



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

**MODELAMIENTO DE VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS P Y S
MEDIANTE LOS MÉTODOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y
MASW, EN LOS POBLADOS DE SAN LUIS Y SAN CARLOS EN
LA ZONA DE EROSIÓN REGRESIVA DEL RÍO COCA, NAPO,
ECUADOR**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTOR: KARINA NATALI SALCEDO ANDI

TUTOR: PhD. SEBASTIÁN ARAUJO

Napo - Ecuador

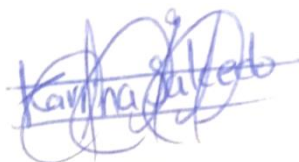
2023

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, KARINA NATALI SALCEDO ANDI, con documento de identidad N° 150097156-7, 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.

Tena, 1 de agosto de 2023



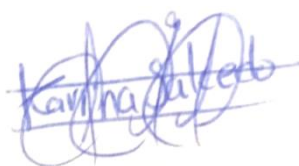
Karina Natali Salcedo Andi
150097156-7

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, KARINA NATALI SALCEDO ANDI, con documento de identidad N° 150097156-7, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: MODELAMIENTO DE VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS P Y S MEDIANTE LOS MÉTODOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y MASW, EN LOS POBLADOS DE SAN LUIS Y SAN CARLOS EN LA ZONA DE EROSIÓN REGRESIVA DEL RÍO COCA, 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.

Tena, 1 de agosto de 2023



Karina Natali Salcedo Andi
150097156-7

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRILICULAR

Certifico que el trabajo de titulación: MODELAMIENTO DE VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS P Y S MEDIANTE LOS MÉTODOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y MASW, EN LOS POBLADOS DE SAN LUIS Y SAN CARLOS EN LA ZONA DE EROSIÓN REGRESIVA DEL RÍO COCA, NAPO, ECUADOR, en la modalidad de: tesis, fue realizado por Karina Natali Salcedo Andi, 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.

Tena, 1 de agosto de 2023



José Sebastián Araujo Soria

C.I: 1802672871

DEDICATORIA

A todos aquellos que me han acompañado en este camino, desde mi familia, amigos y profesores, les dedico esta tesis.

Por todo su apoyo incondicional, paciencia y aliento, que me han brindado durante mi trayectoria académica. Cada palabra de aliento, cada abrazo y cada consejo han sido una fuente de inspiración y motivación para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Esta tesis no solo es un logro personal, sino un logro compartido con todos ustedes, ya que han sido parte integral de mi formación académica y personal.

Les agradezco por creer en mí y en mi capacidad para alcanzar mis objetivos. Espero que esta tesis sea un testimonio de mi gratitud y dedicación hacia ustedes.

AGRADECIMIENTOS

El más sincero agradecimiento a la Universidad Regional Amazónica Ikiam, por darme la oportunidad de obtener una profesión y ser una ayuda para la sociedad.

Agradezco a mi familia, por haber estado en cada etapa para la culminación de mi carrera dándome apoyo moral y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

También quiero expresar mis agradecimientos a todos los docentes de la carrera de Ingeniería en Geociencias quienes con sus conocimientos me instruyeron durante mi trayectoria como estudiante.

Quiero otorgar especial reconocimiento al Ph.D. Sebastián Araujo quien fue mi guía y apoyo para obtener resultados exitosos.

Finalmente agradezco a la universidad y a todas las personas que conocí en el transcurso de la formación profesional con quienes viví experiencias únicas e inolvidables.

Gracias a todos por su tiempo, paciencia y por creer en mí. Este logro es también de ustedes y espero seguir contando con su apoyo en el futuro.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
TABLA DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Antecedentes	4
1.1.1. Contexto Geológico.....	4
1.1.2. Actividad volcánica.....	11
1.1.3. Erosión regresiva	12
1.1.4. Efectos de la Erosión Regresiva	12
1.1.5. Ondas sísmicas	13
1.1.6. Tipos de Ondas.....	13
1.1.7. Método de Refracción Sísmica.....	15
1.1.8. Expansión y trayectoria de ondas	16
1.1.9. Equipo para la medición de refracción sísmica	18
1.1.10. Método tomográfico – Plotrefa – Mínimos cuadrados.....	20
1.1.11. Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (MASW)	22
1.1.12. Marco legal	25
1.2. Planteamiento del Problema	26
1.3. Justificación de la investigación	26
1.4. Objetivos de la investigación (desarrollar generales y específicos)	27
1.4.1. General.....	27
1.4.2. Específicos.....	27
CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO	28
1.1. Descripción del área de estudio	28
1.1.1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	28
1.2. Descripción de la metodología de investigación	29
1.2.1. Diseño de la investigación.....	29
1.2.2. Herramientas para la obtención de datos.....	30

