



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA
CARRERA DE GEOCIENCIAS

**Aplicación de Tomografía Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de
Ondas de Superficie MASW en la margen izquierda del río Jatunyacu,
escombreras mineras en Yutzupino, Provincia de Napo, Ecuador**

Proyecto de investigación previo a la obtención de Título de:

INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTORA

JENNIFER LISBETH VELASTEGUI CARBAJAL

Tena – Ecuador

2024



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA
CARRERA DE GEOCIENCIAS

Aplicación de Tomografía Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas de Superficie MASW en la margen izquierda del río Jatunyacu, escombreras mineras en Yutzupino, Provincia de Napo, Ecuador

Proyecto de investigación previo a la obtención de Título de:

INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTORA: JENNIFER LISBETH VELASTEGUI CARBAJAL

TUTOR: PhD. JOSÉ SEBASTIÁN ARAUJO SORIA

Tena – Ecuador

2024

Carrera de Geociencias

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad

Tena, 6 de Septiembre de 2024

De mi consideración:

Yo, Jennifer Lisbeth Velastegui Carbajal con documento de identidad 1550007742, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de Ingeniera 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 el presente documento, son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,



Jennifer Lisbeth Velastegui Carbajal

CI: 1550007742

Carrera de Geociencias

Autorización de publicación en el repositorio institucional

Tena, 6 de Septiembre de 2024

Yo, Jennifer Lisbeth Velastegui Carbajal, con documento de identidad 1550007742 en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Aplicación de Tomografía Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas de Superficie MASW en la margen izquierda del río Jatunyacu, escombreras mineras en Yutzupino, Provincia de Napo, Ecuador”, 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.

Atentamente,



Jennifer Lisbeth Velastegui Carbajal

CI: 1550007742

Carrera de Geociencias

Certificado de dirección de trabajo de titulación

Tena, 6 de Septiembre de 2024

Certifico que el trabajo de titulación: “Aplicación de Tomografía Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas de Superficie MASW en la margen izquierda del río Jatunyacu, escombreras mineras en Yutzupino, Provincia de Napo, Ecuador”, aprobado bajo el mecanismo de titulación de: artículo, fue realizado por Jennifer Lisbeth Velastegui Carbajal, 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 Ikiám, para su entrega y defensa.



José Sebastián Araujo Soria

C.I: 1802672871

AGRADECIMIENTO

A mi tutor Ph.D. Sebastián Araujo, por su apoyo, dedicación y paciencia para lograr culminar este importante trabajo de titulación.

A mi familia por ser mi fortaleza y pilar de mi formación profesional.

A mis amigos, que conocí en el transcurso de la carrera y de mi vida, quienes me han brindado su apoyo y amistad sincera.

DEDICATORIA

A mis padres Gustavo y Jacqueline, quienes me han dado su amor y apoyo incondicional en mi vida personal y estudiantil.

A mis hermanos, Edu y Gabby quienes se han preocupado por mi bienestar siempre dándome su cariño y apoyo incondicional.

A mi sobrina Emiliana, que desde que llegó a este mundo se ha encargado de hacer mis días más felices.

A mi perrhijo "Chiky" quien me ha acompañado en todas las noches de desvelo y a todas mis mascotas que han sido parte de mi vida estudiantil y que hoy ya no están conmigo.

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA	ii
Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad	ii
Autorización de publicación en el repositorio institucional	iii
Certificado de dirección de trabajo de titulación	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA.....	vi
TABLA DE CONTENIDO	vii
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Zona de estudio	3
2 MARCO GEOLÓGICO.....	4
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
3.1 Adquisición de datos	7
3.2 Procesamiento de datos.....	8
3.2.1 Tomografía sísmica de refracción	9
3.2.2 Regularización del método.....	10
3.2.3 Suavizado para la estimación del punto de inflexión	11
3.2.4 Análisis multicanal de ondas de superficie (MASW).....	13
3.2.5 Cálculo de parámetro de Poisson	14
4 RESULTADOS Y DISCUSION	16
4.1 Tomografía sísmica de refracción	16
4.2 Análisis Multicanal de Ondas de Superficie	17
4.3 Parámetro de Poisson	18
5 CONCLUSIONES.....	21
6 REFERENCIAS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Parámetros utilizados para generar el modelo inicial	10
Tabla 2:	Clasificación de perfiles de suelo según CNA 1993 y ASTM-D5777.	14
Tabla 3:	Tipos de material para perfiles sísmicos.....	15
Tabla 4:	Clasificación de los perfiles del suelo	15

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	4
Figura 2:	Columna tectóno-estratigráfica y eventos geodinámicos que controlaron el desarrollo de la Cuenca Oriente y de sus sistemas petrolíferos.....	6
Figura 3:	Mapa geológico de la zona de estudio, comunidad Yutzupino, Napo, Ecuador	7
Figura 4:	Gráfico del registro de llegada de una de las señales sísmicas obtenidas.	8
Figura 5:	Curvas de tiempo de viaje para minimización de error en las iteraciones del modelo final.	9
Figura 6:	El gráfico a) corresponde a la convergencia de los datos y la inversión de parámetros verticales y horizontales. El gráfico b) corresponde a las tres normas en el eje horizontal. El vértice de la curva L se encuentre entre 0.8 y 0.9 en los tres tipos de normas.....	12
Figura 7:	Gráfico de curva de dispersión con una frecuencia de 8 a 20 Hz, aplicando filtro y suavizado.	13
Figura 8:	Perfil sísmico de velocidades de onda Vp	16
Figura 9:	Perfil sísmico de velocidades de onda Vs.....	17
Figura 10:	Cálculo de la relación entre las velocidades de onda P y onda S para detectar la presencia de fluidos.....	18
Figura 11:	Resultado del cálculo del parámetro de Poisson	19
Figura 12:	Estratigrafía de un depósito realizado en el área "Confluencia" comunidad Jatunyacu.	19

RESUMEN

El estudio se llevó a cabo en la margen izquierda del río Jatunyacu, en Yutzupino, provincia de Napo, Ecuador, utilizando tomografía sísmica de refracción y análisis multicanal de ondas de superficie (MASW) para caracterizar el subsuelo de escombreras mineras. Este trabajo contribuyó a la determinación de la sismoestratigrafía del subsuelo para entender sus condiciones, debido a la intensa actividad sísmica y minera en la zona. La generación de modelos de velocidades V_p y V_s fue crucial para identificar estratos, profundidades y espesores de grava removida, así como la estimación de la profundidad de niveles freáticos formados por infiltración de aguas residuales. La metodología consistió en la adquisición de datos mediante el equipo de tomografía sísmica de refracción, el procesamiento de estos datos usando el software *SeisImager* para generar modelos de velocidades de onda V_p y V_s , y el cálculo del parámetro de Poisson para identificar la presencia de fluidos. Los resultados mostraron tres estratos principales en el subsuelo: el Estrato 1, compuesto de grava y arena con velocidades V_p de 300-900 m/s y V_s de 150-230 m/s; el Estrato 2, con materiales saturados y velocidades V_p de 1000-2200 m/s y V_s de 240-370 m/s; y el Estrato 3, compuesto de calizas con velocidades V_p de 2300-2700 m/s y V_s de 380-440 m/s. No se identificaron niveles freáticos definidos, pero se detectaron filtraciones puntuales. Las metodologías aplicadas permitieron caracterizar eficazmente la sismoestratigrafía del subsuelo, relacionando los estratos encontrados con formaciones geológicas conocidas en la zona, además pueden proporcionar información valiosa para futuras investigaciones geofísicas en áreas similares.

