



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

**ESTUDIO DE TOMOGRAFÍA SÍSMICA POR REFRACCIÓN Y
PROPAGACIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES EN EL TALUD
NORTE, PUENTE DE LA AVENIDA PERIMETRAL, RÍO TENA,
TENA, ECUADOR.**

Proyecto de investigación previo a la obtención de Título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR

JUAN CARLOS VILLACRES OÑA

Napo – Ecuador

2024



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

Estudio de tomografía sísmica por refracción y propagación de ondas superficiales en el talud norte, puente de la avenida perimetral, río Tena, Tena, Ecuador.

Proyecto de investigación previo a la obtención de Título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR: JUAN CARLOS VILLACRES OÑA

TUTOR: PhD. JOSÉ SEBASTIÁN ARAUJO SORIA

Napo – Ecuador

2024

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

Tena, 15 de febrero de 2024

De mi consideración:

Yo, Juan Carlos Villacres Oña con documento de identidad 1727257915 declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de 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 el presente documento son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

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

Atentamente,



Juan Carlos Villacres Oña

CI: 1727257915

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORÍO INSTITUCIONAL

Yo, Juan Carlos Villacres Oña, con documento de identidad N°1727257915 en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación Estudio de tomografía sísmica por refracción y propagación de ondas superficiales en el talud norte, puente de la avenida perimetral, río Tena, Tena, 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.

Tena, 15 de febrero de 2024



Juan Carlos Villacres Oña
1727257915

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de titulación: Estudio de tomografía sísmica por refracción y propagación de ondas superficiales en el talud norte, puente de la avenida perimetral, río Tena, Tena, Ecuador. En la modalidad de: Trabajo de Titulación – Artículo original en español y de manera optativa en inglés, adaptado a los parámetros y normas de una revista indexada, fue realizado por Juan Carlos Villacrés Oña, 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, 15 de febrero de 2024



José Sebastián Araujo Soria
C.I: 1802672871

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado con profundo agradecimiento a mi querido padre, cuyo apoyo incondicional ha sido mi faro durante toda mi vida, especialmente en los desafíos universitarios. y que nunca dejo de creer en mí. A mis valientes hermanos, Jhonatan, Walter y Armando, cuya constante ayuda y apoyo incondicional ha sido un pilar fundamental ante las adversidades que nos deparó el destino. A mis abuelos seres excepcionales, que, a pesar de todo, siempre han velado por mí, brindándome fuerzas, inspiración y el impulso necesario para superarme día a día. Este logro también es suyo, gracias por creer en mi cuando más los necesitaba.

AGRADECIMIENTOS

Al Ph.D. Sebastián Araujo, mi tutor de pregrado por confiar en mí y ofrecerme la oportunidad de llevar a cabo este importante trabajo de integración curricular. Agradezco también al Msc. Ronny Espín cuyos profundos conocimientos geotécnicos y paciencia han sido fundamentales para el desarrollo de mi trabajo. También mi reconocimiento especial al Msc. Santiago Balcázar, quien no solo ha compartido sus vastos conocimientos geológicos, sino que también ha sido un constante apoyo, proporcionándome orientación, valiosos consejos y motivación en el transcurso de mi investigación.

A mis entrañables amigos, Sisa, Genesis y Jefferson, quienes han sido testigos de nuestros momentos de estudio, brindándome un apoyo incondicional y compartiendo risas y travesuras, desde el primer día que llegamos juntos a la universidad. A pesar de los obstáculos que el destino nos ha impuesto, seguimos construyendo recuerdos y compartiendo momentos especiales. A ustedes, amigos, mi agradecimiento eterno por ser parte esencial de esta travesía.

Su contribución ha sido esencial para el éxito de este trabajo de integración curricular.

TABLA DE CONTENIDO

CARÁTULA	
DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR.....	ii
DECLARACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
Zona de estudio	3
MARCO GEOLÓGICO	5
METODOLOGÍA	7
Técnicas sísmicas.....	7
Estratigrafía.....	8
Adquisición de datos	8
Procesamiento de datos.....	9
Tomografía sísmica.....	9
MASW-MAM combinado	11
Estrategia de regularización	14
RESULTADOS	18
DISCUSIÓN	22
Geometría de los estratos	23
Clasificación sísmica.....	25
CONCLUSIÓN	27
REFERENCIAS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Parámetros de adquisición de tomografía sísmica, MASW y MAM.	8
Tabla 2:	Parámetros utilizados para generación del modelo inicial, a partir de la inversión de la tomografía.	10
Tabla 3:	Valores promedio de las velocidades de onda Vp y Vs en cada una de las unidades geológicas.	19
Tabla 4:	Parámetros para el cálculo de Vs15.....	21
Tabla 5:	Parámetros para el cálculo Vs30.....	21
Tabla 6:	Categorización de sitios basada en NEHRP (2003) y NEC-GC.....	25
Tabla 7:	Valores típicos de onda de propagación	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	4
Figura 2:	Mapa geológico de la zona de estudio.....	6
Figura 3:	Vista de la primera llegada de las señales sísmicas, la flecha azul indica la onda directa y las flechas rojas muestran las ondas superficiales en el primer punto de adquisición de la línea sísmica.....	9
Figura 4:	El software Plotrefa, desplazó iterativamente las curvas de tiempo de viaje para repartir el error de reciprocidad de forma uniforme para minimizar el RMSE frente al número de iteraciones.....	10
Figura 5:	Curva de dispersión (método MASW - fuente activa 2D MASW), con una frecuencia de 8 a 15 Hz. Las curvas de tolerancia se encuentran por encima de las curvas de dispersión.....	12
Figura 6:	Curva de dispersión (método MAM - fuente pasiva micro tremor en 1D MAM) con velocidad de fase de 225 a 475 m/s y una frecuencia de 4 a 11 Hz, y curvas de tolerancia.	12
Figura 7:	Curvas de dispersión MASW y MAM combinada, modificada como modelo inicial a partir del método de mínimos cuadrados para identificar el modelo final de la combinación de métodos.....	14
Figura 8:	El gráfico de la izquierda muestra la convergencia de los datos de (Root Mean Square) y la inversión de parámetros ajustada manualmente con valores verticales y horizontales. El gráfico de la derecha muestra, tres tipos de normas en el eje horizontal, con un suavizado vertical de 0.7 vertical.	16
Figura 9:	En el gráfico de la izquierda se muestra la convergencia del método MASW-MAM cambiado a partir del ajuste de la convergencia con 50 iteraciones. El gráfico de la derecha muestra las 3 normas con el cálculo de mínimos cuadrados, fijando los parámetros verticales en 0.5 y variando los parámetros de la regularización horizontal de 0.1 a 1.0 y estableciéndolo en 0.5.	16
Figura 10:	Diagrama de flujo de la secuencia metodológica empleada para obtener la adquisición de datos, procesamiento, regularización de modelos de velocidades y modelamiento final de tomografía sísmica y método MASW-MAM.	17

Figura 11:	Perfil sísmico de velocidad de onda P. Modelo final a partir del resultado de regularización con parámetros horizontal 0,9 y vertical 0,7. A partir de las velocidades de onda, revela cambios en la composición de los estratos.....	18
Figura 12:	Perfil de velocidad de las ondas de corte. También muestra la delimitación de espesores de las 4 unidades, mediante líneas horizontales rojas.....	19
Figura 13:	Columna estratigráfica representa la secuencia vertical de los estratos de la zona de estudio.....	20
Figura 14:	Disposición espacial de las capas geológicas a partir del perfil estratigráfico.	24

RESUMEN

La ciudad de Tena se encuentra ubicada en la zona subandina del Ecuador, y geológicamente el área de estudio se caracteriza por la presencia de depósitos fluviales y laharíticos poco competentes, sobre estos materiales se encuentra cimentado el puente del río Tena. Con el objetivo de realizar la clasificación sísmica de sitio, se generaron modelos de velocidades de ondas sísmicas mediante métodos geofísicos (Tomografía por refracción sísmica, MASW, MAM) y geológicos. Se identificaron 6 unidades estratigráficas mediante los métodos geofísicos, 4 unidades mediante un análisis de campo. Con las velocidades V_s y espesores de las unidades, se calculó la V_{s15} y V_{s30} , con el fin de clasificar el suelo de la zona de estudio, se obtuvo un suelo clase D (suelo rígido), de acuerdo a la normativa NEHRP y NEC. Los modelos de tomografía sísmica y ondas de corte (V_s) se ajustaron correctamente a la descripción geológica realizada en campo y a la estrategia de regularización sísmica. El presente estudio podrá servir para el diseño geotécnico de la cimentación en caso de la construcción de un nuevo puente.

Palabras claves: Unidad, tomografía sísmica, velocidad de onda, clasificación sísmica y regularización.

ABSTRACT

The city of Tena is located in the sub-Andean zone of Ecuador, and geologically the study area is characterized by the presence of weakly competent fluvial and lahatic deposits, on these materials the bridge of the Tena River is founded. With the objective of performing seismic site classification, seismic wave velocity models were generated using geophysical (seismic refraction tomography, MASW, MAM) and geological methods. 6 stratigraphic units were identified through geophysical methods, 4 units through field analysis. With the V_s velocities and thicknesses of the units, the V_{s15} and V_{s30} were calculated, in order to classify the soil in the study area, a class D soil (rigid soil) was obtained, according to the NEHRP and NEC regulations. The seismic tomography and shear wave (V_s) models were correctly adjusted to the geological description carried out in the field and to the seismic regularization strategy. This study may be used for the geotechnical design of the foundation in the case of the construction of a new bridge.

Key Word: Unit, seismic tomography, wave velocity, seismic classification, and regularization.

INTRODUCCIÓN

La región oriental ecuatoriana exhibe una diversidad morfológica que se divide en dos áreas: el oriente occidental que comprende la zona Subandina, y la región oriental, caracterizado por tierras bajas (Tschopp H.J. et al. 1953). La geodinámica geodésica de esta zona se ha visto afectada por fenómenos naturales en los últimos años (Gutscher et al., 1999). La ciudad de San Juan de los Dos Ríos de Tena se sitúa en el valle del río Misahuallí, en el corazón de la región amazónica ecuatoriana, en las vertientes externas de la cordillera de los Andes. Limitada al norte por Archidona, al sur por Arosemena Tola. Por otro lado, la ciudad es atravesada por la Panamericana-Troncal Amazónica E45. (GAD MUNICIPAL Tena, 2020)

Las fuertes precipitaciones han provocado que el río Tena incremente su caudal, en años recientes esto ha provocado considerables riesgos que perturba la infraestructura pública, evidenciando la vulnerabilidad ante eventos sísmicos, deslizamientos, crecientes fluviales, erosión por parte del río y un constante flujo de transporte pesado que produce daños contraproducentes a la panamericana y al puente de la avenida Perimetral ubicado en el barrio Tereré. (Lavell A., 1999; Uvidia Vilema et al., 2019). En este contexto, los métodos geofísicos y geotécnicos en ingeniería han emergido como herramientas esenciales, proporcionando una visión integral de las estructuras y la litología del subsuelo (Benson et al., 1984; Goldstein et al., 1994). Técnicas de prospección geofísicas, como la sísmica de refracción, el análisis de ondas multicanal y las ondas de corte superficiales, se aplican para determinar las características del terreno y encontrar ubicaciones óptimas para la construcción y mitigar problemas relacionados con geofísica, basándose en perfiles de velocidades de onda y normativas nacionales e internacionales. (Bridle, 2006; Pérez et al., 2013)

