(derecha).

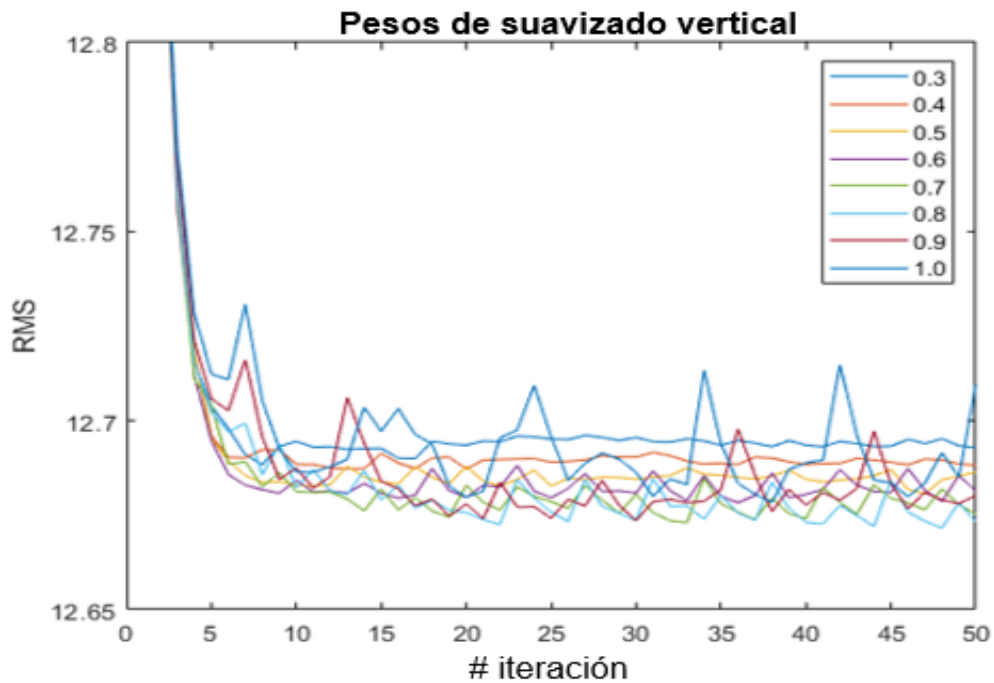


Figura 6: Convergencia de RMS a lo largo de las iteraciones con suavizado fijo de 0.9 horizontal y 0.3 - 1 vertical. Los colores representan los valores de suavizado vertical.

Realizado por: Nelson Molina

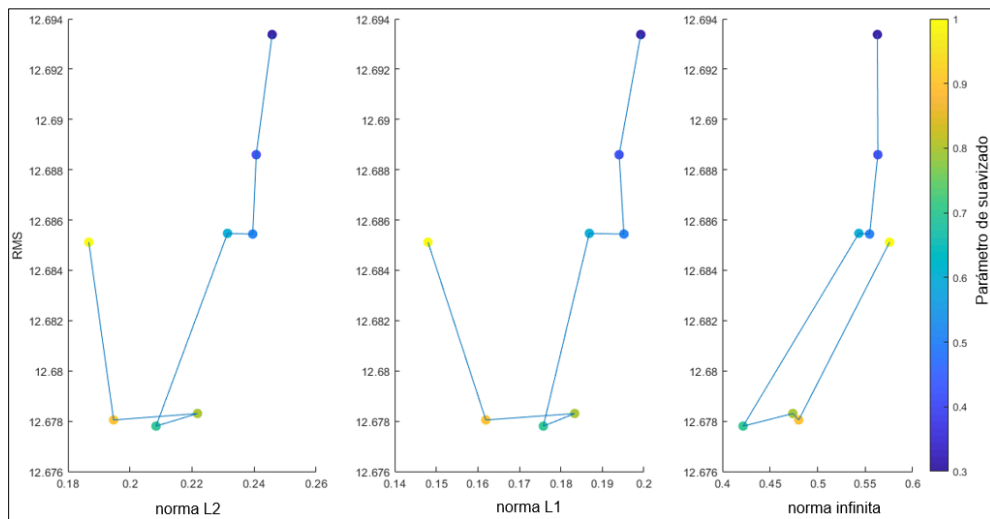


Figura 7: Curva L con valores de suavizado fijo horizontal de 0.9 y valores de suavizado vertical de 0.3 - 1 a pasos de $\lambda=0.1$, el vértice óptimo elegido fue de 0.7. (ver escala de colores)