Palabras claves: tomografía sísmica; MASW; sismoestratigrafía; estratos; niveles freáticos; geofísica

ABSTRACT

The study was conducted on the left bank of the Jatunyacu River in Yutzupino, Napo Province, Ecuador, using seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves (MASW) to characterize the subsurface of mining waste dumps. This work contributed to the determination of the subsurface seismostratigraphy to understand its conditions due to the intense seismic and mining activity in the area. The generation of V_p and V_s velocity models was crucial to identify strata, depths, and thicknesses of removed gravel, as well as estimating the depth of phreatic levels formed by infiltration of wastewater. The methodology consisted of data acquisition using seismic refraction tomography equipment, processing these data with Seislmager software to generate V_p and V_s wave velocity models, and calculating Poisson's ratio to identify the presence of fluids. The results showed three main strata in the subsurface: Stratum 1, composed of gravel and sand with V_p velocities of 300-900 m/s and V_s velocities of 150-230 m/s; Stratum 2, with saturated materials and V_p velocities of 1000-2200 m/s and V_s velocities of 240-370 m/s; and Stratum 3, composed of limestones with V_p velocities of 2300-2700 m/s and V_s velocities of 380-440 m/s. No defined phreatic levels were identified, but point infiltrations were detected. The applied methodologies effectively characterize the subsurface seismostratigraphy, relating the found strata to known geological formations in the area, and can provide valuable information for future geophysical investigations in similar areas.

Keywords: *seismic tomography; MASW; seismostratigraphy; strata; phreatic levels; geophysics*

La revista en la que será publicado este artículo es: FIGEMPA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG>

Aplicación de Tomografía Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas de Superficie MASW en la margen izquierda del río Jatunyacu, escombreras mineras en Yutzupino, Provincia de Napo, Ecuador

Seismic refraction tomography and multichannel analysis of MASW surface waves on the left bank of the Jatunyacu River, mining landfills in Yutzupino, Napo province, Ecuador

1 INTRODUCCIÓN

La cuenca Oriente se representa como una de las cuencas subandinas más complejas, debido a su ubicación que hace que se encuentre sometida a cambios de esfuerzos importantes, siendo responsable de la fuerte actividad sísmica y volcánica. Así mismo, su morfología está caracterizada por la presencia de terrazas aluviales por procesos de erosión y su evolución geodinámica que está relacionada con la subducción de la placa oceánica de nazca por debajo del continente sudamericano que contribuyen a su complejidad (Baby et al., 2004).

La prospección geofísica es una metodología que puede caracterizar la estructura del subsuelo, mediante las señales de ondas sísmicas, terremotos o explosiones que registran las velocidades de onda de las cuales se obtienen propiedades elásticas de subsuelo (Ramos, 2015). Esta metodología ha sido usada para realizar estudios de suelos blandos, suelos de origen aluvial y sedimentario, incluso, en la década de los 70, fue donde más empezaron a funcionar los datos de sismógrafos digitales y proyección de ondas, con el objetivo de crear por primera vez un mapa 2D, en el cual se muestre la velocidad sísmica y las anomalías de las velocidades de onda, creando así, un modelo

que se ajuste a la realidad y tenga relación con información geológica previa de la zona de interés (Kearey et al., 2002; López et al., 2008).

El progreso de los métodos geofísicos ha facilitado la implementación de técnicas apropiadas para la prospección sísmica. En este contexto, las metodologías que se destacan son: la tomografía de refracción sísmica y el análisis multicanal de ondas de superficie (MASW) que se caracterizan por ser activos y no invasivos, de fácil uso e implementación en el terreno y rápida adquisición sísmica. La tomografía sísmica de refracción mide el tiempo de viaje de las ondas refractadas, aquellas se producen en interfaces de capas contrastantes y son las únicas ondas que llegan a la superficie, debido al ángulo crítico que alcanzan en dichos límites (Kearey et al., 2002; Redpath, 1973). El análisis de las ondas V_p es la base de la modelación e interpretación de los datos sísmicos de refracción. El método de análisis multicanal de ondas determina la velocidad de ondas V_s en el subsuelo por medio del registro y análisis de la dispersión de ondas superficiales y de sus velocidades de propagación para generar perfiles de velocidad en modelos 1D y 2D (Guzmán, 2022; Reynolds, 2011).

En lo que corresponde a una aplicación de tomografía sísmica de refracción en escombreras mineras que son sitios donde se acumulan o depositan en forma de montón los desechos de tamaño grande a mediano provenientes de actividades mineras (Actis, 2009), a nivel provincial de Napo, no existen estudios previos de aplicación de la metodología (Mendoza, 2015) (Sarabia, 2016).

Es así como, la formación de escombreras mineras en la comunidad de Yutzupino en la margen izquierda del Río Jatunyacu, se han desarrollado por las actividades mineras en los últimos 2 años, (Jiménez et al., 2023) convirtiéndose en una zona de extracción minera por la remoción del suelo y reestructuración de los materiales del sitio.

Por lo que, la aplicación de Tomografía sísmica de refracción y Análisis multicanal de ondas de superficie (MASW) permitirán generar modelos de las velocidades V_p y V_s para conocer los estratos, profundidad y espesor de grava removida (Rinaldi et al., 2016;

López et al., 2008). También servirá para obtener una estimación de la profundidad de niveles freáticos que se han formado por la infiltración de aguas residuales, mediante la relación V_p/V_s y parámetro de Poisson. (Mojica et al., 2022;Escobar & Araujo, 2024)

Cabe mencionar que existen estudios en la comunidad Yutzupino con información relevante que permitirán tener un conocimiento previo de la geología regional para el presente trabajo. La zona de estudio se encuentra dentro la concesión minera Confluencia que ha sido estudiada mediante el trabajo de titulación de Sarabia (2016) "Diseño de explotación de los depósitos auríferos aluviales profundos del río Jatun Yacu, Área Confluencia, Tena", y junto a la concesión El Icho, estudiada por Mendoza (2015) mediante el trabajo de titulación "Exploración y explotación de terrazas aluviales en la Concesión El Icho", en las cuales realizan excavaciones de pozos para conocer los estratos geológicos presentes en la zona.

1.1 Zona de estudio

La comunidad Yutzupino está ubicada en la Provincia de Napo, Cantón Tena, Parroquia Puerto Napo, en la margen izquierda del río Jatunyacu. El área de estudio posee las coordenadas geográficas de latitud $1^{\circ}3'22''S$ y longitud $77^{\circ}48'46''O$ con una altitud de 450 metros sobre el nivel del mar, en donde fue instalada la línea sísmica como se muestra en la **Fig. 1**.

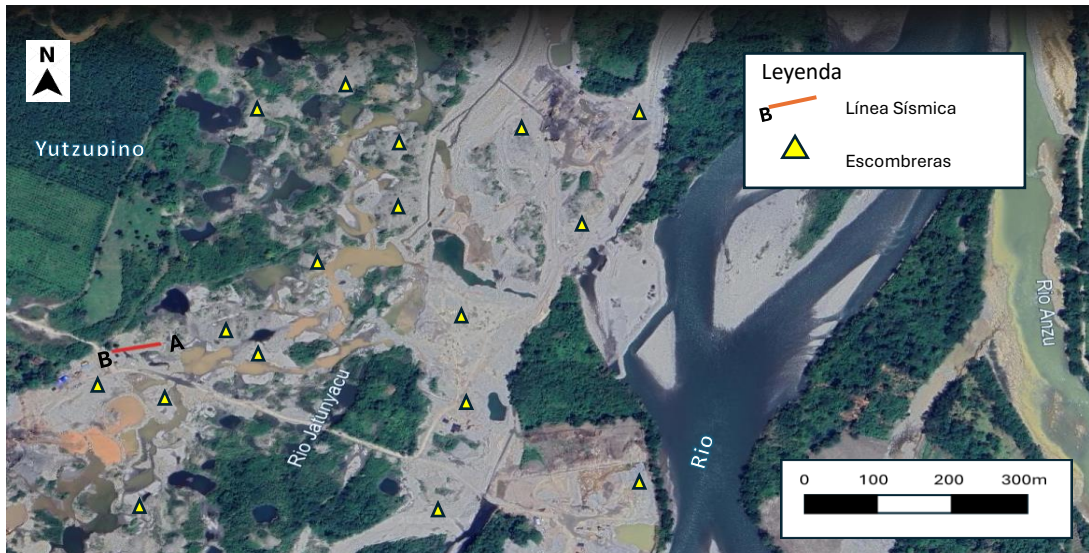


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio.
Realizado por: Jennifer Velastegui

En el año 2021 se produjo una invasión en las orillas del río Yutzupino debido a la alta explotación de minería ilegal, por lo tanto, se han generado procesos y desechos que deben ser estudiados.