El reconocimiento de las velocidades de onda (V_p) y (V_s), son cruciales para comprender el comportamiento del suelo, el potencial de licuefacción y las frecuencias naturales ante eventos sísmicos. La información sobre la rigidez del suelo se convierte en un parámetro fundamental para caracterizar la respuesta del suelo a las sacudidas, haciendo más eficiente la estimación de la amplificación del sitio. (Bauer et al., 2001; Borchardt, 1994; Hunter et al., 1993)

El método de tomografía sísmica combina tendidos de refracción convencional y técnicas de inversión de tiempos de viaje para la distribución vertical de la velocidad de onda primaria V_p que proporciona imágenes bidimensionales de la distribución de las velocidades de onda (Schuster & Quintus-Bosz, 1993). Con sus diversas aplicaciones, incluyendo la evaluación de la estratigrafía del subsuelo, determinación del techo de roca, la posición del nivel freático y la detección de fallas geológicas, la geofísica se ha convertido en una herramienta esencial. Además, sus métodos se han extendido para determinar parámetros dinámicos del suelo. (Kearey et al., 2002)

La técnica de análisis espectral de ondas superficiales (MASW), se basa en la generación de mayor eficacia en el tipo de prospecciones sísmicas de superficie utilizando fuentes sísmicas verticales, ofreciendo secciones eficientes de velocidades de ondas sísmicas en 1D y 2D a profundidades poco profundas (Park et al., 1997). Mientras que la técnica de análisis de microtemores mediante un sistema multicanal sobresale por su excepcional resolución y funcionalidad, otorgándonos la capacidad de realizar análisis detallados para la caracterización de perfiles de velocidades de onda S con una precisa caracterización geotécnica del subsuelo. (C Park et al., 1999)

Los métodos de análisis espectral de ondas superficiales (MASW) y modelamiento de arranque (MAM) nos permite obtener curvas de dispersión a partir de las ondas Rayleigh, utilizando como base los ruidos sísmicos ambientales (Louie, 2001). Este ensayo combinado se distingue por su empleo de un análisis de datos multicanal y la exploración espectral de ondas superficiales (V_s) originadas a partir de fuentes específicas de energía. (Santisteban I, 2012)

La investigación se centra en la caracterización sísmica, un aspecto fundamental para la personalización de la roca, fallas y estructuras geológicas del subsuelo mediante técnicas sísmicas. Estas técnicas posibilitan la estimación de las propiedades como velocidades de onda P y S, densidad, litología, entre otras (García & Martínez, 2006). Además, la definición de contactos estratigráficos, que aborda las interrupciones en la sedimentación manifestadas como discontinuidades, presenta variadas características, tales como discordancia erosionales, contactos netos o interrumpidos.

La clasificación sísmica de sitio constituye un procedimiento que posibilita la evaluación de la respuesta sísmica de un sitio específico considerando las características

geológicas y geotécnicas del terreno. Este proceso es fundamental en la medición y análisis de tres factores geotécnicos principales: la velocidad de propagación de ondas sísmicas, la relación de amplitud de dichas ondas y la densidad aparente del suelo (Tsighe & García, 2006). Estos datos son fundamentales para asignar el sitio mediante cuatro categorías que va desde el tipo de suelo firme hasta el suelo más suave, proporcionando así una comprensión detallada de la respuesta sísmica esperada en función de la naturaleza del terreno (NEHRP, 2020).

El propósito de este estudio es llevar a cabo una caracterización sísmica del área de investigación mediante métodos especializados para la clasificación de sitio. A partir de la generación de modelos de velocidades sísmicas aplicando los métodos de tomografía por refracción sísmica y la combinación de MASW-MAM para la generación de velocidades sísmicas. Estos modelos se utilizarán conforme las normativas (NEHRP Y NEC-SE-GE), con la finalidad de realizar una clasificación sísmica in situ.

Zona de estudio

La zona de investigación está situada en el Barrio Tereré de la ciudad de Tena, a un costado del río Tena, a 370 m de la unión cerca con el río Misahuallí. La ubicación es perpendicular al puente de la avenida perimetral de la Ruta Panamericana-Troncal Amazónica E45. La Figura 1 ilustra específicamente el emplazamiento de línea sísmica, considerando las coordenadas geográficas de latitud 0°59 '24.06" S, longitud 77°48' 27.90" O, y a una altitud de 518 m sobre el nivel del mar.

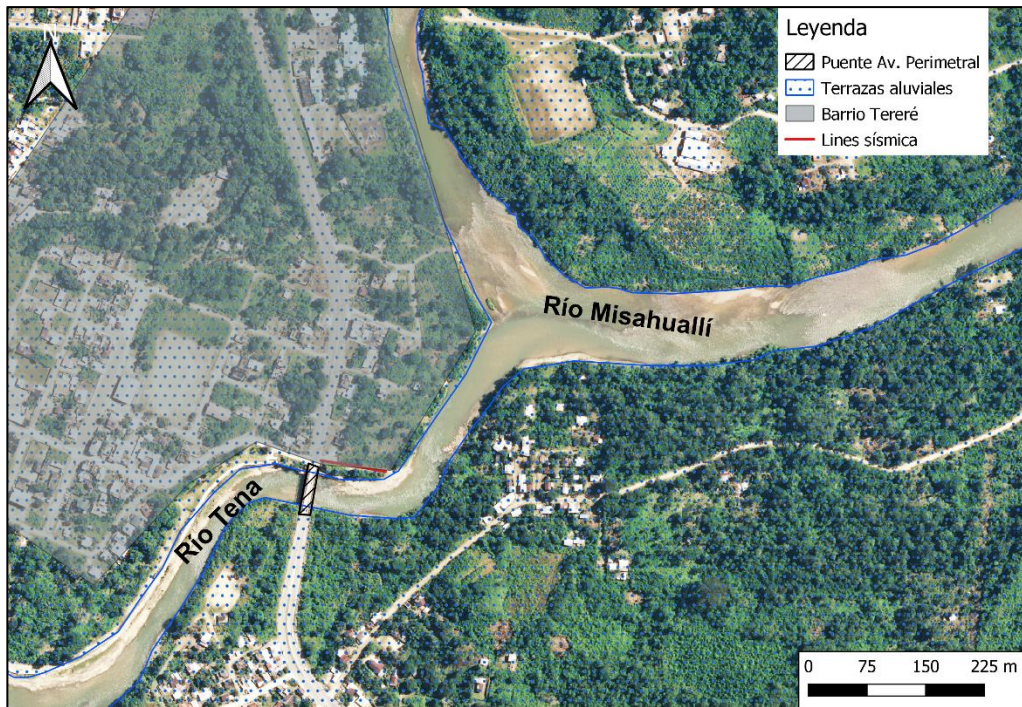


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio, para la realización de línea sísmica.

Realizado por: Juan Carlos Villacres

MARCO GEOLÓGICO

La Región Subandina del Ecuador, particularmente en la cuenca Oriente, se distingue por su compleja posición geodinámica, actuando como la cuenca de ante-país en el trasarco de los Andes ecuatorianos. Este enclave geográfico involucra interacciones intrincadas entre magmatismo, fallas tectónicas, sismos y actividad volcánica, especialmente hacia el sur (Aizprua et al., 2020; Baby et al., 1999). Morfológicamente, la cuenca Oriente se caracteriza por los relieves subandinos del levantamiento Napo y la cordillera Cutucú con dirección noroeste, mientras que hacia el suroeste se extiende la desembocadura del mega cono aluvial Pastaza. (Räsänen et al., 1992)

El ámbito de estudio engloba la geología regional, focalizándose en la meticulosa descripción de las principales secuencias geológicas que incluyen la Fm Napo, Fm Tena, Fm Tiyuyacu y depósitos aluviales. (Haq et al., 1987) La Fm Napo comprende una sucesión variable de areniscas marinas someras localizadas en el sub cinturón de empuje andino. Por otro lado, la Fm Tena, se caracteriza por una serie de sedimentos intercalados de lutitas rojizas, y escasos conglomerados dispersos. Por otra parte, la Fm Tiyuyacu está compuesta por secuencia de conglomerados, areniscas gruesas y finas, cuarzo bateado blanco en pocas cantidades y guijarros metamórficos. Finalmente, los depósitos fluviales caracterizan sedimentos correspondientes a secuencia de conglomerados debido a un apilamiento de canales secuenciales típicas de depósitos trenzados. (Ruiz G, 2002)

La Cordillera real ejerce una influencia significativa en la geología y la formación de depósitos aluviales, diversos sedimentos son transportados desde las montañas hacia áreas más bajas como valles y terrazas aluviales. Las terrazas aluviales se caracterizan por ser formaciones geomorfológicas que comprenden una variedad de sedimentos como: arenas, gravas, limos y arcillas (Aspden & Litherland, 1992). Estas estructuras son comunes y se originan a través de procesos de erosión y sedimentación llevado a cabo por los ríos (Barral H, 1986). En particular, el abanico de sedimentos del río Tena visto en la Figura 2, destaca por la presencia de materiales de origen aluvial y volcánico. Además de analizar la composición de terrazas aluviales, es crucial examinar el extenso depósito de flujos volcánicos presentes en la zona de estudio. Se estima que estos flujos fueron transportados por los afluentes de los ríos Misahuallí y Pano, sugiriendo que el

lahar Tena pudo descender desde la Cordillera Oriental, conforme menciona Sntaxi (2023), la evidencia indica que una notable cantidad de materiales líticos como gravas, areniscas, conglomerados, bloques de roca de andesita y granitoides, provenientes de los volcanes Sierra Azul y Sumaco descendieron por el flanco oriental de la Cordillera. Lo que contribuye de manera significativa a la formación de depósitos masivos en el abanico del río Tena, los cuales se surgieron como resultado del arrastre de material granítico y cambios del curso del río.