Realizado por: Nelson Molina

La figura 8 nos muestra el resultado de la tomografía, donde podemos identificar 3 unidades que se van diferenciando a medida que aumenta la profundidad, es decir a mayor profundidad mayor velocidad de onda P. En este caso podemos ver que la velocidad de onda P toma valores desde 0.50 hasta 1.26 km/s.

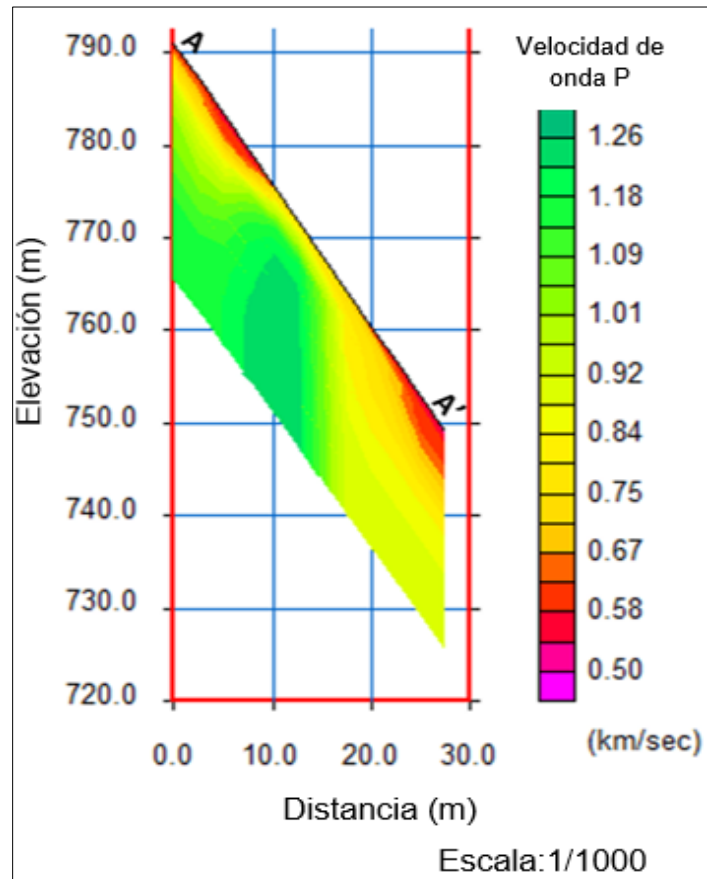


Figura 8: Imagen de tomografía sísmica resultante.
Realizado por: Nelson Molina

DISCUSIÓN

La tomografía de refracción sísmica mostró la distribución lateral y vertical de las unidades litoestratigráficas (Figura 9). Se identificó tres unidades o estratos de terreno diferentes que se interpretaron en relación con la información de la geología disponible del lugar de estudio. Las tres unidades varían en espesor y velocidad de onda P, desde la capa superficial del suelo hasta una profundidad de 20 m en el subsuelo. Las diversas configuraciones de color de la tomografía, revelaron la variación en el espesor de cada capa, lo que puede ser resultado de la edad de depósito, la composición geológica y otros procesos geológicos. Estas unidades están numeradas como U1, U2 y U3, las velocidades de onda P están en unidades de km/s y van desde los 0.50 a 1.26 km/s.