2 MARCO GEOLÓGICO

A nivel regional, el área de estudio se encuentra en la Cuenca Amazónica y su geología se encuentra afectada por fallas inversas y de fuerte buzamiento de dirección NE-SW, por lo que, en su periodo de depósito se experimentó transgresiones y regresiones (Baby et al., 2004), lo que coincide con los eventos orogénicos de la cordillera Real.

La Genesis del oro en el sector Oriental según (Mejía & Acipio, 2019) es a partir de *Skarns* de oro tipo Nambija, vetas de cuarzo aurífero epitermales y mesotermiales, zonas de cizalla mineralizadas, yacimientos diseminados tipo pórfidos de Cu, Au, *Stockworks* y brechas. Las Formaciones Hollín y Tiyuyacu poseen grandes reconcentraciones de Oro.

En la **Fig. 2** se muestra una columna que comprenden las formaciones importantes para el presente trabajo, como son: depósitos cretácicos de tipo marino y los depósitos más recientes que incluyen aluviales y coluviales con alta adquisición aurífera procedente de la Cordillera Real.

Formaciones cretácicas: Corresponden a la Formación Napo y Formación Tena, donde predominan las calizas-areniscas y arcillas rojas-areniscas, respectivamente.

Depósitos recientes: Aluvial Jatunyacu, el cual contiene matriz de arena cuarzosa (30%) y boulders subredondeados de granito, volcánicos, brechas y cuarcitas (70%).

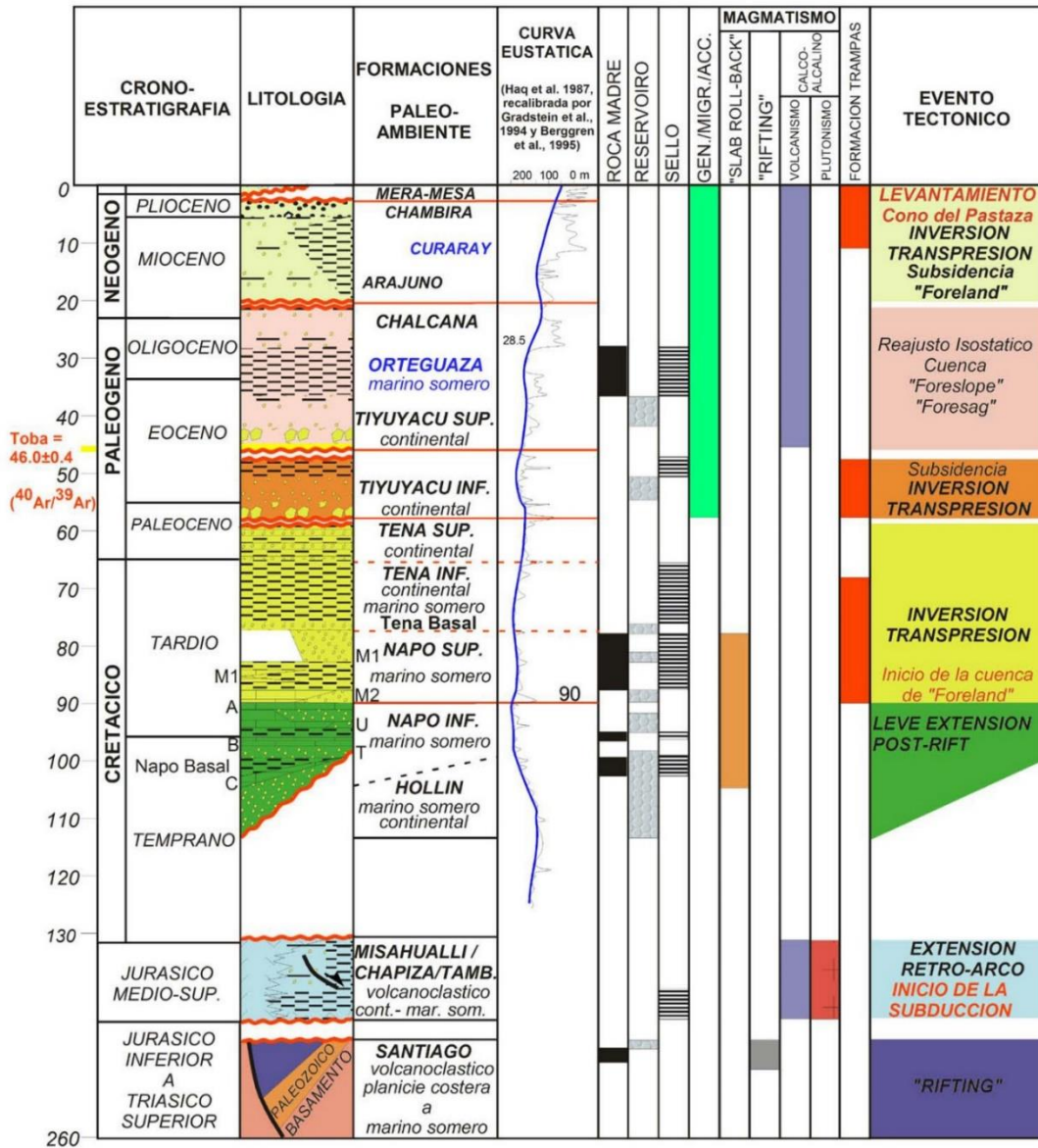


Figura 2: Columna tectono-estratigráfica y eventos geodinámicos que controlaron el desarrollo de la Cuenca Oriente y de sus sistemas petrolíferos.

Fuente: (Baby et al., 2004)

Según la interpretación de mi trabajo, la geología local del área de estudio se ve enlazado principalmente con depósitos aluviales pertenecientes al Río Jatunyacu, conformado de arena, grava y materiales residuales que se han ido acumulando con el tiempo con el cauce del río. Aunque en la actualidad en la zona de estudio se puede observar solamente la acumulación de una capa gruesa de grava con matriz no soportada, de tonalidad gris con una mezcla de tamaños de grano que van de grandes a medios, por lo

que, es denominada escombrera minera, por las intervenciones de maquinarias para actividades mineras.