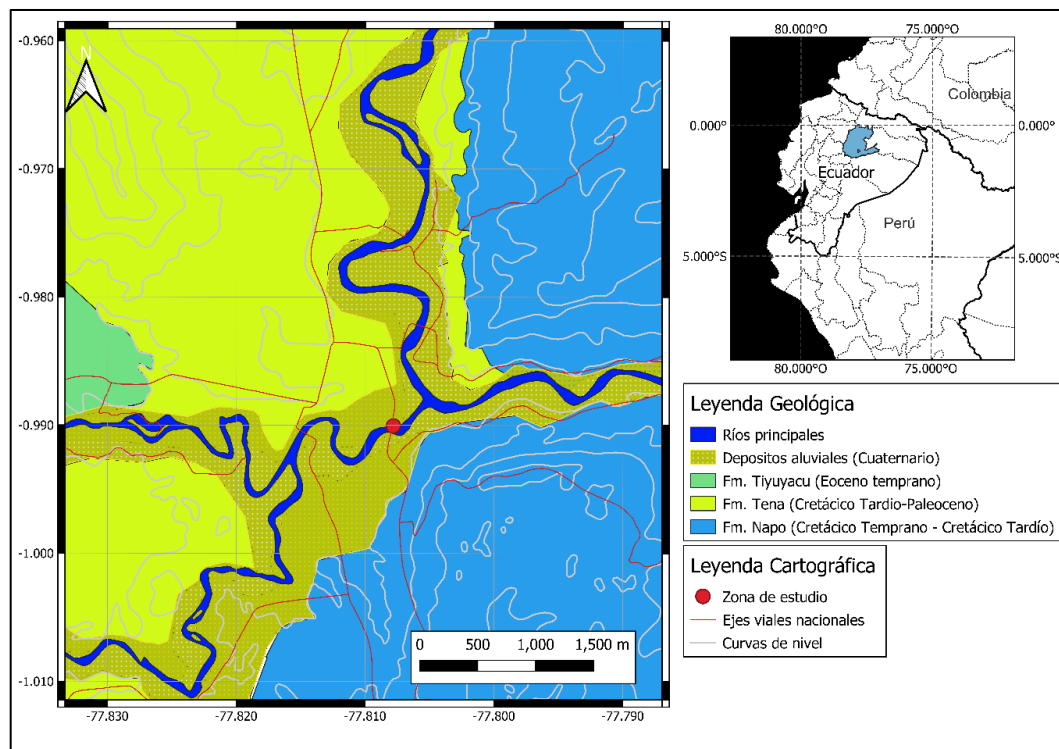


Figura 2: Mapa geológico de la zona de estudio (punto rojo) por encima de la Fm Tena y Depósitos aluviales del cuaternario, cerca del río Tena. (Duque et al., 2015; Eguez et al., 2003)

Realizado por: Juan Carlos Villacres

METODOLOGÍA

Se obtuvieron las velocidades de onda primaria y velocidad de onda de corte del subsuelo. La velocidad de onda de corte, tomando en cuenta el espesor de las capas, sirvió para realizar la clasificación sísmica del suelo en base a la normativa (NEHRP, 2020) y NEC- SE-GC (NEC-11, 2015). Es importante mencionar que los resultados de (V_p) y (V_s) se calcularon a partir de técnicas geofísica cuyos resultados se correlacionaron con información geológica recolectada en campo.

Técnicas sísmicas

Para la determinación de la (V_p), se utilizó el método de tomografía sísmica, el cual consiste en provocar sismos artificiales mediante una fuente activa, donde la mayor parte de energía se transforman en ondas longitudinales, denominadas ondas P (Telford, et al., 1990). Los geófonos miden el tiempo de arribo de la primera llegada de las ondas, obteniendo la distribución vertical de la velocidad de onda primaria (V_p), lo cual proporciona imágenes bidimensionales de la distribución de las velocidades de onda (Kearey et al., 2002; Rivera Zeta et al., 2016; Schuster & Quintus-Bosz, 1993).

Por otro lado, con el fin de calcular (V_s), se usaron dos técnicas. La primera técnica corresponde al método MASW. Este se basa en la generación de mayor eficiencia en el tipo de prospección sísmica utilizando fuentes sísmicas, mediante un trazo de conjunto de datos formado por frecuencias de velocidades de fase (Park et al., 1997). La segunda técnica fue el MAM, lo que permite realizar análisis de microtremores destacado por su resolución y funcionalidad, permite obtener análisis y caracterizar perfiles de velocidades (V_s) para la caracterización geotécnica. La combinación de los métodos MASW y MAM, permite invertir estas curvas de dispersión en un perfil de velocidades de onda de corte en 2 dimensiones (Strobbia, 2003).

Estratigrafía

En primera instancia, la descripción en campo se realizó mediante una inspección visual; se recolectó información estratigráfica y litológica de las capas que afloran en el margen izquierdo del río Tena, exactamente debajo de donde se llevó a cabo la línea sísmica. La adquisición de datos geológicos puede proporcionar los medios para calibrar datos geofísicos con el fin de limitar el significado geológico a partir de la información geofísica: como las facies sísmicas, fallas y contactos geológicos (Catuneanu, 2017).

Adquisición de datos

La implantación de la línea sísmica en campo se orientó paralela al rumbo del talud, cuyo extremo de la línea sísmica coincide con el estribo izquierdo del puente sobre el río Tena en el barrio Tereré. Se utilizaron geófonos de una frecuencia de 4.5 Hz que están conectados al sismógrafo Geometrics ES3000. Además, un martillo de 6 kg como fuente sísmica y una placa de aluminio de 2.5 cm de espesor. La línea sísmica estuvo conformada por 12 geófonos separados por una distancia de 5 m. La adquisición de datos se basó en el manual del software (SeisImager/SW TM, 2009). Los parámetros principales de adquisición para los 3 métodos se visualizan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de adquisición de tomografía sísmica, MASW y MAM.

Técnicas sísmicas	Parámetros	Configuración
Tomografía sísmica	Longitud del registro	2 segundos
	Intervalo de muestra	0.275 milisegundos
	Disparador	Automático
MASW	Longitud del registro	2 segundos
	Intervalo de muestra	0.275 milisegundos
	Disparador	Automático
MAM	Longitud del registro	20 segundos
	Intervalo de muestra	2 milisegundos
	Disparador	manual

Realizado por: Villacres, Juan, 2023.

Procesamiento de datos

Tomografía sísmica

Se registraron un total de 12 archivos de datos DAT para su respectivo procesamiento. Se utilizó el software Seismager/2DTM para el procesamiento de señales. Se identificaron las primeras llegadas de las señales con el software Pickwin como se muestra en la Figura 3. Se corrigieron los errores revisando las dromocronas con el complemento de seismager Plotrefa Figura 4. A continuación, se estableció el modelo inicial tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 2. Se realizaron algunas pruebas numéricas con diferentes valores de velocidades mínimas y máximas a distintas profundidades.

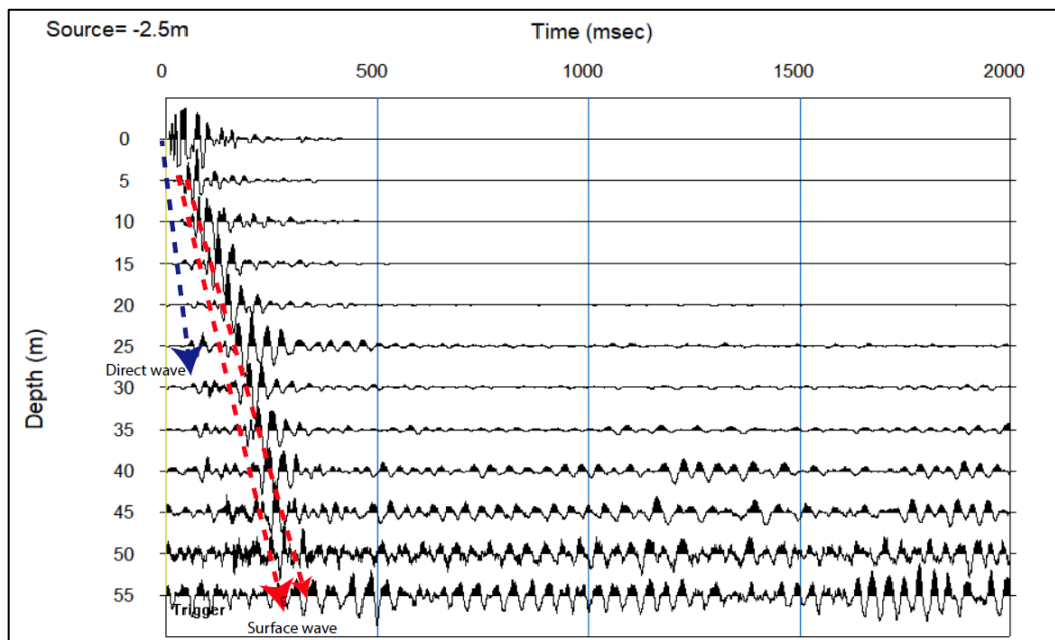


Figura 3: Vista de la primera llegada de las señales sísmicas, la flecha azul indica la onda directa y las flechas rojas muestran las ondas superficiales en el primer punto de adquisición de la línea sísmica.

Realizado por: Juan Villacres

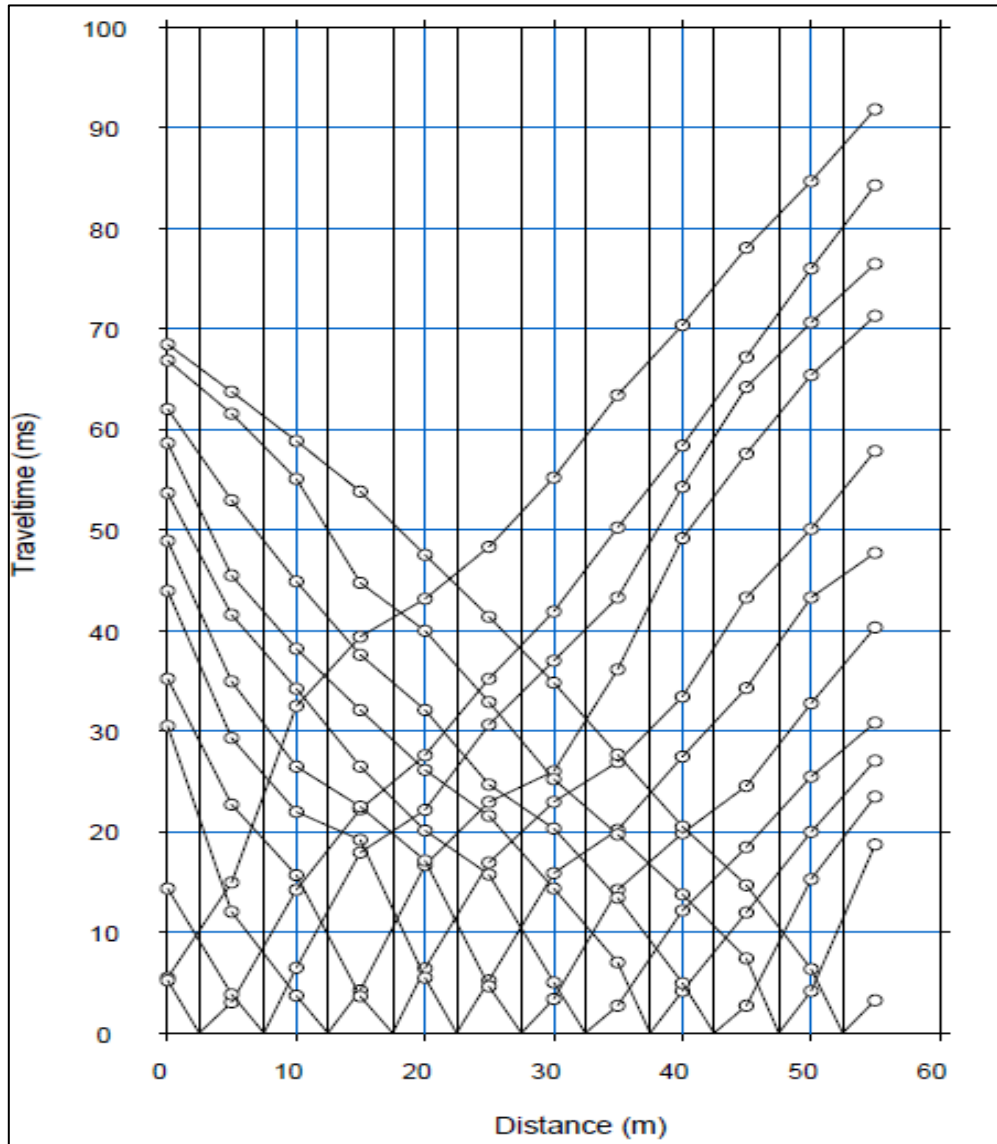


Figura 4: El software Plotrefa, desplazó iterativamente las curvas de tiempo de viaje para repartir el error de reciprocidad de forma uniforme para minimizar el RMSE frente al número de iteraciones.