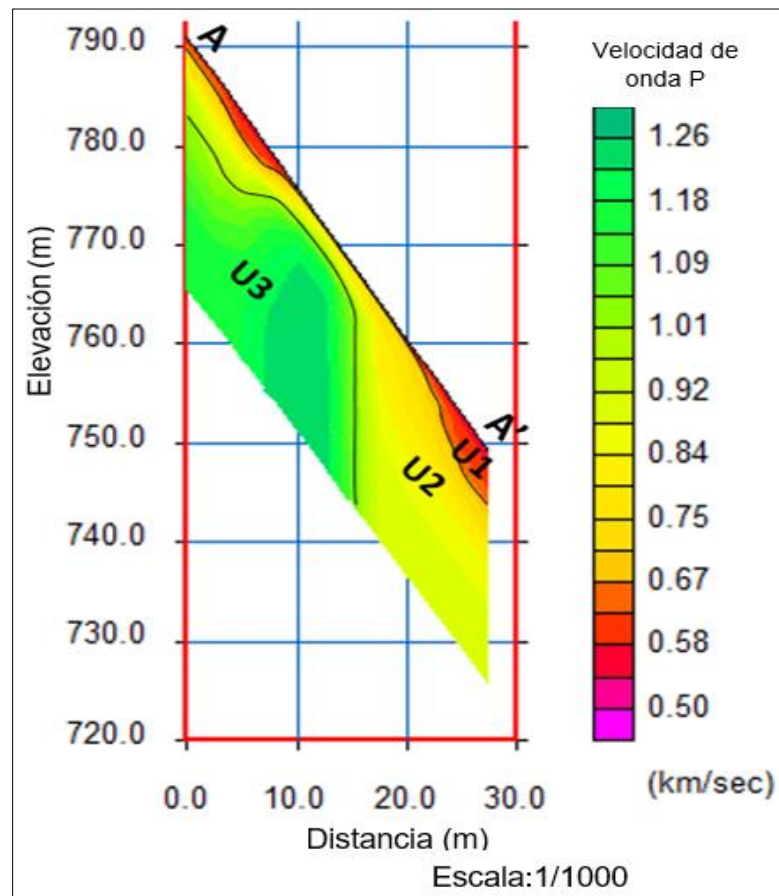


Figura 9: Imagen de las 3 unidades o estratos de terreno identificados como resultado de la tomografía de refracción sísmica.
Realizado por: Nelson Molina

Como consecuencia de aplicar la tomografía de refracción sísmica podemos describir a cada uno de los estratos encontrados. La unidad 1 superficial está comprendida desde los 0 a 1.5 m de profundidad en la parte más elevada (izquierda) mientras que en la parte más baja (derecha) desde los 0 a 5 m de profundidad, además existe una deformación desde los 10 hasta los 18 m de distancia, donde se evidencia que el espesor del estrato se reduce a 0 m de profundidad. Las velocidades de onda P comprenden valores desde los 0.50 hasta los 0.67 km/s. De acuerdo a los estudios Adewoyin et al. (2021) y Olona et al. (2010), podemos describir que las velocidades de onda P de esta unidad corresponden a un estrato de terreno con material de superficie muy meteorizado. Mientras que Villa (2022) y Rinaldi et al. (2016) describe que estas velocidades de onda se las puede relacionar con sedimentos no consolidados a ligeramente consolidados, además de que estas velocidades pueden estar condicionadas debido a la presencia de materia orgánica en la superficie. De igual manera Velásquez (2015), propone que los materiales con estas velocidades son poco consolidados y corresponden a materiales de relleno, suelos y coluviales superficiales. Mientras que según la ASTM (2011) las velocidades de onda P de

0,24 a 0,61 Km/s corresponden a materiales de superficie desgastados, concordando con las velocidades de esta unidad 1 que en gran medida se encuentran dentro del rango de velocidades que establece la guía.

La unidad 2 está comprendida entre los 1.5 y 6 m de profundidad en la parte superior izquierda y en la parte baja inferior derecha desde los 15 hasta los 27.5 m de distancia registra una profundidad que va desde los 5 a los 20 m. Este estrato posee una geometría discontinua a lo largo de toda la línea sísmica, se puede observar que el estrato empieza a ganar espesor a medida que avanza en dirección A – A' hasta los 7 m de distancia tiene un espesor aproximado de 4.5 m de profundidad, mientras que desde los 7 a 15 m de distancia tiene un espesor aproximado de 3 m de profundidad, y desde los 15 a 27.5 m de distancia su espesor cubre los 20 m de profundidad. Las velocidades de onda P van desde los 0.75 a 0.92 km/s. y según la ASTM (2011), estas velocidades de onda P corresponden a un tipo de material arenoso seco, de igual manera en el estudio de Olona et al. (2010), estas velocidades de onda se la relacionan con el granito en estado de suelo arenoso.