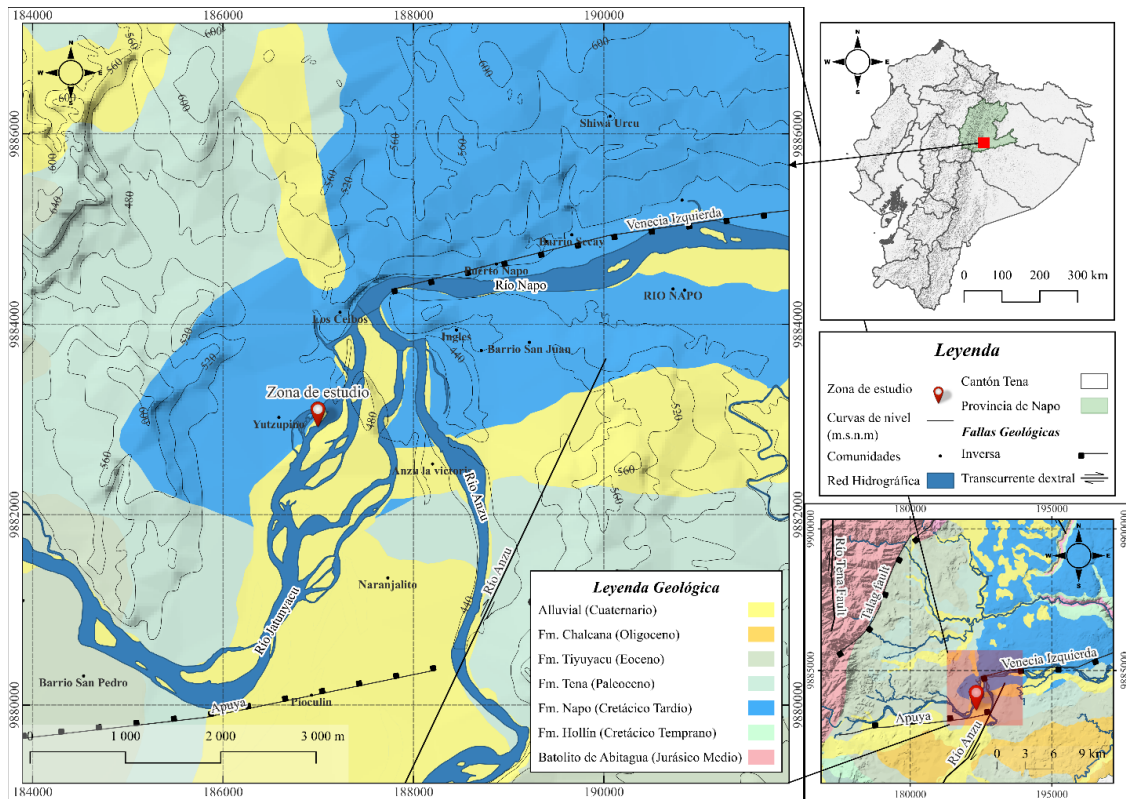


Figura 3: Mapa geológico de la zona de estudio, comunidad Yutzupino, Napo, Ecuador
Fuente: (Eguez et al., 2003; GAD Municipal de Tena, 2024; IGM, 2010; INEC, 2010; Instituto de Investigación Geológica y Energético, 2024).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Adquisición de datos

Se accedió hasta la comunidad para la toma de datos con el equipo de tomografía sísmica proporcionado por el laboratorio de Geociencias de la Universidad Regional Amazónica Ikiam. Nos situamos en la margen izquierda del río Jatunyacu, utilizando el método de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales.

Para el tendido de la línea sísmica se eligió que su longitud sea de 55 metros con 12 geófonos, con una distancia de 5m entre sí, los mismos que poseen una frecuencia de 4.5 Hz y fueron conectados al sismógrafo Geometrics ES-3000 y a la computadora portátil con el software *Geometrics Seismodule Controller* (SeisImager/SW TM, 2009).

Mediante los golpes que se generaron por un martillo de 6 kg sobre una placa de aluminio de 2.5 cm de espesor, se obtuvieron las señales como el ejemplo que se muestra en la **Fig. 4**, después de haber realizado las pruebas respectivas de funcionamiento del equipo.

El tendido de la línea sísmica se realizó en un espacio que no era totalmente plano el cual presentaba pendientes de hasta 1.5m.

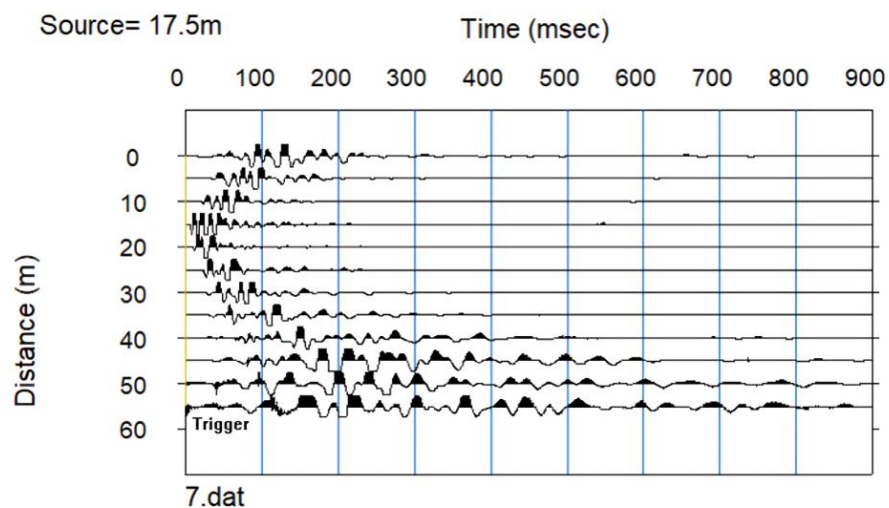


Figura 4: Gráfico del registro de llegada de una de las señales sísmicas obtenidas.

Realizado por: Jennifer Velastegui

3.2 Procesamiento de datos

Se aplicó los métodos de tomografía sísmica de refracción y análisis multicanal de ondas de superficie MASW para obtener modelos de velocidades de onda V_p y de corte V_s , para ello se utilizó el software *SeisImager*.

3.2.1 Tomografía sísmica de refracción

Con el complemento *Pickwin* se realizó un filtro de las 13 señales, las mismas que, requerían de un suavizado alto de 209 Hz cada una, para disminuir el ruido del río y especificar donde exactamente empieza el golpe que se ha generado con el martillo, es decir, donde empieza la onda P. Se realizaron 3 pruebas de picado de señales, para obtener un resultado de dromocronas convincente. Se hizo el picado de forma manual estableciendo la onda P en cada una de las señales para generar las curvas de tiempo de viaje en el complemento *Plotrefa*.

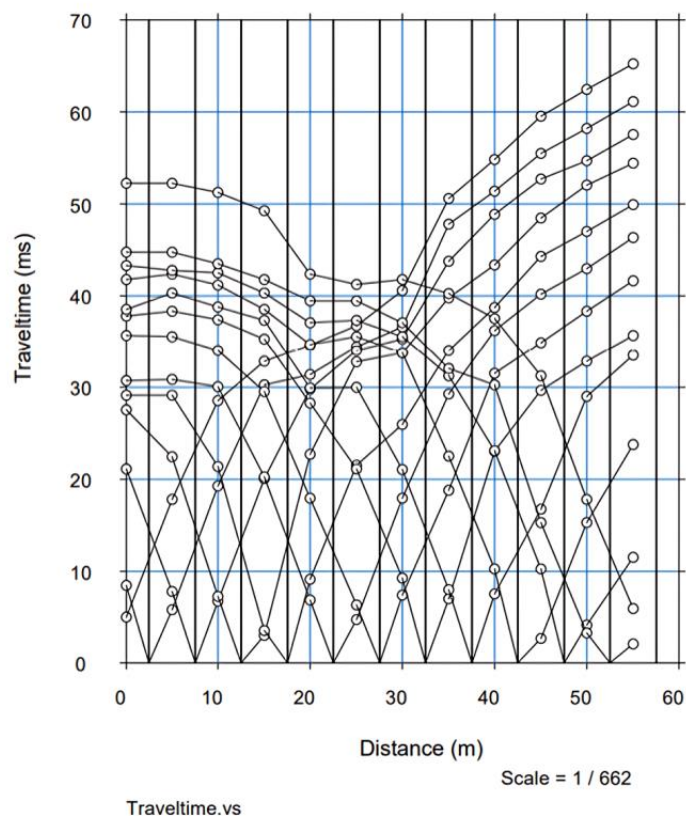


Figura 5: Curvas de tiempo de viaje para minimización de error en las iteraciones del modelo final.

Realizado por: Jennifer Velastegui

Mediante el complemento *Plotrefa*, se obtuvo el modelo *a priori*, en el cual se realizaron pruebas modificando los parámetros de profundidad, velocidad mínima y velocidad

máxima. Posteriormente se trazaron los rayos para determinar hasta qué profundidad se puede resolver el modelo a priori.

Tabla 1: Parámetros utilizados para generar el modelo inicial

Profundidad de la capa más baja (m)	Velocidad mínima (km/s)	Velocidad máxima (km/s)	Número de capas	Elevación en todo el tramo del modelo (m) +-4
18	0.3	2.65	10	440-450

Realizado por: Jennifer Velastegui

3.2.2 Regularización del método

A partir del modelo a priori se aplicó la regularización de *Tikhonov* mediante Octave para resolver el problema inverso de refracción sísmica con el fin de encontrar el punto de inflexión de la curva L, la regularización consistió en la minimización directa de las funciones inadaptadas tomando en cuenta la limitación de las matrices inversas. Araujo et al (2023) menciona que la regularización de *Tikhonov* consiste en encontrar el parámetro de regularización α que minimiza el funcionamiento paramétrico $P^\alpha(m, d)$ definido como:

$$p^\alpha(m, d) = \|Am - d\|^2 + \alpha \|m - m_{apr}\|^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, A pertenece a la matriz de derivadas parciales, m es el modelo que se busca resolver, d son los datos, α es el parámetro de regularización y m_{apr} es el modelo a priori.