1.2.3.	Adquisición de datos sísmicos	30
1.3.	Procesamiento de datos.....	32
1.3.1.	Metodología por tomografía de refracción sísmica	32
1.3.2.	Metodología con el método Surface Wave Analysis Wizard (MASW).....	34
CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS		42
2.1.	Tomografía de refracción sísmica Onda Vp San Carlos (AB) San Luis (CD) ..	42
2.1.1.	Dromocronas San Carlos (AB), San Luis (CD)	42
2.1.2.	Modelos a priori San Carlos (AB), San Luis (CD)	43
2.1.3.	Gráficos de Convergencia RMS San Carlos (AB), San Luis (CD)	44
2.1.4.	Gráficos curva L RMS San Carlos (AB), San Luis (CD)	45
2.1.5.	Perfiles de velocidad Onda Vp San Carlos (AB), San Luis (CD).....	46
2.2.	Método Surface Wave Analysis Wizard (MASW) Onda Vs San Carlos (EF), San Luis (GH))	47
2.2.1.	Curvas de Dispersión San Carlos (EF), San Luis (GH))	47
2.2.2.	Perfiles de velocidad 1D San Carlos (EF), San Luis (GH)	48
2.2.3.	Perfiles de velocidad 2D de Onda Vs San Carlos (EF), San Luis (GH)....	49
CAPÍTULO IV: INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN		50
2.3.	Interpretación	50
2.3.1.	Perfiles de velocidad onda Vp San Carlos (AB), San Luis (CD)	50
2.3.2.	Perfiles de velocidad onda Vs San Carlos (EF), San Luis (GH).....	52
2.4.	Discusión	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		61
REFERENCIAS.....		63
ANEXOS.....		65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Parámetros utilizados para el modelo a priori de refracción sísmica.	42
Tabla 2.	Clasificación de suelos en base CNA 1993 y ASTM-D5777	54
Tabla 3.	Tipo de perfiles de suelos para el diseño sísmico	55
Tabla 4.	Criterio general de ripabilidad basado en la velocidad de ondas sísmicas.	55
Tabla 5.	Clasificación de materiales geológicos Onda Vp (AB y CD).....	58
Tabla 6.	Clasificación de materiales geológicos de Onda Vs mediante NEC-SE- DS.....	59
Tabla 7.	Resultados de los cálculos de elevación.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	(a) Mapa de fallas activas del Ecuador y su cinemática cuaternaria. (b) Sismicidad cortical instrumental e histórica en Ecuador (>40 km de profundidad y..... magnitud > 5)	5
Figura 2.	Depósitos de avalanchas volcánica y brecha volcánica	8
Figura 3.	Depósitos fluvio-lacustres	9
Figura 4.	Depósitos aluviales.....	9
Figura 5.	Mapa geológico de la zona de estudio poblados San Luis y San Carlos....	10
Figura 6.	Elementos de una onda.....	13
Figura 7.	Comportamiento onda P.....	14
Figura 8.	Comportamiento onda S.....	14
Figura 9.	Comportamiento onda Rayleigh.....	15
Figura 10.	Comportamiento onda Love.....	15
Figura 11.	Como actúa un frente de onda según el principio de Huygens.	16
Figura 12.	Modelo de dos capas donde se aprecia que la V2 es mayor que la primera.....	17
Figura 13.	Representación del ángulo crítico.....	18
Figura 14.	Geode	19
Figura 15.	Equipo para la obtención y almacenamiento de datos sísmicos	20
Figura 16.	Proceso de obtención de la curva de dispersión, modelo inicial y final	23
Figura 17.	Curva de dispersión.....	24
Figura 18.	Mapa de localización de la zona de estudio.....	28
Figura 19.	Diseño de la investigación	29
Figura 20.	Ubicación de las líneas sísmicas San Carlos y San Luis	31
Figura 21.	Arreglo sísmico en la investigación.....	31
Figura 22.	Obtención de señales sísmicas	32
Figura 23.	Módulo Pickwin – Línea Sísmica de San Luis.....	36
Figura 24.	Módulo Plotrefa – Línea Sísmica de San Luis.....	36
Figura 25.	Software de Matlab-Convergencia - San Luis.....	37
Figura 26.	Software de Matlab- Curva L - San Luis	37
Figura 27.	Modelo Final- San Luis.....	38
Figura 28.	MASW- Procesamiento – San Luis.....	38
Figura 29.	Proceso para obtener las curvas de dispersión – San Luis.....	39
Figura 30.	Corte de curva y obtención del modelo inicial – San Luis	40
Figura 31.	Perfil de velocidad MASW	40
Figura 32.	Gráfico de dromocronas (Curvas de tiempo vs Distancia)	42
Figura 33.	Modelo a priori generado para las líneas sísmicas AB y CD	43