Realizado por: Juan Villacres.

Tabla 2: Parámetros utilizados para generación del modelo inicial, a partir de la inversión de la tomografía.

Profundidad de la capa más baja (m)	Velocidad mínima (km/s)	Velocidad máxima (km/s)	Numero de capas	Elevación en todo el tramo del modelo (m) +-0.80
12	0.5	1.10	10	519

Realizado por: Villacres, Juan, 2023.

MASW-MAM combinado

El software Surface wave Analysis Wizard establece los parámetros iniciales por defecto. Se utilizó la velocidad de fase de onda superficial Rayleigh Ec. 1, para determinar la velocidad de fase referencial (Seth Stein & Michael Wysession, 2003). Las curvas de dispersión, fueron generadas con la modificación de la fase de velocidad de onda, se optimizaron los parámetros de suavizado y filtrado, y se llevó a cabo un corte transversal de la curva de dispersión Figura 5. Posterior a ello, se llevó a cabo una inversión de datos con 50 iteraciones para generar un modelo inicial MASW.

$$c = \frac{Vp}{1.74} * 0.92 \quad \text{(Ec. 1)}$$

La velocidad de fase de la onda superficial Raleigh corresponde a C , Vp es la velocidad máxima del modelo inicial de tomografía sísmica por refracción, 1.74 es la variación de Vp/Vs . Basado en los parámetros de no extensividad a partir de datos experimentales de ondas Rayleigh que surgen de epicentros de varios terremotos que se desplazan en la corteza continental, y 0.92 es una constante sísmica que se relaciona con el ajuste específico del cálculo de la velocidad de onda superficial. (Córdova et al., 2020; Kearey et al., 2002)

El procesamiento de los datos se realizó con el software Surface Wave Analysis Wizard, con el asistente de procesamiento de datos Passive source (Microtremor) 1D MAM. Se creó una lista con los archivos, se colocó el valor de la velocidad de fase de la onda superficial para generar las curvas de dispersión ver Figura 6. A continuación, se realizó la inversión del modelo inicial con 50 iteraciones y una profundidad de 15 metros, lo que dio como resultado la generación del modelo inicial MAM.

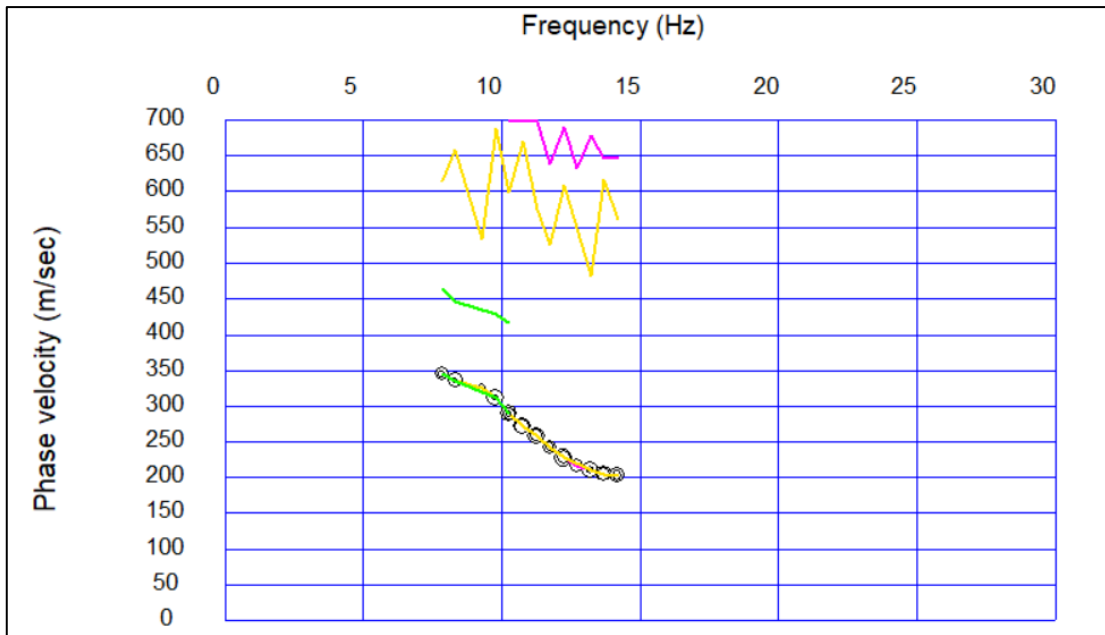


Figura 5: Curva de dispersión (método MASW - fuente activa 2D MASW), con una frecuencia de 8 a 15 Hz. Las curvas de tolerancia se encuentran por encima de las curvas de dispersión.

Realizado por: Juan Villacres

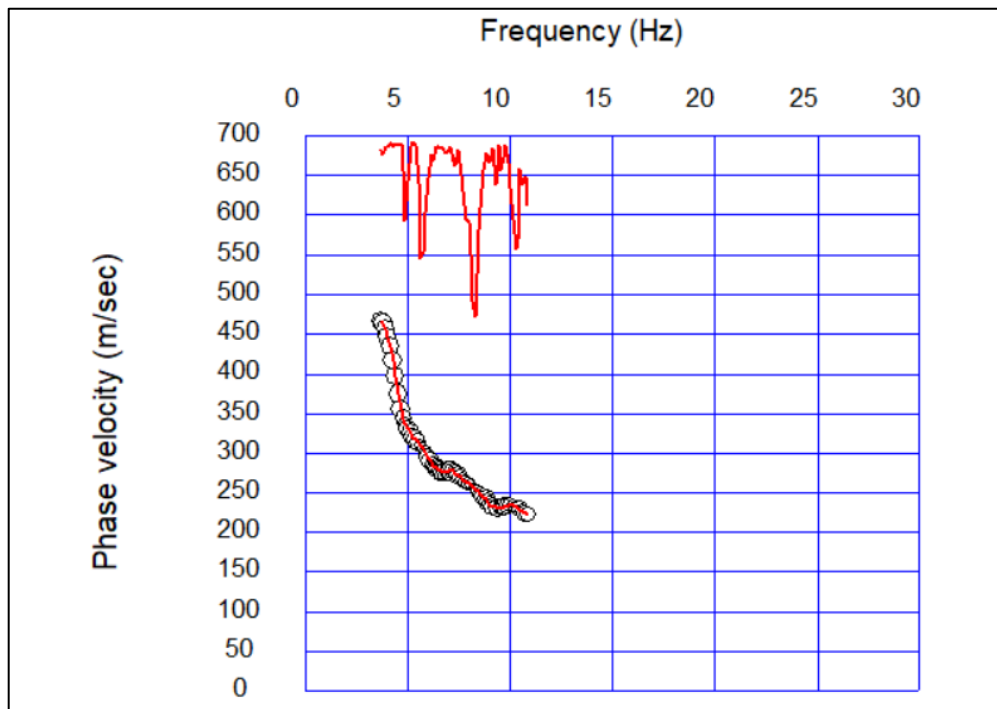


Figura 6: Curva de dispersión (método MAM - fuente pasiva micro tremor en 1D (MAM) con velocidad de fase de 225 a 475 m/s y una frecuencia de 4 a 11 Hz, y curvas de tolerancia.

Realizado por: Juan Villacres

Con software Wave Eq (Surface Wave análisis), se abrió la curva de dispersión 2D MASW y la curva de dispersión 1D MAM. Se editaron las curvas de dispersión con filtros de curvas individuales y filtro de media en 2D. La curva de dispersión combinada (**Figura 7**) se sometió a la inversión de modelo inicial. Se modificaron los campos a una profundidad de 30 m y se redujo el número de capas a 15. A partir del modelo inicial, se aplicó el método de mínimos cuadrados, cambiando el número de iteraciones a 50 y variando los parámetros de la regularización de 0.1 a 1.

Con el propósito de llevar a cabo la clasificación sísmica del sitio de acuerdo con los criterios del Programa nacional de riesgos de terremotos (NERHP), se procedió al cálculo de la velocidad de corte en los primeros 15 y 30 metros, denominada V_{s15} y V_{s30} (Karabulut Savaş, 2018). Este cálculo implica la obtención de muestras a partir de la refracción interpretada a través de las velocidades y espesores de cada capa subsuperficial. La velocidad media en el tiempo de las ondas de corte en los 15 y 30 metros se determinó dividiendo el espesor de cada capa por el respectivo intervalo de velocidades, según la Ec. 2 propuesta por Dobry et al. (2000).

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^N di}{\sum_{i=1}^N \frac{di}{vi}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde di denota el espesor en metros y vi la velocidad de la onda de corte en metros por segundo de la i ésima capa. N indica el número de capas de los 30 metros de profundidad. Se calculo los valores de di y vi de manera independientemente a partir de las mediciones realizadas mediante las técnicas MASW y MAM.

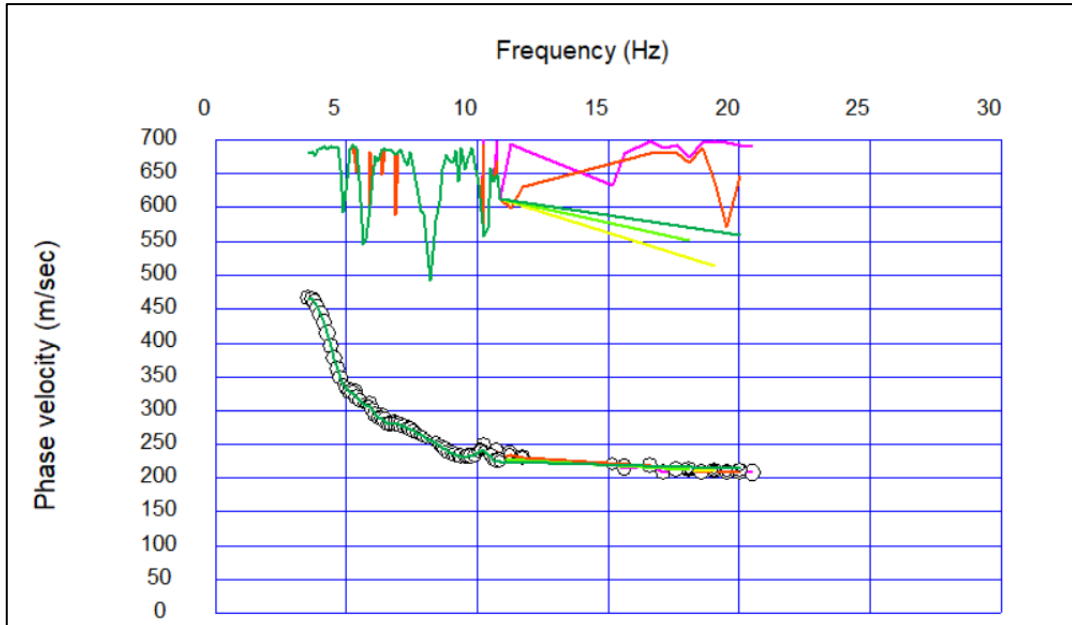


Figura 7: Curvas de dispersión MASW y MAM combinada, modificada como modelo inicial a partir del método de mínimos cuadrados para identificar el modelo final de la combinación de métodos.