La curva L es un gráfico entre la norma de error y la norma modelo a priori y el punto de inflexión es la solución, por eso se utiliza el error de la raíz cuadrada media (RMS) para la norma error que se obtiene sumando la ecuación anterior $RMS = \sqrt{\|Am - d\|^2}$. El error

representa el ajuste resultante de la tomografía y se reporta mediante el software como el resultado de la inversión (Araujo et al., 2023).

Para las distancias entre los modelos probados y el modelo *a priori*, se prueba tres tipos de normas l_2 , l_1 y l_∞ . Nuestro modelo *a priori* m_i^{apr} tiene n puntos discretos y el modelo probado es un vector mi . (Araujo et al., 2023) Las tres normas se definen de la siguiente manera

$$l_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - m_i^{apr})^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$l_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |m_i - m_i^{apr}| \quad (\text{Ec. 3})$$

$$l_\infty = \max\{|m_i - m_i^{apr}|\} \quad (\text{Ec. 4})$$

3.2.3 Suavizado para la estimación del punto de inflexión

El software *Seisimager* posee dos parámetros de regularización para la tomografía, el suavizado vertical y el suavizado horizontal (Araujo et al., 2024) los cuales cambiaron constantemente, según el número de pruebas que fueron necesarias, con los intervalos de [0.3-1] y [1-0.6] respectivamente de 50 interacciones. Al correr y guardar cada prueba realizada, se generaron valores de error de ajuste RMS, mediante los cuales se generaron modelos de Curva L (Hansen, 1992), donde se analizan las 3 normas: L_2 , L_1 e Inf , las cuales tienen valores que son vulnerables a errores experimentales que influyen para obtener el resultado final como se muestra en la **Fig. 6**, donde nos indica si los

parámetros y punto de inflexión son correctos para corroborar el modelo final que muestran la velocidad de las ondas Vp.

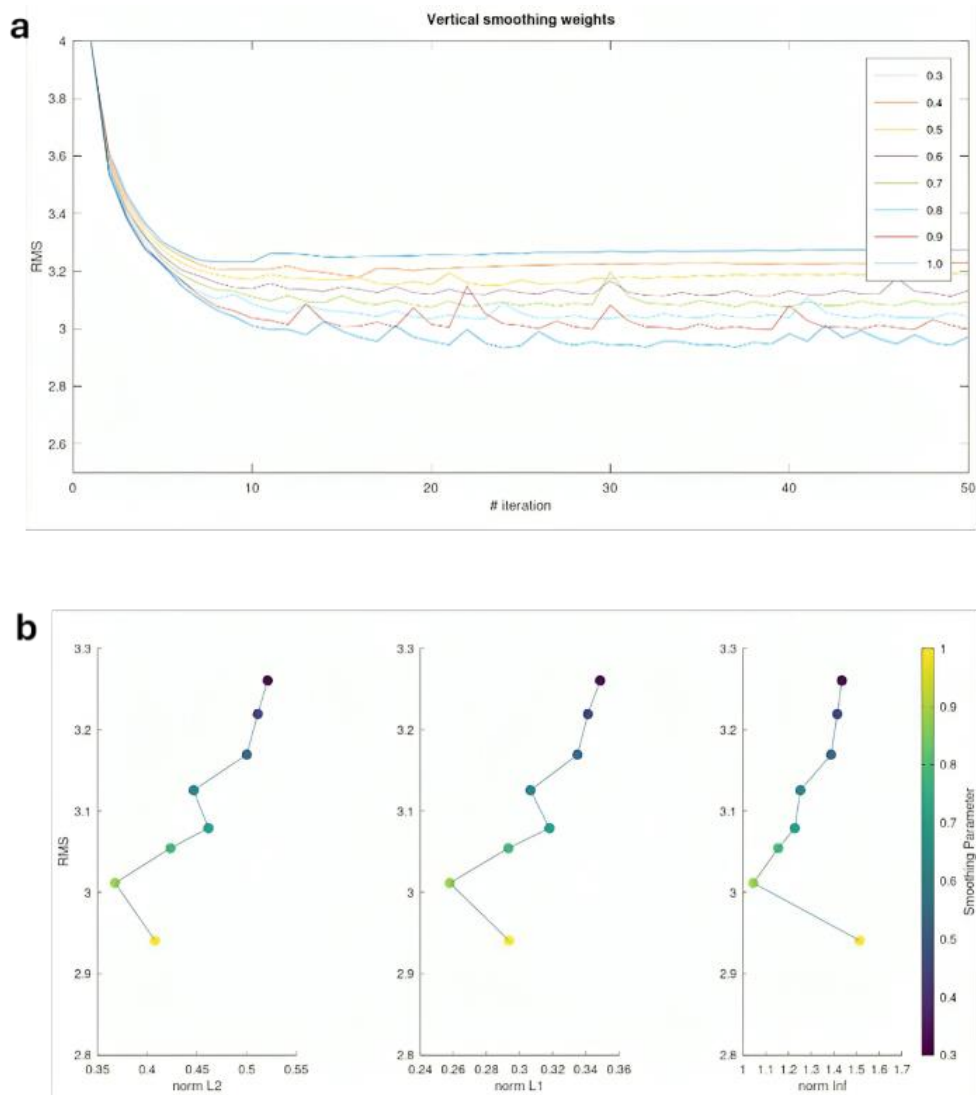


Figura 6: El gráfico a) corresponde a la convergencia de los datos y la inversión de parámetros verticales y horizontales. El gráfico b) corresponde a las tres normas en el eje horizontal. El vértice de la curva L se encuentre entre 0.8 y 0.9 en los tres tipos de normas.

Realizado por: Jennifer Velastegui

3.2.4 Análisis multicanal de ondas de superficie (MASW)

Para el análisis MASW se necesitó obtener el valor de velocidad de fase de la onda superficial de *Rayleigh* (c) como referencia, esto, a partir de la ecuación 5

$$c = \frac{V_p}{1.74} * 0.92 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde, V_p corresponde a la velocidad máxima del modelo final de la tomografía sísmica de refracción; el valor 1.74 es una constante de V_p/V_s , que es un valor normal para la corteza continental y el valor 0.92 es una constante sísmica. (Córdova et al., 2020)

Con el complemento *WaveEq* (*Surface Wave Analysis*) se realizó 4 pruebas en donde se establecieron parámetros de: velocidad de fase, profundidad, frecuencia e interacciones. Es así que se asignó una frecuencia mínima y máxima de 8-21 Hz respectivamente con 50 interacciones en cada prueba. La velocidad de fase y la profundidad debían ser modificadas constantemente hasta obtener un gráfico de dispersión favorecedor como se muestra en la **Fig. 7**. En este caso la velocidad de fase fue: 1401 m/s con una profundidad de 15 metros, arrojando un error de 2.09%.

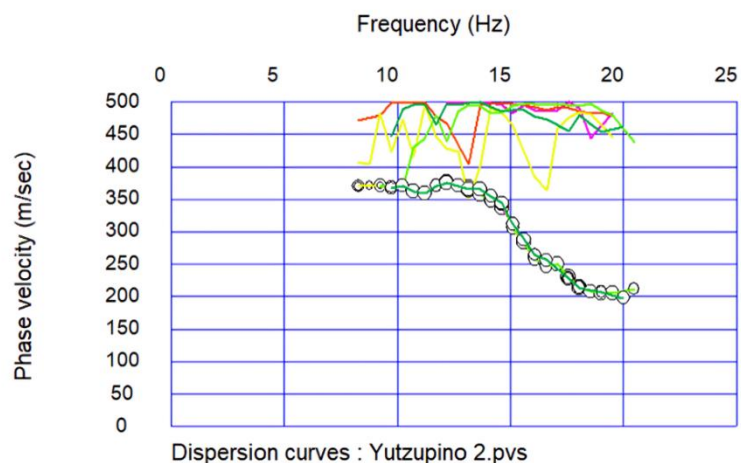


Figura 7: Gráfico de curva de dispersión con una frecuencia de 8 a 20 Hz, aplicando filtro y suavizado.