Por otra parte, la Unidad 3 es la más profunda y cubre aproximadamente 15 m de distancia de la línea sísmica, su espesor en la parte izquierda va desde los 6 a 20 m de profundidad mientras que en la parte central que es hasta dónde llega la distancia de este estrato su espesor va desde los 3 a 20 m de profundidad. El espesor de esta unidad en sus primeros 7 m de distancia es de 14 m de profundidad, mientras que desde los 7 a 15 m de distancia su espesor es de aproximadamente 17 m de profundidad. Las velocidades de onda P predominantes en esta unidad van desde los 1.09 a 1.2 km/s. De acuerdo a los estudios de Moya et al. (2020) y Viengthong et al. (2020), estas velocidades de onda corresponden a gravas y arenas, este material podría ser producto de la meteorización del granito de Abitagua, debido a que de acuerdo al contexto geológico local esta formación se encuentra cercana.

Los 3 estratos de terreno identificados con sus respectivas deformaciones se las puede relacionar con un depósito sedimentario producto de los deslizamientos y los procesos de sedimentación, debido a que el lugar de estudio se encuentra cercano al granito de Abitagua, perteneciendo a un lugar específico de piedemonte (figura 10), un sector de confluencia entre las laderas de la montaña con la llanura, como se interpreta en las curvas de nivel del mapa geológico del área de estudio de acuerdo a la cartografía geológica de (Duque et al. 2015). Este sector dentro de la reserva Colonso-Chalupas presenta climas tropicales con elevados rangos de temperatura, precipitación y humedad (Cuenca et al. 2018), siendo estos factores climáticos favorables para que desarrollen procesos fuertes

de meteorización, erosión y transporte, que disminuyen las propiedades físicas de las rocas y suelos (Aydin y Basu 2005).



Figura 10: Lugar de estudio (Punto A) en el sendero CHUNCHO 2, piedemonte amazónico dentro de la reserva Colonso-chalupas.

Fuente: Google Earth Pro

De acuerdo a la imagen de tomografía sísmica final y teniendo en cuenta que el sector es específico de piedemonte, suponemos que el depósito sedimentario se trata de tres estratos de terreno relacionados a la meteorización del granito, material coluvial, aluvial y materia orgánica, asociados a distintas etapas de deposición. Tungka (2022) en su estudio sobre granitos en climas tropicales evidenció que los granitos meteorizados o en estado de suelo, presentaron velocidades inferiores a 1.2 Km/s, como es el caso de nuestro estudio. Por tal razón se evidencia que en nuestro sitio examinado existe la presencia de material proveniente del granito de Abitagua. Además, es necesario mencionar que este método de tomografía tiene limitaciones de exactitud, y solo tiene validez para tener una idea general de la zona. Por lo tanto, la interpretación geológica de los materiales descritos en cada estrato y su asociación con alguna formación geológica en concreto, debería ser llevada a cabo más adelante en nuevos estudios.

CONCLUSIONES

La refracción sísmica ha permitido realizar una caracterización estructural y estratigráfica de un sitio en el sendero CHUNCHO 2, permitiendo alcanzar una profundidad de 20 m, distribuidos en tres unidades, con velocidades crecientes en profundidad que van desde los 0.50 a 1.26 km/s. El tipo de materiales identificados en las unidades fueron; material superficial muy meteorizado, material arenoso (granito en estado de suelo arenoso) posiblemente proveniente del granito de Abitagua y arenas-gravas producto de la meteorización del granito de Abitagua. Dentro de la delimitación y orden de las unidades o estratos de terreno de acuerdo a su profundidad tenemos:

En el estrato 1 existió la presencia de una deformación en la parte central que evidenciaba 0 m de espesor, por ende, presentó profundidades; en la parte más elevada izquierda 0 a 1.5 m y en la parte baja derecha 0 a 5 m. Las velocidades de onda comprenden valores desde los 0.50 hasta los 0.67 km/s, indicando la presencia de material muy meteorizado.