Realizado por: Juan Villacres

Estrategia de regularización

A partir del modelo a priori propuesto, se procedió a resolver el problema inverso de la tomografía sísmica y del método MASW-MAM. Dado que estos problemas no cuentan con una solución única, se debe emplear el método de regularización de Tikhonov (Zhdanov, 2015). Esta regularización consiste en encontrar soluciones de mínimos cuadrados de problemas lineales inversos que han resultado de la minimización directa de los correspondientes funcionales inadaptados, tomando en cuenta la limitación de las matrices inversas $(A^T A)^{-1}$ o $(A^T W^2 A)^{-1}$. Con el propósito de encontrar una solución óptima para este problema mal planteado, que considera los datos "d" y los parámetros "m". Para superar estas dificultades, fue necesario aplicar el método de regularización basado en la técnica de regularización de Tikhonov et al (1977) que consiste en encontrar el parámetro de regularización α que minimiza el funcionamiento paramétrico Ec. 3 (Araujo et al., 2023; Calvetti et al., 2000) $p^\alpha(\mathbf{m}, \mathbf{d})$ definida como:

$$p^\alpha(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = \|W_d A \mathbf{m} - W_d \mathbf{d}\|^2 + \alpha \|W_m \mathbf{m} - W_m \mathbf{m}_{apr}\|^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

La simulación de la inversión temporal genera un error en la tomografía sísmica por refracción y de la misma manera en el método MASW-MAM. Este valor para la

tomografía sísmica se genera a partir de la posible solución en 0.9 suavizado horizontal y 0.7 suavizado vertical. Por otro lado, la inversión de los datos en WaveEq (Surface wave analysis) se generaron a partir del menú avanzado de inversión en un intervalo de 0.1 a 1.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{i,obs} - t_{i,model})^2}}{n} \quad (\text{Ec. 4})$$

La raíz cuadrada media (RMS) determinó la frecuencia óptima, cuyo resultado es el valor mínimo, a partir del error cuadrático en función a la norma de los modelos a priori y el resultante. La relación entre las velocidades de onda calculadas y las velocidades de onda observada en la Ec. 4. Se utilizó como métrica estadística estándar para medir el rendimiento de los modelos a estudiar (Chai & Draxler, 2014). Se determinó a "n" como *muestras de errores* e "i" como *la incertidumbre*. El conjunto de datos estima que los errores son insesgados y se sigue una distribución normal.

Para las distancias entre los modelos probados y el modelo a priori, se prueba tres tipos de normas l_2 , l_1 y l_∞ . Las normas son sensibles a valores atípicos debido a distintos errores experimentales que influyen en el resultado final (Tarantola, 1987, 2005). Nuestro modelo a priori m_i^{apr} tiene n puntos discretos y el modelo probado es un vector m_i . Las tres normas se definen por la Ec. 5.

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

$$l_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |m_i - m_i^{apr}|$$

$$l_\infty = \max\{|m_i - m_i^{apr}|\}$$
(Ec. 5)

El método elige los parámetros de regularización para resolver un problema inverso sísmico, adicionalmente se incorpora información sobre el tamaño del residuo, ya que se busca un equilibrio justo para mantener ambos valores pequeños. Cuando el RMS de La curva L varían, esta cambia su naturaleza, exponiendo un punto de inflexión Figura 8, pasando de estar dominado por los errores de regularización, es decir, un exceso de suavizado a estar dominado por los errores del lado derecho. Señalando que

la esquina de la curva L corresponde a un equilibrio entre el valor cuadrático medio de dos cantidades variables, correspondientes al parámetro de regularización de Michael S. Zhdánov (2018).

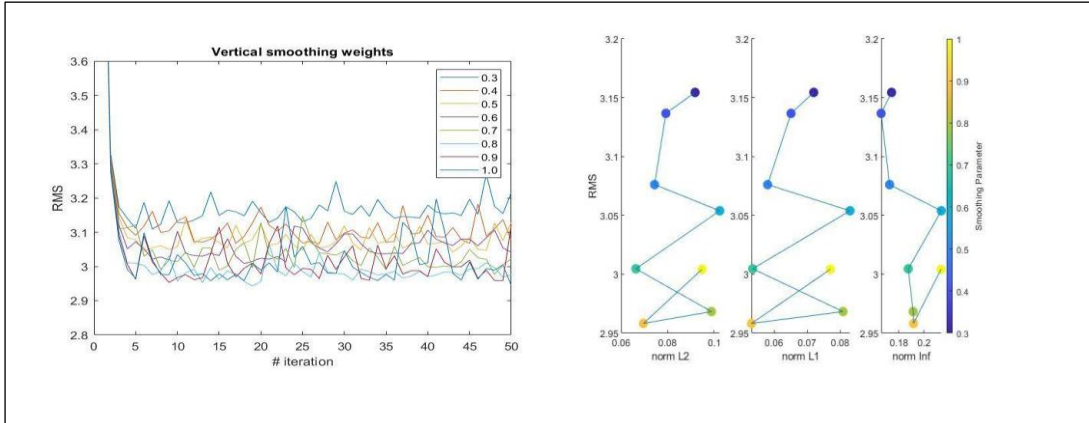


Figura 8: El grafico de la izquierda muestra la convergencia de los datos de (Root Mean Square) y la inversión de parámetros ajustada manualmente con valores verticales y horizontales. El grafico de la derecha muestra, tres tipos de normas en el eje horizontal, con un suavizado vertical de 0.7 vertical.

Realizado por: Juan Villacres

La regularización para el método MASW-MAM se basó en el mismo principio de la refracción sísmica con la única variante en los datos, este método implementa todos los datos en la inversión MASW (2D) (T) de sus parámetros en un rango de 0.1 a 1. De forma específica la regularización de tikhonov y Arsenin (1977) depende de la característica de los datos, en este caso se obtuvo 10 datos, por lo tanto, se hizo un ajuste de los parámetros en el software Matlab en función del problema inverso, generando las curvas de dispersión y las curvas L.

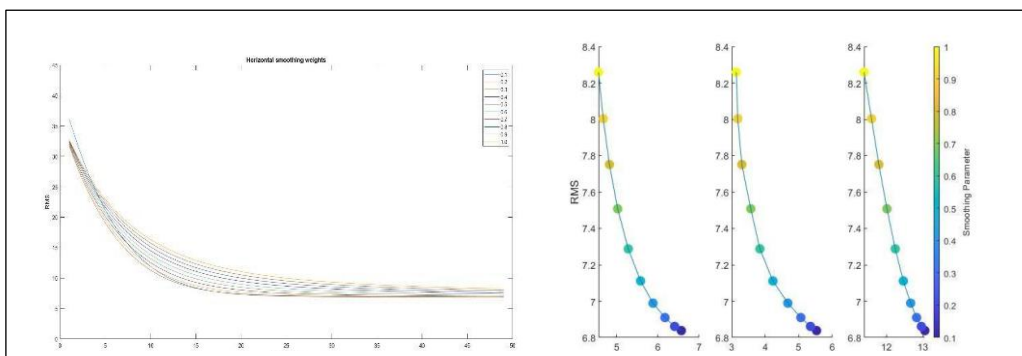


Figura 9: En el gráfico de la izquierda se muestra la convergencia del método MASW-MAM El grafico de la derecha muestra las 3 normas con el cálculo de mínimos cuadrados, fijando los parámetros verticales en 0.5 y variando los parámetros de la regularización horizontal de 0.1 a 1.0 y estableciéndolo en 0.5.

Realizado por: Juan Villacres

La curva L ilustra la búsqueda de un equilibrio entre minimización del desajuste y la estabilización razonable, equivalente a reducir el error para encontrar el punto de inflexión. La función paramétrica y la función estabilizadora son minimizadas reduciendo el RMS para encontrar el punto de inflexión de las 3 normas mediante la representación de la curva L se realiza en una escala logarítmica, dando lugar a una forma característica en L. El vértice que demarca las ramas verticales y horizontales, indican un valor adecuado para el parámetro de regularización (**Figura 9**). Consecuentemente, se trazó una línea imaginaria paralela a cada uno de los extremos de las normas, el punto de intersección determina el punto de inflexión de las cantidades variables. La esquina clara que se puede identificar fácilmente mediante una revisión analítica, ya que la curva presenta un comportamiento relativamente suave, se establece el parámetro de suavizado vertical en 0,6.

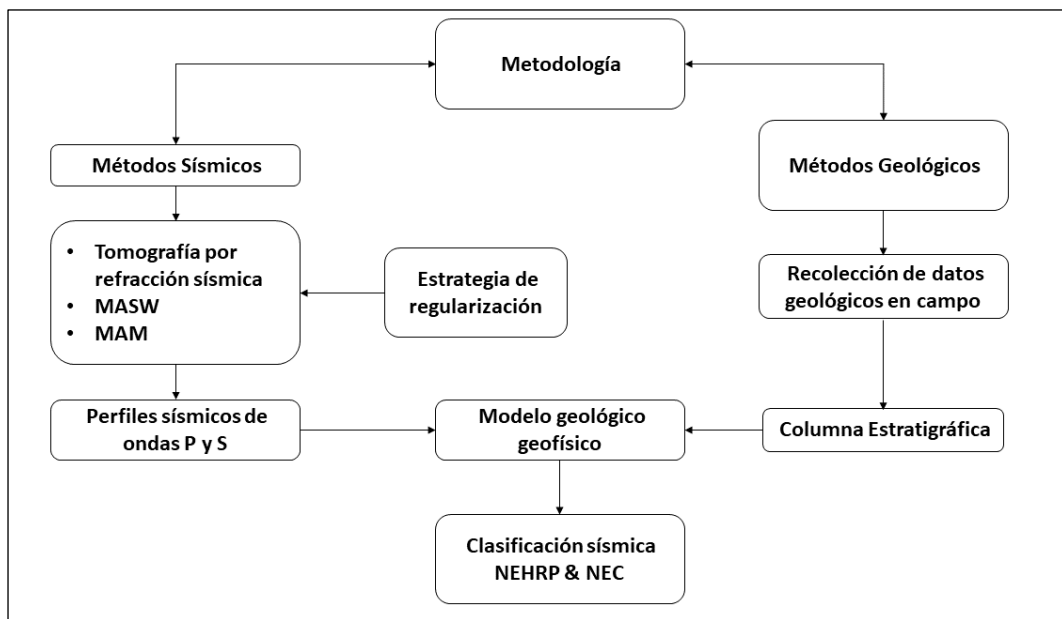


Figura 10: Diagrama de flujo de la secuencia metodológica empleada para obtener la adquisición de datos, procesamiento, regularización de modelos de velocidades y modelamiento final de tomografía sísmica y método MASW-MAM.

Realizado por: Juan Villacres

RESULTADOS

El modelo de velocidades de onda primarias versus la profundidad desarrollado en el presente trabajo, a partir de la tomografía sísmica, ha facilitado la identificación de cuatro unidades estratigráficas y conocer la distribución de cada capa y espesor que, a su vez, sirvieron para enmarcar en el modelo de onda de corte (V_s). Este modelo de tomografía se ajusta correctamente a la columna estratigráfica y al modelo de onda de corte.

El modelo de tomografía sísmica, la unidad 1, muestra un aumento en el espesor en el eje x, en una distancia que va de 25 a 55 metros, con una pendiente de 85 grados. Esta unidad presenta un espesor variable de 5 a 14 m, que se relacionan a un flujo de lodo volcánico y velocidades de ondas sísmicas entre 780 y 960 m/s. Mientras que en el límite de la capa 1 y 2 empieza la transición de flujo de lodo volcánico a deposición aluvial con base a la columna estratigráfica.