Realizado por: Jennifer Velastegui

Con *Geoplot (Visualize Data)* se pudo obtener el modelo 2D de las ondas de corte Vs donde se visualizan las secciones transversales del subsuelo a partir de la curva de dispersión.

3.2.5 Cálculo de parámetro de Poisson

Se realizó el cálculo de coeficiente de Poisson para constatar la presencia de fluidos y a la vez estimar la profundidad de estos, en caso de existir. Para esto se ha utilizado los resultados de velocidad de onda Vp y resultados de Vs, en Geoplot se elige la opción del cálculo rápido Vp/Vs, se ingresan los resultados anteriores de Vp y Vs y se obtiene una gráfica de relación de distancia vs profundidad y detectar la presencia de fluidos (Seismager/SW TM, 2009). A partir de este resultado calculamos el parámetro de Poisson como complemento para determinar la profundidad de niveles freáticos (Escobar & Araujo, 2024).

Adicionalmente, realizó la descripción de las capas del subsuelo, mediante la guía normalizada para el uso del método de refracción sísmica para la investigación del subsuelo según ASTM-D5777-00 (2011) y CNA 1993.

Tabla 2: Clasificación de perfiles de suelo según CNA 1993 y ASTM-D5777.

CNA, 1993		ASTM-D5777	
Velocidad Vp [m/s]	Descripción	Velocidad Vp [m/s]	Descripción
170 – 450	Suelos arenosos	240 - 610	Suelo intemperizado
300 – 650	Suelos con finos	460 - 915	Grava o arena seca
500 – 900	Suelos gruesos	1830 - 1220	Arena saturada
800 – 1,400	Depósitos de Talud	910 - 2750	Arcilla saturada
1,450 – 1,550	Materiales saturados	1430 - 1665	Agua
1,400 – 2,000	Roca blanda	1460 - 1525	Agua de mar
1,800 – 2,500	Roca muy fracturada	1830 - 3960	Arenisca
2,000 – 3,000	Roca fracturada	2750 - 4270	Esquisto, arcilla esquistosa
3,000 – 5,000	Roca intacta	1830 - 3960	Tiza
4,500 – 6,500	Granito sano	2134 - 6100	Caliza
6,000 – 7,500	Rocas Metamórficas	4575 - 5800	Granito
5,500 – 8,000	Caliza intacta	3050 - 7000	Roca metamórfica

Fuente: Adaptado de (Bernal & Tavera, 2020); (ASTM-D5777-00, 2011)

También se puede inferir el tipo de material del subsuelo según las velocidades de onda V_p mediante la **Tabla 3** (Guzmán, 2022).

Tabla 3: Tipos de material para perfiles sísmicos.

Material		V_p (m/s)
No consolidado	Arenas y gravas	400-2300
		300-1800
		500-1500
Rocas sedimentarias	Conglomerado	10-800
	Arenisca	1400-4400
		1800-4900
		1400-4500
	Lutita	2000-4100
		2100-4400
		1600-4100
Limolita	3000-5000	

Fuente: Adaptado de (Guzmán, 2022).

Para las velocidades de onda V_s se utiliza la información de la **Tabla 4**, la cual permite clasificar los estratos encontrados (NEC, 2014).

Tabla 4: Clasificación de los perfiles del suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante	760 m/s $> V_s \geq 360$ m/s
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante	360 m/s $> V_s \geq 180$ m/s
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante (Suelo blando)	$V_s < 180$ m/s

Fuente: (NEC, 2014)

4 RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Tomografía sísmica de refracción

Mediante la adquisición y procesamiento de datos sísmicos se obtuvieron los resultados de la tomografía sísmica de refracción de velocidad de onda V_p que muestran la variación de las velocidades en la secuencia de las capas del subsuelo con respecto a la profundidad como se visualiza en la **Fig. 8**.

Se estableció la sismoestratigrafía del subsuelo de 3 estratos principales, ya que el resultado alcanzó una profundidad de 18 m con una distancia de 55m.

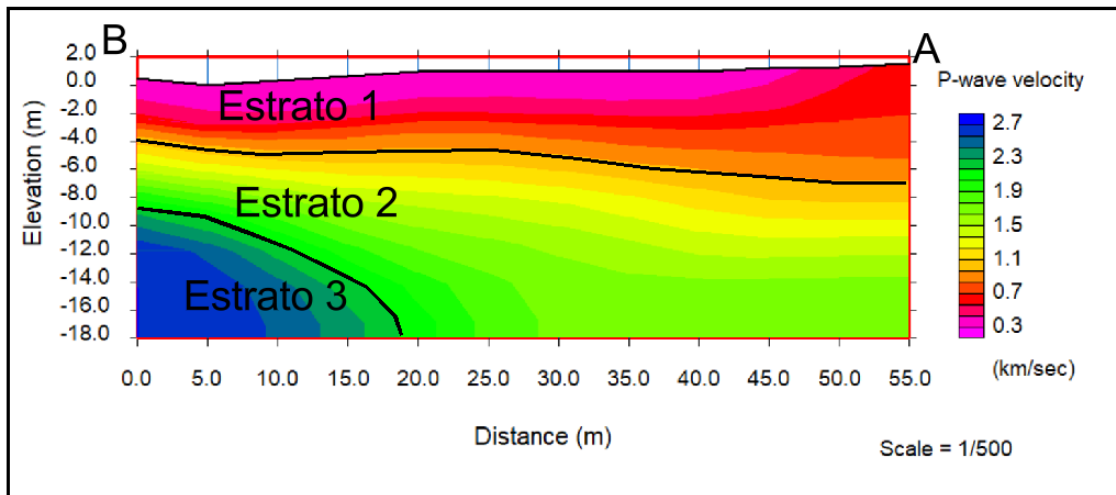


Figura 8: Perfil sísmico de velocidades de onda V_p

Realizado por: Jennifer Velastegui

El Estrato 1 posee 4 metros de espesor con una velocidad de onda que va de 0.3 a 0.9 km/s aproximadamente, a excepción del extremo derecho, el cual presenta el aumento de espesor a medida que aumenta la distancia.

El Estrato 2 presenta alrededor de unos 5 metros de espesor en el rango de 0 a 5 metros de distancia en el eje X, a partir de los 10 metros de distancia, el espesor de esta unidad

aumenta hasta aproximadamente 11 metros de espesor. Aquí la velocidad de onda oscila entre 1 a 2.2 km/s.

El Estrato 3 con un espesor de 9 metros aproximadamente con un decaimiento que llega hasta los 19 metros de distancia, con velocidad de onda variable entre 2.3 a 2.7 km/s.

4.2 Análisis Multicanal de Ondas de Superficie

En cuanto a los resultados del modelo 2D de onda de velocidad Vs que se han obtenido mediante el método de análisis multicanal de ondas superficiales, se han detectado 2 estratos en el subsuelo como se muestra en la **Fig. 9**. Esta imagen arroja una profundidad de 10 metros.