Figura 34. Gráfico de convergencia para el RMS, de las líneas AB y CD.	44
Figura 35. Curva L para la línea de AB y CD	45
Figura 36. Resultado final de la tomografía sísmica de refracción Onda Vp de AB..... y CD.....	46
Figura 37. Curva de dispersión (con corte, filtrados individuales y filtrados automáticos).....	47
Figura 38. Perfiles de velocidad Vs.	48
Figura 39. Resultado final en 2D de la velocidad de onda de corte Vs San Carlos y San Luis.....	49
Figura 40. Perfil de velocidades de onda Vp de San Carlos (AB) y San Luis (CD) con sus respectivas unidades.	51
Figura 41. Perfil de velocidades de onda Vs de San Carlos y San Luis con sus respectivas unidades.	53
Figura 42. Columna estratigráfica de sondeos realizados al margen del río Coca.....	60
Figura 43. Mapa Geológico Local Fuente: (Kawsus, 2020).....	66
Figura 44. Avance del proceso de erosión hídrica del río Quijos y niveles de exposición en la comunidad San Luis Fuente: (SGR, 2023).....	67
Figura 45. Depósitos de avalancha de escombros (SAN LUIS) en dirección NE de la línea sísmica	68
Figura 46. Suelo vegetal seguido de avalancha de escombros a una cierta profundidad se puede apreciar acuíferos los cuales sirven como conductos de transmisión de agua. (San Luis).....	68
Figura 47. San Luis sobre depósitos de avalancha de escombros del volcán Reventador. La línea roja representa la línea sísmica de San Luis	69
Figura 48. Avalancha de escombros y Depósitos fluvio-lacustres (San Carlos) en Dirección Sureste de la línea sísmica.....	70

RESUMEN

La tomografía de refracción sísmica y MASW, son métodos no invasivos que mediante las velocidades de ondas sísmicas V_p y V_s permiten obtener información de materiales geológicos que conforman el subsuelo. En esta investigación, se modelaron dos líneas sísmicas de 120 m de longitud con 24 geófonos. Mediante el software Seislmager, se obtuvieron los modelos de velocidad V_p y V_s . En el perfil de velocidad de onda V_p de San Carlos, se identificaron 3 unidades con velocidades de 303 a 1039 m/s con espesores de 4 a 24 metros presentando un adelgazamiento en dirección NE. La unidad 1 corresponde a suelo intemperizado, seguido de avalancha de escombros entrando en una zona de transición con material fluvio-lacustre. El perfil de velocidad de onda V_p de San Luis, mostró velocidades de 300 a 1105 m/s con espesores de 3 a 28 metros y adelgazamientos en ambas direcciones. La primera unidad consiste en suelo intemperizado, la segunda en depósitos de avalancha y la tercera en brechas volcánicas. Los perfiles V_s , se clasificaron desde suelo blando hasta suelo rígido, con un rango de 154 a 322 m/s en San Carlos y de 175 a 328 m/s en San Luis. Los resultados V_p coinciden con estudios previos (sondeos y perfiles sísmicos) donde se analizaron 3 unidades estratigráficas asociándolas a depósitos de avalanchas y brechas volcánicas con un rango de velocidades de 320 a 1260 m/s. Además, los perfiles sugieren un alto riesgo geotécnico, porque indica una ripabilidad inferior a 1500 m/s siendo excavables.

Palabras clave: tomografía sísmica, MASW, erosión regresiva, San Luis, San Carlos, río Coca.