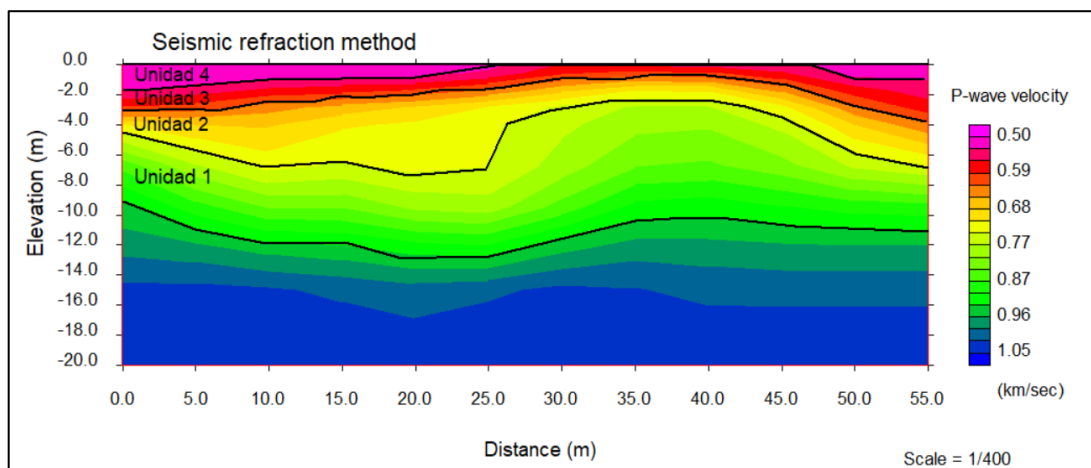


Figura 11: Perfil sísmico de velocidad de onda P. Modelo final a partir del resultado de regularización con parámetros horizontal 0,9 y vertical 0,7.

Realizado por: Juan Villacres

La información producto de la tomografía sísmica fue utilizada para analizar las características subsuperficiales hasta una profundidad de 16.7 m donde fue la base de la última capa descrita geológicamente. Sin embargo, con nuestro modelo de velocidad de onda de corte, se logró extender el análisis hasta los 40 m de profundidad. Entonces desde los 16.7 hasta los 40 metros se observa que hay dos estratos importantes. La primera capa situada entre los 16.7 m hasta los 26.7 m posee una velocidad de 261 m/s,

mientras que a partir de los 26.7 m hasta los 40 m tenemos una velocidad de 542 m/s, ver Figura 12.

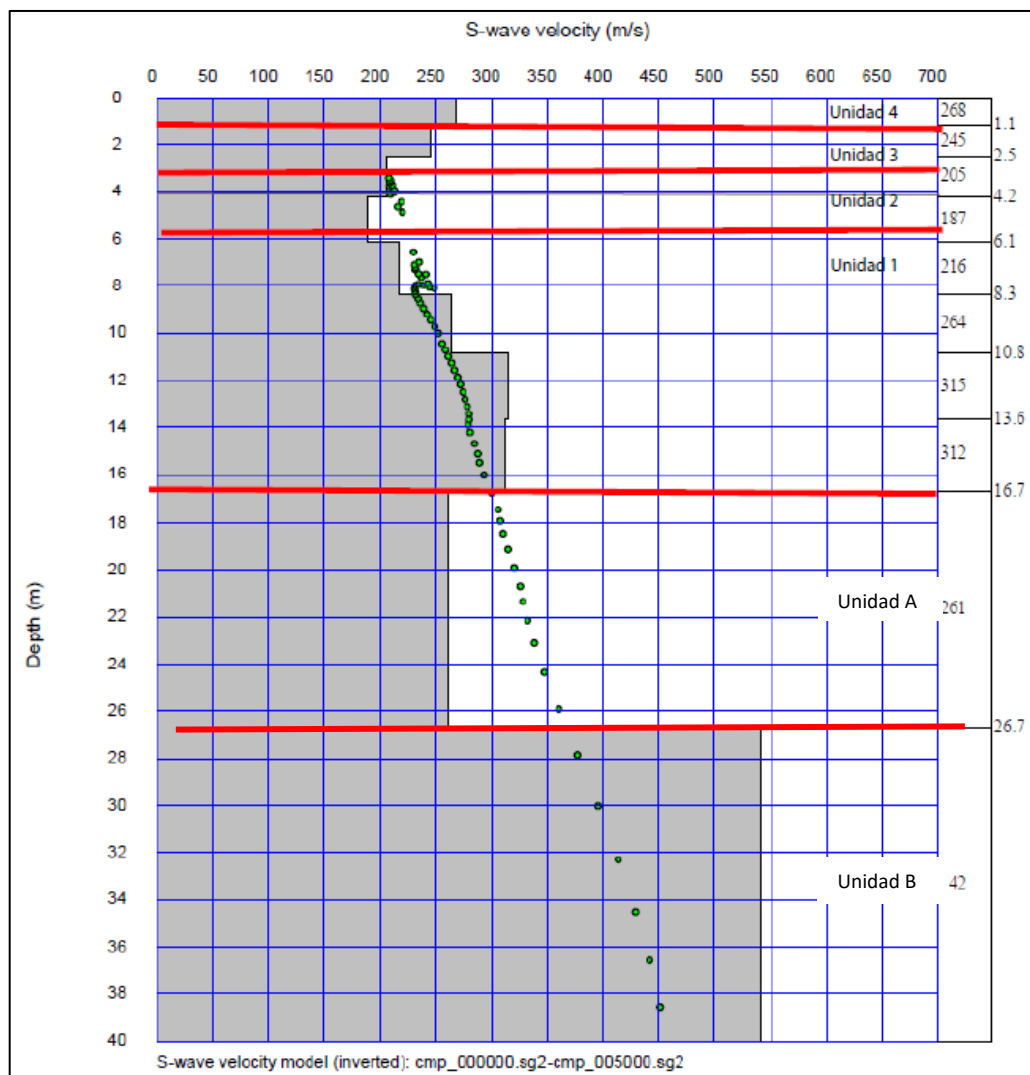


Figura 12: Perfil de velocidad de las ondas de corte. También muestra la delimitación de espesores de las 4 unidades, mediante líneas horizontales rojas.

Realizado por: Juan Villacres

Tabla 3: Valores promedio de las velocidades de onda V_p y V_s en cada una de las unidades geológicas.

Unidad	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Espesor (m)
1	870	268	10.6
2	680	245	2.85
3	590	196	1.9
4	500	276	1.1

Realizado por: Villacres, Juan, 2023.

La columna estratigráfica Figura 13, proporciona una representación de las diferentes unidades con diferentes características geológicas. La unidad 1 está en la parte inferior de la columna y se compone de flujo de detritos con una matriz soportada de tonalidad gris clara con clastos de hasta 15 cm, en su mayoría subangulosos. Además, la presencia de decoloración sugiere una meteorización leve en la superficie de las discontinuidades. La unidad 2 que corresponde a depósitos aluviales, principalmente compuesta de clastos redondeados entre 2 y 12 cm. La unidad 3 se compone de depósitos aluviales de sedimentos finos. La unidad 4 es la capa más somera y corresponde a relleno estructural, compuesto principalmente por clastos subredondeados de naturaleza ígnea, cuyos tamaños de clastos están entre 10 y 50 cm.

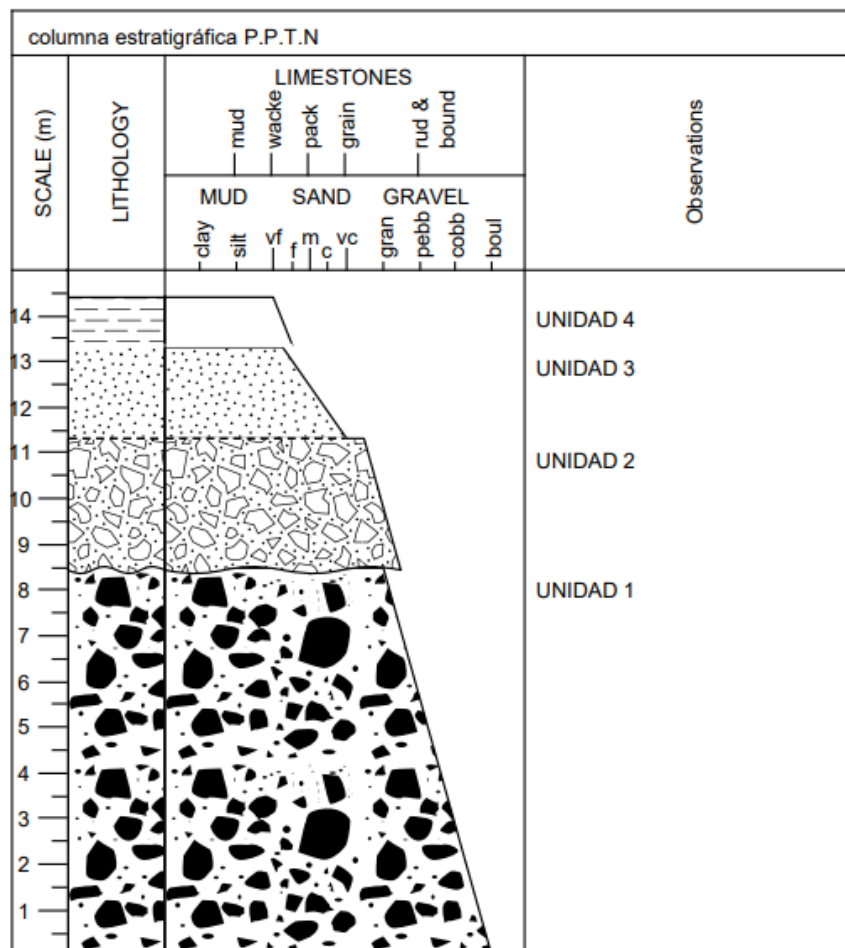


Figura 13: Columna estratigráfica representa la secuencia vertical de los Estratos de la zona de estudio.

Realizado por: Juan Villacres

La Tabla 4 muestra los espesores y las velocidades de onda de corte que fueron utilizados para el cálculo de la Vs15. Por otro lado, en la Tabla 5 se observa un aumento notable en la velocidad promedio de onda de corte a los 30 metros, alcanzando 265.73 m/s. Es relevante señalar que el valor correspondiente a la unidad 4 no fue considerado en la estimación de Vs30 y Vs15, ya que esta unidad se encuentra compactada.

Tabla 4: Parámetros para el cálculo de Vs15.

Unidad	Zi (m)	Zf (m)	Vs m/s	Hi (m)	Hi/Vs	Hi/Vs
4	0	1.1	268	1.1	-	4.10*10 ⁻³
3	1.1	2.5	245	1.4	5.71*10 ⁻³	5.71*10 ⁻³
2	2.5	6.1	196	3.6	0.018	0.018
1	6.1	15	276	8.9	0.035	0.035
Suma				15	0.05871	0.06281
				Vs₁₅	255.43 m/s	238.81 m/s

Realizado por: Villacres, Juan, 2023.

Tabla 5: Parámetros para el cálculo Vs30.