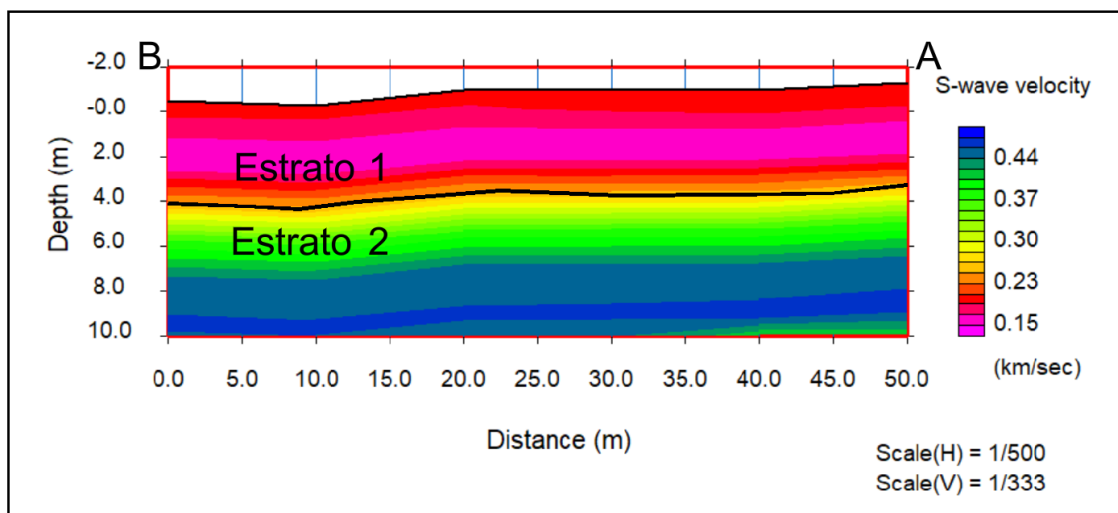


Figura 9: Perfil sísmico de velocidades de onda Vs
Realizado por: Jennifer Velastegui

El estrato 1 con un espesor de 4 metros posee una velocidad de onda S que varía entre 0.15 a 0.23 km/s.

Estrato 2 con espesor de 3 metros, a una profundidad de 4 metros que posee una velocidad de onda S de 0.24 a 0.37 km/s.

En la onda S solamente se ha identificado la velocidad del estrato 1 y 2, ya que el estrato 3 tiene poca resolución.

4.3 Parámetro de Poisson

El cálculo de la relación V_p/V_s es utilizado como primer parámetro para determinar la presencia de fluidos en base a los valores que se muestran en la **Fig. 10.** y posterior la profundidad de niveles freáticos presentes.

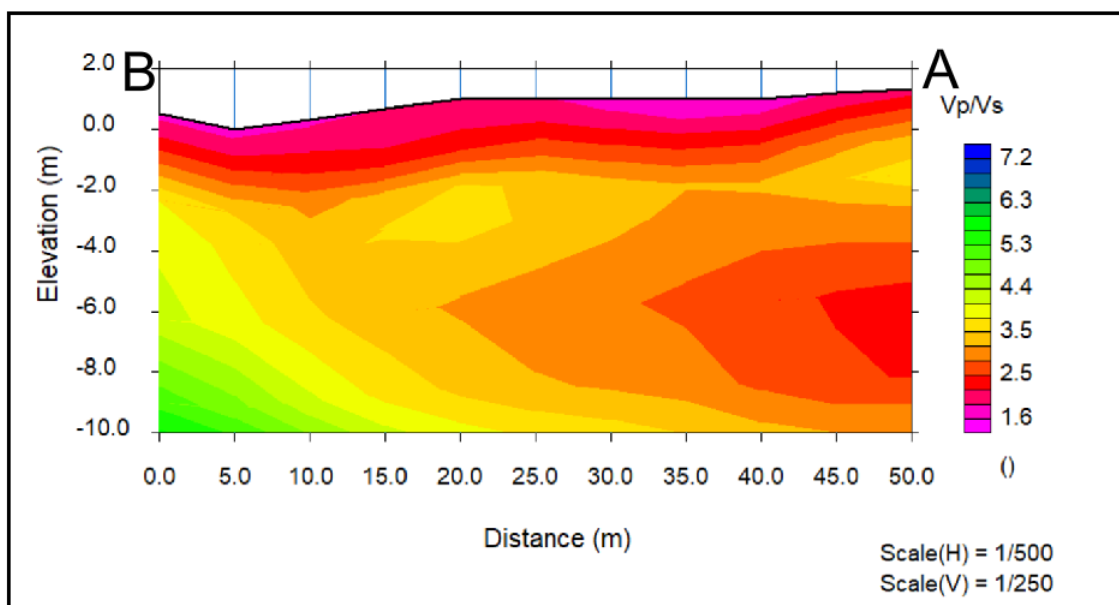


Figura 10: Cálculo de la relación entre las velocidades de onda P y onda S para detectar la presencia de fluidos.

Realizado por: Jennifer Velastegui

El parámetro de Poisson es complementario al cálculo V_p/V_s , ya que permite obtener información más precisa para determinar la profundidad del nivel freático, como se observa en el resultado de la **Fig. 11.**

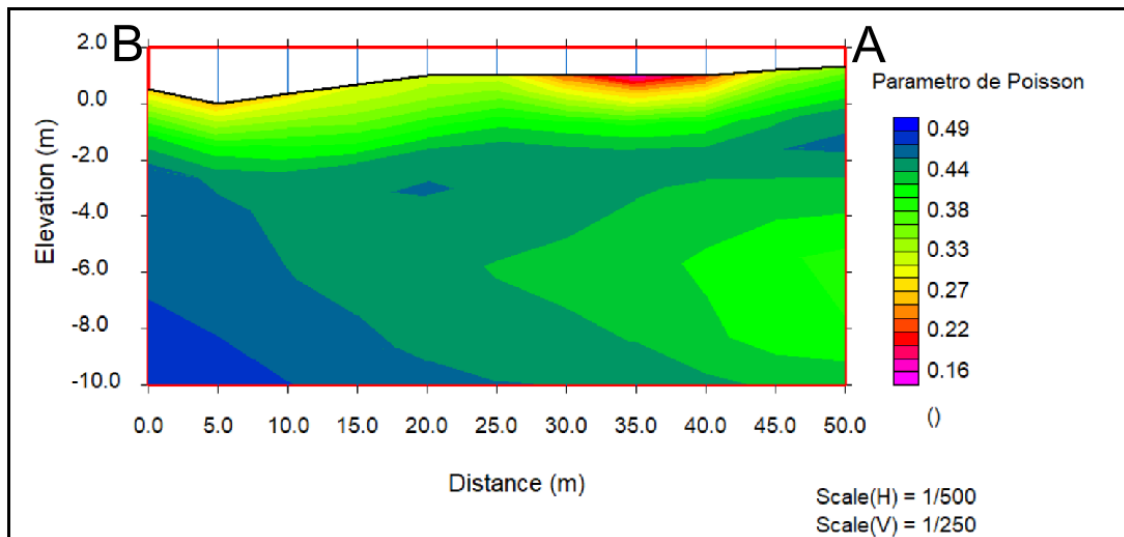


Figura 11: Resultado del cálculo del parámetro de Poisson
Realizado por: Jennifer Velastegui



Figura 12: Estratigrafía de un depósito realizado en el área "Confluencia" comunidad Jatunyacu.
Fuente: (Sarabia, 2016)

Con base a los resultados y estudios previos de Sarabia (2016), donde se han realizado pozos, se puede determinar la sismoestratigrafía del subsuelo de la zona de estudio y comparar el tipo de suelo y material. De acuerdo con los valores de las tablas de clasificación de perfiles que se acercan a los valores de las velocidades de onda V_p y V_s , se infiere lo siguiente en los 3 estratos encontrados:

Estrato 1: Compuesto de suelos gruesos, de material suelto o no consolidado predominando la grava y arena, compuesto de material de grano fino y grueso. Esta unidad puede ser catalogada como tipo de suelo D.

Estrato 2: Puede contener materiales saturados, con arena o arcilla saturada, compuesto de areniscas. Puede pertenecer al tipo de suelo D que representa a los suelos rígidos.

Estrato 3: Es un subsuelo compuesto de caliza, rocas sedimentarias, específicamente lutitas. Esta unidad pertenece al tipo de suelo C.

En cuanto a la **Fig. 12** existe semejanza con la secuencia de los estratos, a excepción de la sobrecarga, se puede deducir que es por la remoción del suelo que se ha presentado en los últimos 2 años en esa zona. La estratigrafía de ese pozo tiene una profundidad de 9 metros por lo que se estima que la presencia de grava continua, es decir aún pueden existir recursos a más profundidad.