ABSTRACT

Seismic refraction tomography and MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves) are non-invasive methods that, through seismic wave velocities V_p and V_s , allow obtaining information about the geological materials that make up the subsuelo. In this research, two seismic lines of 120 m in length were modeled with 24 geophones. Using the SeisImager software, the velocity models V_p and V_s were obtained. In the V_p wave velocity profile of San Carlos, three units were identified with velocities ranging from 303 to 1039 m/s and thicknesses of 4 to 24 meters, showing thinning in the NE direction. Unit 1 corresponds to weathered soil, followed by debris avalanche entering a transition zone with fluvio-lacustrine material. The V_p wave velocity profile of San Luis showed velocities from 300 to 1105 m/s with thicknesses ranging from 3 to 28 meters and thinning in both directions. The first unit consists of weathered soil, the second of avalanche deposits, and the third of volcanic breccia. The V_s profiles were classified from soft soil to rigid soil, with a range of 154 to 322 m/s in San Carlos and 175 to 328 m/s in San Luis. The V_p results coincide with previous studies (boreholes and seismic profiles) where three stratigraphic units were analyzed, associated with avalanche deposits and volcanic breccia, with a range of velocities from 320 to 1260 m/s. Additionally, the profiles suggest a high geotechnical risk because they indicate a ripability lower than 1500 m/s, making them excavable.

Keywords: seismic tomography, MASW, regressive erosion, San Luis, San Carlos, Coca River.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que los sismógrafos no se desarrollaron hasta finales del siglo XIX, su estudio realmente no despegó hasta inicios del siglo XX, cuando se desarrollaron técnicas refractivas y se usaron para descubrir la discontinuidad de Mohorovicic y el núcleo terrestre. Karcher llevó a cabo el primer estudio de reflexión sísmica entre 1919 y 1921 en Oklahoma, Estados Unidos, basándose en los trabajos pioneros de Reginald Fessenden alrededor de 1913. Para 1927, el método de refracción sísmica se utilizaba de manera habitual en la exploración de recursos hidrocarburíferos. A lo largo de los años, este método se ha convertido en el predominante a nivel mundial en la búsqueda de petróleo y gas (Reynolds, 2011). Además, en los últimos años, también se ha utilizado para investigar las profundidades superficiales del suelo, con fines geotécnicos (López, 2016).

Los métodos geofísicos, son aplicados en respuesta a la necesidad de comprender la naturaleza del subsuelo. Los beneficios que otorga el uso de estos métodos de exploración geofísica se basan principalmente en que estos estudios son rentables y rápidos, por lo que tener una comprensión amplia de ellos es esencial. Los métodos geofísicos de refracción sísmica y MASW son técnicas no invasivas que permiten el modelamiento de las velocidades de ondas sísmicas V_p (longitudinales o de compresión) y las ondas de corte V_s para comprender la estratigrafía del subsuelo, identificar posibles discontinuidades y fallas geológicas para evaluar riesgos geotécnicos asociados a la estabilidad del terreno (Rivera et al., 2016).

En esta investigación se aplica la Tomografía de Refracción Sísmica y MASW, en la provincia de Napo, Cantón el Chaco, parroquia Gonzalo Díaz de Pineda en las poblaciones de San Luis y San Carlos, que se encuentran en la zona de erosión regresiva del río Coca, donde debido a una intensa actividad fluvial y de procesos erosivos que ha provocado grandes deslizamientos de tierra cambiando la geomorfología en un periodo de tiempo significativo (Proaño, 2023).

Este estudio tuvo como objetivo el modelamiento de las velocidades de ondas sísmicas, V_p y V_s para obtener la variación de las mismas, el espesor, la profundidad e interfaces entre diferentes materiales geológicos que conforman el subsuelo para el análisis de la estratigrafía. Para la clasificación de suelos de los perfiles de las velocidades de ondas

sísmicas, fue necesario aplicar la norma ecuatoriana de "Peligro sísmico diseño sismo resistente" (NEC, 2014). Además, se utilizó la norma internacional ASTM D5777-00 (2011) y CNA (1993) (Bernal & Tavera, 2020).

Varios estudios se han empleado con el método de refracción sísmica y MASW. Por ejemplo, Araujo et al. (2023), se destaca porque es el único estudio realizado en la zona de San Luis, donde, determinaron tres unidades sismoestratigráficas con un rango de velocidades de 320 a 1260 m/s, clasificando la unidad 1 y 2 como depósitos de avalancha, mientras que la unidad 3 como brecha volcánica.