Unidad	Zi (m)	Zf (m)	Vs m/s	Hi (m)	Hi/Vs	Hi/Vs
4	0	1.1	268	1.1	-	4.10*10 ⁻³
3	1.1	2.5	245	1.4	5.71*10 ⁻³	5.71*10 ⁻³
2	2.5	6.1	196	3.6	0.018	0.018
1	6.1	15	276	8.9	0.035	0.035
A	15	26.7	261	11.7	0.044	0.044
B	26.7	30	542	3.3	6.088*10 ⁻³	6.088*10 ⁻³
	Suma			30	0.108798	0.108798
				Vs₃₀	275.74 m/s	265.73 m/s

Realizado por: Villacres, Juan, 2023.

DISCUSIÓN

La inversión tomográfica se utilizó de manera más efectiva cuando los contrastes de velocidad son graduales y discretos. En este proceso, se trazan iterativamente los rayos a través del modelo con el objetivo de minimizar el error RMS entre los tiempos de viaje observados y calculados. A partir del algoritmo implementado con el número máximo de iteraciones y los datos sintéticos de la inversión temporal, se logró la convergencia (RMS). Durante el cálculo de los tiempos de viaje observados y los tiempos de viaje calculados, los datos fueron ajustados logrando un RMS de 3.022 con una tasa de predicción de 96.97%. Por lo tanto, se aceptan los tiempos de viaje del predicho por el modelo final de velocidades de onda V_p . Además, el modelo final de velocidades onda de corte, obtenido mediante el método de mínimos cuadrados, presentó un RMS bajo de 2.24 con una aceptación del 97.76 %. Según geometrics (2009) se prefiere que el error sea inferior al 15 % para reducir resultados erróneos en las técnicas de interpretación tomográfica.

La solución regularizada en la modelización de las velocidades de onda (V_p) y (V_s) a partir de las gráficas de curva-L, es esencial para abordar problemas lineales mal planteados a gran escala según Calvetti et al (2000). En el contexto de la tomografía sísmica se demostró que la solución del problema presenta un punto de inflexión en 0.7, manteniendo los parámetros de suavizado horizontal en 0.9. Por otro lado, al aplicar el método MASW-MAM revelo un punto de inflexión en 0.5. Este análisis según Morigi & Sgallari (2001), quienes abordan la solución del problema en el ámbito de la sísmica, destacando la importancia de las normas entre el modelo inicial y el modelo final resultante de: L_2 , L_1 y L_{inf} , para mejorar la precisión de los modelos y evitar un sobreajuste (overfitting) esto ayuda a reducir la varianza sin sacrificar significativamente el sesgo del modelo final.

La observación detallada de la columna estratigráfica Figura 13 condujo a la identificación en campo de cuatro unidades, las cuales se les denominó unidad 1, 2, 3 y 4. Además, un elemento crucial de este análisis fue la precisa la determinación de los espesores. La interpretación de la tomografía sísmica y la definición de cada una de las unidades, se realizó a partir de los espesores de la columna estratigráfica. Por ende, el resultado de tomografía sísmica Figura 11 permitió conocer la distribución geométrica y

la variación del espesor de las capas del subsuelo. Este modelo permitió identificar 4 unidades con diferentes velocidades de onda V_p .

Geometría de los estratos

Para la asociación y la disposición espacial de los diferentes materiales geológicos presentes en la zona, se toma en cuenta la información del perfil estratigráfico, tomografía sísmica y columna estratigráfica. En la Figura 14 se muestra el resultado al integrar métodos sísmicos y geológicos, con el fin de obtener información detallada de la geometría de los estratos. Mediante un perfil estratigráfico levantado en campo, demuestra que los resultados concuerdan con las capas propuestas por la tomografía sísmica y el perfil de ondas de corte a una profundidad de 15 metros.

Utilizando los resultados de la tomografía sísmica y la columna estratigráfica, los métodos se superpusieron para construir el perfil de ondas de corte hasta una profundidad de 16.7 metros, de acuerdo al programa Wave Eq Surface wave analysis y los datos recolectados en campo, a esa profundidad se encuentra el límite inferior de la unidad 1. Sin embargo, con la combinación de los métodos MASW-MAM, la profundidad del modelo geofísico del subsuelo incrementó, dando a conocer dos unidades adicionales. La primera unidad aparece a partir de los 16.7 m mientras que la segunda capa tiene continuidad hasta los 40 m. Sin embargo, el límite de esta, se desconoce ya que el programa Wave Eq limita la profundidad.

La unidad 4 de 1.1 m de espesor, es la capa superficial homogénea que varía su espesor de los 25 a 45 m donde presenta un adelgazamiento de 0.20 m. Este material está constituido principalmente por arena fina de río y clastos semi redondeados con diámetros de entre 10 y 50 cm. Este material es compactado mediante maquinaria pesada. Entonces la capa con (V_p) de 500 m/s y (V_s) de 268 m/s, incrementan debido a que es un relleno estructural de un estrato comprimido artificialmente.

La formación de la terraza aluvial en la zona de estudio, específicamente en el barrio Tereré a un costado del puente de la avenida Perimetral. Dio lugar a la creación de una estructura plana ligeramente inclinada que se forma a lo largo del río Tena. Comúnmente se debe a fuertes lluvias y a las inundaciones estacionales que ocurren en la región desde miles de años B.P. (Suntaxi, 2023). La unidad 3 exhibe un contacto

transicional con dos facies. Debido a factores geológicos, hidrológicos y biológicos, los depósitos de sedimentos se acumulan durante las inundaciones en zonas de depositación paralelo al río y se consolidan con el tiempo formando estructuras planas. (Justinico & Parra, 2011)

La unidad 2, se identificó como parte de una terraza aluvial, probablemente de varios eventos transgresivos recientes. Estos son los sedimentos más gruesos que se van al fondo debido a las propiedades de la densidad de cada tipo de sedimento. Este proceso se llama clasificación de sedimentos, posiblemente este material durante episodios de lluvia y de crecidas fluviales a largo plazo, fueron arrastrados mediante transporte desde la cuenca ya sea por remoción de masa o erosión hídrica. (López et al., 2006)

La unidad 1, se identifica parte de un depósito de flujo volcánico clasificado como tipo cohesivo según Suntaxi (2023), correspondiente a una importante actividad volcánica ocurrida hace unos 4900 años B.P, posiblemente del volcán Sierra Azul ubicado en el cantón Archidona. El flujo de detritos descendió por el río Misahuallí y se depositó en la ciudad de Tena y las orillas de los ríos Tena y Napo.



Figura 14: Disposición espacial de las capas geológicas a partir de la imagen real de la zona de estudio.

Realizado por: Juan Villacres

Clasificación sísmica

Se calculó la V_{s15} la cual es el promedio de la velocidad de onda de corte en los primeros 15 metros de profundidad. El cálculo de V_{s15} es crucial ya que asegura que las velocidades de V_s corresponden a las capas detectadas en campo. Sin embargo, en la clasificación sísmica, la unidad 4 fue excluida del cálculo de la V_{s30} y V_{s15} , debido a que presenta una velocidad de onda de corte superior, ocasionada por la compactación artificial del estrato en esta unidad.

El producto del cálculo de V_{s30} sin tomar en cuenta la capa 4, fue de 275.74 m/s, mientras la V_{s15} fue de 238.81 m/s. Por otro lado, al incluir la unidad 4, en el cálculo de V_s 30 el valor es de 265.73 m/s y para V_{s15} el valor fue de 238.81 m/s. Aunque, el aumento de la V_s fue de 10 m/s sigue dentro de la categoría de clasificación sísmica tipo D, en conformidad con la normativa NEHRP y NEC (**Tabla 6**). Este cambio se debe a que el tiempo de viaje aumenta y reduce la amplitud de la onda sísmica que llega a la superficie terrestre cuando se agrega la velocidad de la unidad 4 (Gribler et al., 2020)

Tabla 6: Categorización de sitios basada en NEHRP (2003) y NEC-GC.

Clase de sitio	Descripción de sitio	Parámetros NEHRP	Parámetros NEC-GC
		V_{s30} (m/s)	V_{s30} (m/s)
A	Roca Dura	>1500	>1500
B	Roca	760-1500	1500 > V_s > 760
C	Suelo muy denso y roca blanda	360-760	760 > V_s > 360
D	Suelos rígidos	180-360	360 > V_s > 180
E	Suelos blandos, perfil con más de 10 pies de arcilla suave	180	V_s < 180
F	Suelos que requieren evaluación específica de sitio.	-	-

Realizado por: Villacres, Juan, 2023.

El sistema de clasificación sísmica NEHRP, a partir de la velocidad V_s de 275 m/s lo clasifica en la categoría D que se asocia con los suelos de alta rigidez y una baja capacidad de amortiguamiento. Estos suelos son los que experimentan los mayores desplazamientos y aceleraciones en un terremoto ya que transmiten eficientemente las ondas sísmicas. Este acontecimiento se debe a la composición compleja de los estratos

obtenidos en la unidad 1 ya que según la normativa ASTM (1996) da a conocer valores generales para cada uno de los diferentes estratos para poder categorizar y determinar el tipo de suelo. No obstante, en la Tabla 7 se lleva a cabo una comparación de las velocidades de onda (V_p) y (V_s), con el propósito de cotejar los materiales geológicos y sus respectivas velocidades con otros materiales geológicos similares a los valores establecidos por la normativa, donde la unidad 1 no es descrita por la normativa dando a entender que es un dato nuevo para la caracterización sísmica dentro del contexto geológico amazónico.

Tabla 7: Valores típicos de onda de propagación según la normativa (ASTM, 1996).

Tipo de suelo (Descripción)	V_p (m/s)	Tipo de suelo	V_s (m/s)	Resultados de tomografía sísmica (V_p)	Resultados de velocidades de ondas de corte (V_s)
Flujo de lodo volcánico sedimentado	-	Flujo de lodo volcánico sedimentado	-	Unidad 1 (850 m/s)	Unidad 1 (268 m/s)
Grava suelta, húmeda	455-915	Arena gruesa	300	Unidad 2 (680 m/s)	Unidad 2 (245 m/s)
Arena suelta mezclada con grava húmeda	455-1065	Arena fina	460	Unidad 3 (590 m/s)	Unidad 3 (196 m/s)
Suelo intemperizado	204-610	Material de río utilizado para relleno	-	Unidad 4 (500 m/s)	Unidad 4 (276 m/s)

Realizado por: Villacres, Juan, 2023.

CONCLUSIÓN

El modelo de tomografía sísmica (V_p) y el modelo de ondas de corte (V_s) se ajustaron correctamente a la columna estratigráfica, estableciéndose 4 unidades geológicas distintas. Se asignó a cada unidad valores promedio de velocidades de onda.

Es importante destacar que la estrategia de regularización reveló los puntos de inflexión con un suavizado óptimo para los modelos finales, tanto para la tomografía como para la combinación del método MASW-MAM.

La caracterización sísmica de la zona de estudio, arrojó un suelo tipo D de acuerdo a la NEHRP y la NEC-GC, sin tomar en cuenta la unidad 4 en el cálculo de la V_{s15} y V_{s30} . La unidad de mayor velocidad (V_s) corresponde a la unidad 1 con una velocidad de 276 m/s, y la de menor velocidad (V_s) corresponde a la a la unidad 3 con una velocidad de 196 m/s. De acuerdo a los datos geológicos la unidad 1 es un flujo de lodo volcánico y la unidad 3 es una arena de grano fino correspondiente a una capa intermedia de la terraza aluvial.