Mediante el resultado del cálculo de relación V_p/V_s **Fig. 10** y el Parámetro de Poisson **Fig. 11** se puede determinar la presencia de fluidos y a que profundidad se encuentran, como mencionan Escobar y Araujo (2024) que, cuando el valor de la relación V_p/V_s aumenta es porque existen fluidos y con el parámetro de Poisson se puede detectar de forma más precisa los niveles freáticos. En este caso no se detecta un valor V_p/V_s alto que describa la presencia de agua líquida o agua subterránea, pero con el Parámetro de Poisson se logra observar acumulaciones de agua que son puntuales, es decir, no existe un nivel freático definido, solamente los valores altos de 0.49 que son filtraciones que vienen directamente del río Jatunyacu.

5 CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de tomografía sísmica de refracción, la cual identifica las velocidades de onda V_p y el análisis multicanal de ondas de superficie (MASW) que presentan las velocidades de onda V_s , es posible caracterizar la sismoestratigrafía del subsuelo y se puede interpretar que, cada estrato encontrado puede asemejarse a las Formaciones que conforman a la zona de estudio, es así como:

El estrato 1 con velocidades V_p (300-900) y V_s (150-230) de material no consolidado de grava y arena, puede pertenecer a depósitos recientes (Aluvial Jatunyacu), debido al material removido y a las crecientes que pudieron darse en el lapso de 2 años.

Estrato 2 con velocidades V_p (1000-2200) y V_s (240-370) de materiales y arcillas saturadas que pueden asemejarse a las características que posee a la Formación Tena.

Estrato 3 con velocidades V_p (2300-2700) y V_s (380-440) está compuesto de calizas que se asemejan a la Formación Napo

De igual manera, no se identificaron filtraciones o acumulación de agua en los primeros 8 metros de profundidad, pero mediante el parámetro de Poisson, se encuentra la presencia de un nivel freático con un valor alto a 10 metros de profundidad y se puede deducir que su presencia se debe a las filtraciones del río Jatunyacu.

Tomando en cuenta que este ensayo geofísico es considerado de fácil manejo y los métodos que han sido aplicados en este estudio, han permitido cumplir los objetivos propuestos, obteniendo resultados favorables y consistentes, por lo que, puede contener información complementaria para investigaciones futuras que se asemejen al área de estudio, en las cuales se utilicen herramientas como la tomografía eléctrica y perforaciones.

Se recomendaría realizar una línea sísmica más extensa en una zona más habilitada, para poder identificar de manera más clara la formación Napo.

6 REFERENCIAS

- Actis, R. A. (2009). *ESCOMBRERAS UBICACIÓN, ESTABILIDAD Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL* (Fundación EMPREMIN, Ed.; 1a ed.). <https://core.ac.uk/download/pdf/231220982.pdf>
- Araujo, S., Guzmán, O., Guamán, A., Espín, R., García, I., & Chulde, E. (2023). Seismic refraction tomography in San Luis, headward Coca River erosion zone. *Journal of Applied Geophysics*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104981>
- Araujo, S., Guzmán, O., Rubio, R., Guerrero, P., Rojas, E., Moposita, W., García, I., Puetate, M. F., & Guamán, A. (2024). Seismic surveys and inverse problems regularization in the Ecuadorian Amazon. In P. A. Quishpe, H. M. Ortega-Andrade, C. Ávila, R. Espinosa, & M. Herrera-Robledo (Eds.), *NATURE BASED LIVING LAB* (pp. 74–97). CEDIA.
- ASTM-D5777-00. (2011). Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. *Nimonik*. [https://www.document-center.com/standards/show/ASTM-D5777/history/2000%20R11\(E1\)%20EDITION](https://www.document-center.com/standards/show/ASTM-D5777/history/2000%20R11(E1)%20EDITION)
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). Introducción. In *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (pp. 13–20). Institut français d'études andines. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.2984>
- Bernal, I., & Tavera, H. (2020). *ESTUDIO GEOFÍSICO DE LOS ACANTILADOS DE LA COSTA VERDE EN EL DISTRITO DE MAGDALENA DEL MAR*.
- Córdova, A., Espin, P., & Pacheco, D. (2020). Characterization of Tectonic - Magmatic Seismic Source at Chiles - Cerro Negro Volcanic Complex (CCNVC). *EGU2020*. <https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU2020-12453>
- 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*. USGS Open-File Report 03-289.
- Escobar, J. C., & Araujo, S. (2024). *Estudio isotópico e hidrogeológico de la zona minera de ECSA*. Convenio de Ecuacorriente S.A. en el Estudio de Cuencas Hídricas de la Relavera Tundayme.
- GAD Municipal de Tena. (2024). *Levantamiento de Línea Base*.
- Guzmán, M. (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.
- Hansen, P. C. (1992). Analysis of Discrete Ill-Posed Problems by Means of the L-Curve. *SIAM Review*, 34(4), 561–580. <https://doi.org/10.1137/1034115>
- IGM. (2010). *Mapa de Sombras 50k*. <https://www.geoportaligm.gob.ec/dtm/wms>
- INEC. (2010). *División Político - Administrativa*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/division-politico-administrativa/>
- Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2024). *Geología del Ecuador Escala 1:100.000*. geoportal.geoenergia.gob.ec/iige/

- Jiménez Martínez, R. C., Cisneros Zúñiga, C. P., & Montero Barrera, D. A. (2023). ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA VULNERABILIDAD DE DERECHOS DE LA NATURALEZA PRODUCTO DE LA MINERÍA ILEGAL EN LA PROVINCIA DE NAPO. *Universidad y Sociedad*, 15(S2), 612–621.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3rd ed.).
- Lopez, J. M., Mejía, J. A., & Vega, N. (2008). “APLICACIÓN DEL METODO DE REFRACCION SISMICA PARA LA DETERMINACION DE VELOCIDADES DE ONDAS P.” Universidad de El Salvador.
- Mejía, M., & Acipio, A. (2019). Prospección geoquímica para oro, en terrazas aluviales del rio Pastaza. *Ciencia Digital*, 3(3.1), 375–389. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.1.709>
- Mendoza, P. (2015). *EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE TERRAZAS ALUVIALES EN LA CONCESIÓN “EL ICHO”* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4908>
- Mojica, A., Cubilla, O., Silva, E., Ladrón de Guevara, J., Ruiz, A., Ho, C., & Toral, J. (2022). Combinando el método de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales para la detección de niveles freáticos someros en el noroccidente del Istmo de Panamá. *RIDTEC*, 18, 108–116.
- NEC. (2014). *PELIGRO SÍSMICO DISEÑO SISMO RESISTENTE*.
- Ramos, H. (2015). *Estudio de propiedades dinámicas de un talud mediante métodos sísmicos activos y pasivos en la 3ª sección del Bosque de Chapultepec*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/7750/1/Tesis.pdf>
- Redpath, B. B. (1973). SEISMIC REFRACTION EXPLORATION ENGINEERING SITE INVESTIGATIONS. *U.S Army Engineer Waterways Experiment Station Explosive Excavation Research Laboratory*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/4409605-VpU3Hi/>
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). <https://bcs.wiley.com/he-bcs/Books?action=index&bcsId=6441&itemId=0471485365>
- Rinaldi, V. A., Ibarra, H. V, Viguera, R. F., & Harasimiuk, J. C. (2016). Aplicación de la tomografía sísmica para la detección de fallas estructurales en una formación terciaria. *Revista Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 3(2).
- Sarabia, J. (2016). *DISEÑO DE EXPLOTACIÓN DE LOS DEPÓSITOS AURÍFEROS ALUVIALES PROFUNDOS DEL RÍO JATUN YACU, ÁREA CONFLUENCIA, TENA*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4922/1/53T00011%20%20PDF.pdf>
- SeisImager/SW TM. (2009). *SeisImager/SW TM Manual Windows Software for Analysis of Surface Waves Pickwin TM v. 4.0.1.5 WaveEq TM v. 2 Including explanation of surface wave data acquisition using Geometrics Seismodule Controller Software for ES-3000, SmartSeis ST, Geode, and StrataVisor NZ seismographs*.