El estrato 2 presentó una geometría irregular, con profundidades entre los 1.5 y 6 m en la parte superior izquierda y en la parte baja inferior derecha desde los 5 a los 20 m. Mientras que las velocidades van desde los 0.75 a 0.92 km/s, relacionándose con la presencia de material granítico en estado de suelo arenoso que de acuerdo a la descripción del área de estudio estaría relacionado con el granito de Abitagua.

El estrato 3 cubre aproximadamente los primeros 15 m de distancia de la línea sísmica, los primeros 7 m de distancia tienen una profundidad de 14 m, mientras que desde los 7 a 15 m de distancia su espesor es de aproximadamente 17 m de profundidad. Las velocidades van desde los 1.09 a 1.2 km/s, relacionándolas con arenas y gravas, producto de la meteorización del granito de Abitagua que se encuentra cercano.

Los estratos identificados pueden estar relacionados a un depósito sedimentario producto de los deslizamientos y los procesos de sedimentación, asociados con la meteorización del granito, material coluvial, aluvial y materia orgánica, depositados en distintas etapas. Debido a que su ubicación es un sector de piedemonte, con climas tropicales con elevados rangos de temperatura, precipitación y humedad, favorables para que desarrollen procesos fuertes de meteorización, erosión y transporte.

BIBLIOGRAFÍA

- Adewoyin, O. O., Joshua, E. O., Akinyemi, M. L., Omeje, M., & Adagunodo, T. A. (2021). Evaluation of geotechnical parameters of reclaimed land from near-surface seismic refraction method. *Heliyon*, 7(4), e06765.
- Agustín Patiño, J. S. (2015). Valoración del perfil de suelos residuales de anfibolita por ensayos de línea de refracción sísmica y MASW: Caso Las Palmas, Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- ASTM. 2000. Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. En *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 1–14.
- Aydin, A., y Basu, A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*.
- Azwin, IN, Saad, R. y Nordiana, M. (2013). Aplicación de la tomografía de refracción sísmica para la caracterización de sitios. *Procedimiento APCBEE*, 5, 227-231.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (Eds.). (2004). *La cuenca Oriente: geología y petróleo* (Vol. 144). Institut français d'études andines.
- Barragán, R., & Baby, P. (2004). Evolución magmática actual de la zona subandina: volcanes el Reventador y Sumaco, modelos geodinámicos preliminares.
- Basurto, C. A. V. (2013). Estudio de atenuación sísmica en la región centro-sur del Golfo de California.
- Bés de Berc, S., Baby, P., Soula, J. C., Rosero, J., Souris, M., Christophoul, F., & Vega, J. (2004). La superficie mera-upano: marcador geomorfológico de la incisión fluvial y del levantamiento tectónico de la zona subandina ecuatoriana.
- Chunga Kevin (2017), Estudio de geología superficial para el proyecto "Estudios de suelos de geología y geotecnia en los terrenos destinados para la construcción de la Universidad Regional Amazónica, Ikiam-Tena"
- Cuenca, P., Peñuela Mora, M. C., Maisincho, L., & Celi, J. (2019). *Hacia Un Manejo Adaptativo de la Reserva Biológica Colonso Chalupas y su Zona de Amortiguamiento: Sistematización de la aplicación de la metodología Manejo Adaptativo de Riesgo y Vulnerabilidad en Sitios de Conservación (MARISCO)*.
- De Berlín, M., & Wiechert, E. (2020) *SÍSMICA DE REFRACCIÓN*.
- Duque, J., González, S., Andrade, X., & Garzón, O. (2015). Levantamiento de Cartografía Temática, Escala 1:25.000, Lote 1.
- Edward, H., Tapia, A., Cedeño, J., Rodríguez, A., Luque, N., Ballester, I., ... & Caballero, A. (2022). TOMOGRAFÍA SÍSMICA DE REFRACCIÓN APLICADA A HIDROGEOLOGÍA EN EL RINCÓN DE SANTA MARÍA. *Tecnociencia*, 24(2), 34-47.
- Eguez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M. N., Costa, C., & Dart, R. (2003). Database and Map of

- Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions. In USGS Open-File Report 03-289. Geometrics. 2009. SeisImager/2D.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Education, Madrid, España. 744 pp.
- Hansen, P. C. (1999). The L-curve and its use in the numerical treatment of inverse problems.
- Huarca Condori, N. F. (2018). Aplicación de tomografía geoeléctrica, refracción sísmica y masw en investigaciones geotécnicas en la localidad de Patashuaylla–Urubamba.
- IGM. (2010). Mapa de Sombras 50k. <https://www.geoportaligm.gob.ec/dtm/wms>
- Imani, P., Tian, G., Hadiloo, S., & Abd El-Raouf, A. (2021). Application of combined electrical resistivity tomography (ERT) and seismic refraction tomography (SRT) methods to investigate Xiaoshan District landslide site: Hangzhou, China. *Journal of Applied Geophysics*, 184, 104236.
- INEC. (2010). División Político - Administrativa. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/division-politico-administrativa/>
- Litherland, M., Aspden, J.A., and Jemielita, R.A., 1994. The metamorphic belts of Ecuador. *British Geological Survey, Overseas Memoir*, 11, 147 pp.
- MAAE, M. del A. A. y T. E. 2013. Modelo de Unidades Geomorfológicas para la Representación Cartográfica de Ecosistemas del Ecuador Continental. Quito. 27 pp.
- Medina Ochoa, M. (2022). Evaluación del perfil sísmico del suelo mediante los métodos de refracción sísmica y masw.
- Olona, J., Pulgar, J. A., Fernández-Viejo, G., López-Fernández, C., y González-Cortina, J. M. 2010. Weathering variations in a granitic massif and related geotechnical properties through seismic and electrical resistivity methods. *Near Surface Geophysics*, 8: 585–599.
- Moya-Gutiérrez, A. J., Torres-Peña, J. A., & Contreras-Martínez, M. (2020). Site characterization using geophysical and geotechnical Prospecting. Case study main road North Central Trunk (National Route 55) at Km 68+ 500 in the Municipality of Pamplona, North of Santander, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (48), 30-45.
- Pérez, C., Mateo, M., & Maciá, A. (2013). Aplicación de tomografía de refracción sísmica y análisis de microtemores como técnicas de prospección geofísicas en estudios geotécnicos en edificación. *Informes de la Construcción*, 65(530), 203-212.
- Reyes, P. (2009). Discusión sobre la evolución jurásico–cretácica de la cordillera real y el bloque amotape.
- Rinaldi, V., Ibarra, H., Viguera, R., & Harasimiuk, J. C. (2016). Aplicación de la tomografía sísmica para la detección de fallas estructurales en una formación terciaria. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas*,

Físicas y Naturales, 3(2), 45-51.

- Ruiz, G. M. H. (2002). Exhumation of the northern Sub-Andean Zone of Ecuador and its source regions: A combined thermochronological and heavy mineral approach (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Tarantola, A. (2005). Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tungka, M. (2022, April). Determining subsurface geology with seismic refraction tomography survey. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1003, No. 1, p. 012037). IOP Publishing.
- Ugwoke, TA, Igwe, O. y Emeh, C. (2022). Relación empírica de los parámetros de velocidad de onda p, profundidad y resistencia al corte de materiales geológicos remodelados de un terreno sedimentario en el noreste de Nigeria. *Revista árabe de geociencias*, 15 (3), 1-18.
- Velásquez Cobo, A. A. (2015). Caracterización geotécnica del proyecto Central Hidroeléctrica Palmira con tomografía sísmica de refracción y perforaciones mecánicas, ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador (Bachelor's thesis).
- Viengthong, X., Vu, D. M., Nguyen, A. D., Vu, M. T. 2020. Seismic Refraction Exploration for Groundwater Potential Evaluations: A Case Study of Vientiane Province, Laos. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 36 (4), 90-101.
- Villa, M. F. (2022). Refracción sísmica y MASW para la caracterización de dos deslizamientos rotacionales en la Carretera Federal 1D, Ensenada, Baja California, México. *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California*, 97(127)
- Zhao, J., Broms, B. B., Zhou, Y., and Choa, V. 1994. A study of the weathering of the bukit timah granite part a: Review, field observations and geophysical survey. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 49: 97–106.
- Zhdanov, M. S. (2002). Geophysical inverse theory and regularization problems (Vol. 36). Elsevier.