En el perfil de velocidades de onda de corte, se identificaron dos nuevas capas, designadas como A, a la unidad que se encuentra debajo de la unidad 1, y B a la unidad más profunda. El perfil de velocidad de (V_s) muestra un contraste bien marcado, lo que permite informar que podría tratarse de dos unidades de diferente competencia. La unidad A podría tratarse de la prolongación del depósito laharítico desde los 16 metros de profundidad. Mientras que la unidad B que inicia a partir de los 27 metros de profundidad podría tratarse la Formación geológica Tena.

El presente estudio servirá de base en caso de la construcción de un nuevo puente, ya que el puente actual está siendo afectado debido a la erosión fluvial del río Tena, principalmente en el margen izquierdo donde la unidad 1 presenta una erosión continua.

REFERENCIAS

- Aizprua, C., Witt, C., Brönnner, M., Johansen, S., Barba, D., Hernandez, M., & Billi, A. (2020). Forearc crustal structure of Ecuador revealed by gravity and aeromagnetic anomalies and their geodynamic implications. *Lithosphere*, 2020(1). <https://pubs.geoscienceworld.org/gssa/lithosphere/article/2020/1/2810692/592436>
- Araujo, S., Guzmán, O., Guamán, A., Espín, R., García, I., & Chulde. (2023). Seismic refraction tomography in San Luis, headward Quijos River (Alto Coca) erosion zone. *Journal of Applied Geophysics*, 212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104981>
- Aspden, J., & Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205(1–3), 187–204. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040195192904267>
- ASTM, D. (1996). 5777-95, Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation. *West Conshohocken, PA, USA*, 1–14.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barr Agan, R. (1999). *STYLE AND TIMING OF DEFORMATION IN THE ORIENTE BASIN OF ECUADOR*.
- Barral, Henry. (1986). Las transformaciones en la utilización del medio en la Amazonia ecuatoriana (provincia del Napo) a través de la foto-interpretación. *Cultura: Revista Del Banco Central Del Ecuador*, 8, 743–756. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cc-2010/26536.pdf
- Bauer, R. A., Kiefer, J., & Hester, N. (2001). Soil amplification maps for estimating earthquake ground motions in the Central US. *Engineering Geology*, 62(1–3), 7–17. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00045-X)
- Borcherdt RD. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, 10(4), 617–653. <https://pubs.geoscienceworld.org/earthquake-spectra/article-abstract/10/4/617/583891>
- Calvetti, D., Morigi, S., Reichel, L., & Sgallari, F. (2000). Tikhonov regularization and the L-curve for large discrete ill-posed problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 123(1–2). [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(00\)00414-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00414-3)
- Catuneanu, O. (2017). *Sequence Stratigraphy: Guidelines for a Standard Methodology*. 2, 1–57. <https://doi.org/10.1016/BS.SATS.2017.07.003>
- 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>
- Dobry, R., Borcherdt, R., Crouse CB, Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., & Seed, R. B. (2000). New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. *Earthquake Spectra*, 16(1), 41–67. <https://pubs.geoscienceworld.org/earthquake-spectra/article-abstract/16/1/41/584737>
- GAD MUNICIPAL Tena. (2020). *ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y PLAN DE USO Y GESTIÓN DEL SUELO 2019-2023*. https://www.google.com/search?q=pdot+tena&sca_esv=575677953&ei=LuU1Ze-nB4DcqtsPieKHwAl&oq=pdot+te&gs_lp=Egxnnd3Mtd2l6LXNlcnAiB3Bkb3QgdGUqAggAMgUQABiABDIGEAAyFhgeMgYQABgWGB4yBhAAGBYyHjIGEAAyFhgeMgYQABgWGB4yBhAAGBYyHjIGEAAyFhgeMgYQABgWGB4yBhAAGBYyHkj_IFAAWMQPcAB4AZABAjgBuwGgAdYlqgEDMC43uAEB

- yAEA-
 AEBwglHEAAYigUYQ8ICCxAAGIAEGLEDGIMBwgJLEc4YgAQYxwEY0QPCAggQABiABBixA8ICC
 hAAGloFGLEDGEPCAgSQAABiABBixAxjJA8ICCBAAAGIAEGJIDwglIEAAYigUYkgPiAwQYACBBiAYB
 &scilient=gws-wiz-serp
- García Mayordomo, & Martínez Díaz. (2006). Caracterización sísmica del Anticlinorio del Bajo Segura (Alicante): Fallas del Bajo Segura, Torreveja y San Miguel de Salinas. *GEOGACETA*, 40, 19–22.
- Goldstein, N. E., Org, E., & Goldstein, N. E. (1994). *Expedited Site Characterization Geophysics: Geophysical Methods and Tools for Site Characterization. Department of Energy by Lawrence Berkeley Laboratory, Univ. of California*. 124. <https://escholarship.org/uc/item/6zp3d64c>
- Gutscher, M., Malavieille, J., ... S. L.-E. and P., & 1999, undefined. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Elsevier*, 168, 255–270. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X99000606>
- Haq, B. U., Hardenbol, J., & Vail, P. R. (1987). Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235(4793), 1156–1167. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.235.4793.1156>
- Hunter, J. A., Woeller, D. J., Addo, K. O., Luternauer, J. L., & Pullan, S. E. (1993). Application of shear wave seismic techniques to earthquake hazard mapping in the Fraser River Delta, British Columbia. *1993 SEG Annual Meeting*, 501–503. <https://doi.org/10.1190/1.1822533>
- Itziar Pérez. (2012). *CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SUELOS DE MADRID MEDIANTE LA TÉCNICA REMI (Refraction Microtremor)*.
- Justinico Jaramillo, & Parra Sanchez. (2011). El registro de los cambios de clima en la estratigrafía de la amazonía colombiana I. Neogeno-inicios del cuaternario. *Caldasía*, 33(2), 539–572. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0366-52322011000200015&script=sci_arttext
- Karabulut Savaş. (2018). Soil classification for seismic site effect using MASW and ReMi methods: A case study from western Anatolia (Dikili -İzmir). *Journal of Applied Geophysics*, 150, 254–266. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2018.01.011>
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration*. [https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=mWkJEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA264&dq=Kearey+P.,+Brooks+M.,+Hill+I.,+\(2002\)&ots=YN4CX5fZ5M&sig=DR2tw_CGMV3UOAvyoEHh-nwkiEQ](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=mWkJEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA264&dq=Kearey+P.,+Brooks+M.,+Hill+I.,+(2002)&ots=YN4CX5fZ5M&sig=DR2tw_CGMV3UOAvyoEHh-nwkiEQ)
- Lavell A. (1999). Gestión de riesgos ambientales urbanos. *Red de Estudios Sociales En Prevención de Desastres En América Latina*, 1–15. https://www.unisdr.org/files/11008_GestionDeRiesgosAmbientalesUrbanos1.pdf
- Louie, J. N. (2001). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347–364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>
- NEC-11. (2015). *GEOTÉCNIA Y CIMENTACIONES*.
- NEHRP, F. (2020). NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures. *Building Seismic Safety Council, II*(September).
- Park, C. B., Miller R, D., & Xia, J. (1997). Multi-channel analysis of surface waves (MASW)—a summary report of technical aspects, experimental results, and perspective. *Ansas Geological Survey*, 10–97. https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Park%2C+C.+B.%2C+Miller%2C+R.+D.%2C+%26+Xia%2C+J.+%281997%29.+Multi-Channel+Analysis+of+Surface+Waves+%28MASW%29+%E2%80%9CA+summary+report+of+technical+aspects%2C+experimental+results%2C+and+perspective%E2%80%9D+prepared+by.&btnG=
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1997). *Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW) “A summary report of technical aspects, experimental results, and perspective” prepared by.*

- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800–808. <https://pubs.geoscienceworld.org/geophysics/article-abstract/64/3/800/73511>
- 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. <https://doi.org/10.3989/ic.11.112>
- Räsänen, M., Neller, R., Salo, J., Magazine, H. J.-G., & 1992, undefined. (1992). Recent and ancient fluvial deposition systems in the Amazonian foreland basin, Peru. *Cambridge.OrgM Räsänen, R Neller, J Salo, H JungnerGeological Magazine, 1992•cambridge.Org, 129(3), 293–306.* <https://www.cambridge.org/core/journals/geological-magazine/article/recent-and-ancient-fluvial-deposition-systems-in-the-amazonian-foreland-basin-peru/2B96BF05F9484BE6C809B616B0EB5412>
- Richard C. Benson, Robert A. Glaccum, & Michael R. Noel. (1984, March 28). *Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration.* https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=7GupPW58Dt0C&oi=fnd&pg=PR6&ots=QgblyjXQ87&sig=nyCtN4aliQa9mdgHEZSGcoUiHkY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Rivera Zeta, M. A., Piedra Rubio, R. , & Paripanca García. (2016). Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. In *Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones.* https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Zeta%2C+M.%2C+Rubio%2C+R.%2C+%26+Garc%C3%ADa%2C+Y.+%282016%29.+Ensayos+Geof%C3%ADsicos+de+Refracci%C3%B3n+S%C3%ADsmica+y+de+Medici%C3%B3n+de+Ondas+de+Corte+%28MASW+y+MAM%29+para+usos+de+cimentaci%C3%B3n+en+obras+de+edificaciones.+Civilizate%2C+8&btnG=
- 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.*
- Schuster, G. T., & Quintus-Bosz, A. (1993). Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. In *GEOPHYSICS* (Vol. 58, Issue 9). <http://library.seg.org/>
- 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.*
- Seth Stein, & Michael Wysession. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure.* https://www.google.com.ec/books/edition/An_Introduction_to_Seismology_Earthquake/1APLEAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=an+introduction+of+geofisica&printsec=frontcover
- Strobbia, C. (2003). Strobbia: Surface wave methods: acquisition, processing and inversion. In *Politecnico di Torino.* https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0,5&cluster=1549645985655656477#d=gs_cit&t=1699511387029&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3AHZCdRtBygRUJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26scfhb%3D1%26hl%3Des
- Suntaxi, B. I. (2023). *Determinación del origen y las características del Lahar" Tena", Provincia de Napo: Mapeo y descripciones de la estratigrafía del Lahar "Tena", comparación con la geoquímica de las bombas y de posibles fuentes volcánicas y realizar un estudio de las láminas delgadas.*
- Tikhonov, A. N., Arsenin, V. I., & Arsenin, V. Y. (1977). Solutions of ill-posed problems. *Vh Winston.* <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000795395932288>

- Tschopp H.J., & Switzerland Basel. (1953). OIL EXPLORATIONS IN THE ORIENTE OF ECUADOR, 1938-19501. In *BULLETIN OF THE AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS* (Vol. 37, Issue 10). https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-pdf/37/10/2303/4384327/aapg_1953_0037_0010_2303.pdf
- Tsige, M., & García Flórez, I. (2006). Propuesta de clasificación geotécnica del "Efecto Sitio"(Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia. *Geogaceta*, 40, 39–42. https://www.academia.edu/download/40374512/Tsige_Geogaceta_2006.pdf
- Uvidia Vilema, M. A., Chugñay Cargua, A. L., Chugñay Cargua, M. I., & Riofrío López, L. E. (2019). Gestión del riesgo de desastres naturales en la parroquia Pano, Provincia de Napo. *Ciencia Digital*, 3(3.4.), 289–300. <https://doi.org/10.33262/CIENCIADIGITAL.V3I3.4..874>
- Zhdanov, M. S. (2015). Linear Discrete Inverse Problems. In *Inverse Theory and Applications in Geophysics* (pp. 65–97). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62674-5.00003-7>