De la misma manera Terrahidro & CELEC EP (2020), en el estudio realizado en el tramo de afectación Salado- San Rafael (Sur del río Montana), se identificaron cinco niveles sismoestratigráficos, mediante refracción sísmica en su estudio. Según sus hallazgos, las velocidades bajas de 250 m/s se asocian con material poco compactado o suelos naturales alterados. En el rango de velocidades de 500 a 700 m/s, se observa mayor compactación, lo cual se relaciona con depósitos de avalancha del volcán Reventador. Por otro lado, las velocidades en el rango de 800 a 1250 m/s indican una mayor compacidad, sugiriendo la presencia de cantos y bloques de material volcánico. Además, velocidades superiores a 1400 a 2139 m/s señalan una elevada compactación o posible cementación, lo cual podría vincularse a sedimentos volcánicos de tipo tobáceo en apariencia, como avalanchas y flujos (CELEC EP & Terrahidro, 2020).

Conforme a la investigación realizada por CELEC EP (2020), en su estudio fluviomorfológico del río Coca, menciona que el perfil geológico comprende de una variedad de depósitos. Entre los identificados se encuentran depósitos de avalanchas, fluvio-lacustres, brecha volcánica, flujo de escombros, aluviales y basamento rocoso. En la presente investigación, se tomó en cuenta el resultado obtenido en el sondeo denominado PCR-6 (Figura 42), realizado por Terrahidro (2020), mismo que está ubicado a una distancia de aproximadamente 90 m. El sondeo tuvo una profundidad de 130 m y proporcionó información crucial sobre la composición y las características de los estratos del subsuelo.

La incorporación de los hallazgos obtenidos de los sondeos PCR-6, junto con los datos recolectados en campo y mostrados en el mapa geológico (1:30:000), elaborado por Kawsus (2020), han proporcionado una valiosa contribución en el presente estudio para

comprender en mayor medida la estructura geológica de la zona de estudio, a pesar de no encontrarse directamente en la línea sísmica realizada.

Por otro lado, en el estudio de Rivera et al. (2016), las velocidades de las ondas de corte V_s , se encuentra en un rango de 310 a 312 m/s, clasificándolas como suelo rígido. Así mismo, en el estudio realizado por Gómez et al. (2020), se obtuvieron velocidades de 330 m/s, clasificándolo como suelo intermedio, mientras que las velocidades más altas las clasifica como suelo rígido o roca.

Los resultados de esta investigación proporcionan información crucial para la planificación e implementación de medidas de mitigación de riesgos. Además, contribuirá al conocimiento técnico y científico especialmente en el modelamiento de velocidades de ondas sísmicas y su aplicación en la caracterización del subsuelo, Así como también, este estudio puede validar los resultados de investigaciones futuras ya que solo existe un estudio realizado directamente en la zona de influencia (San Luis) los demás han sido realizados a distancias considerables.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

1.1.1. Contexto Geológico

La ubicación geográfica del Ecuador es particularmente única en el contexto geológico de América del Sur debido a dos razones principales: en primer lugar, se encuentra en la intersección de los Andes centrales y septentrionales, y, en segundo lugar, está situado en el Rift de las Galápagos, una zona de expansión oceánica con orientación este-oeste que separa las placas Nazca y Cocos (Marocco & Winter, 1997)

La tectónica de los andes ecuatorianos se ubica en un proceso de subducción (Lonsdale, 1978). Ecuador cuenta con zonas tectonoestratigráficas que son: La Planicie Costera y Cordillera Occidental (incluyendo varias topografías marinas que se encuentran separadas por sistemas de fallas del período Cretácico), el Valle interandino (incluyendo cinturones volcánicos del Plioceno-Cuaternario), la Cordillera Real y la Zona Subandina y Llanura Amazónica (cubiertas por exuberante vegetación tropical, la mayoría de estas regiones contienen rocas metamórficas con cubierta sedimentaria). En cada uno de ellos se puede observar un paisaje diferente dominado por las características geológicas de cada zona (IIGE, 2022);(Alvarado et al., 2016).

Alvarado et al. (2016) investigaron la evolución tectónica de los Andes ecuatorianos en los últimos 15 millones de años. Su estudio definió el límite actual de la Astilla Andina del Norte (NAS) e identificó los principales sistemas de fallas activas, como Chingual, Cosanga y Salado, Pallatanga, Puná, Macas, Napo-Cucutú y Quito-Latacunga. El sistema de fallas más importante es el Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP), que actúa como límite tectónico oriental de la Astilla Andina del Norte y conecta tres subsistemas de fallas transpresivas e inversas. El CCPP se extiende aproximadamente 800 km desde el Golfo de Guayaquil hasta la Cordillera Real en la frontera con Colombia, y su segmento norte-sur ha sido epicentro de importantes terremotos históricos (Figura 1) (Alvarado et al., 2016).

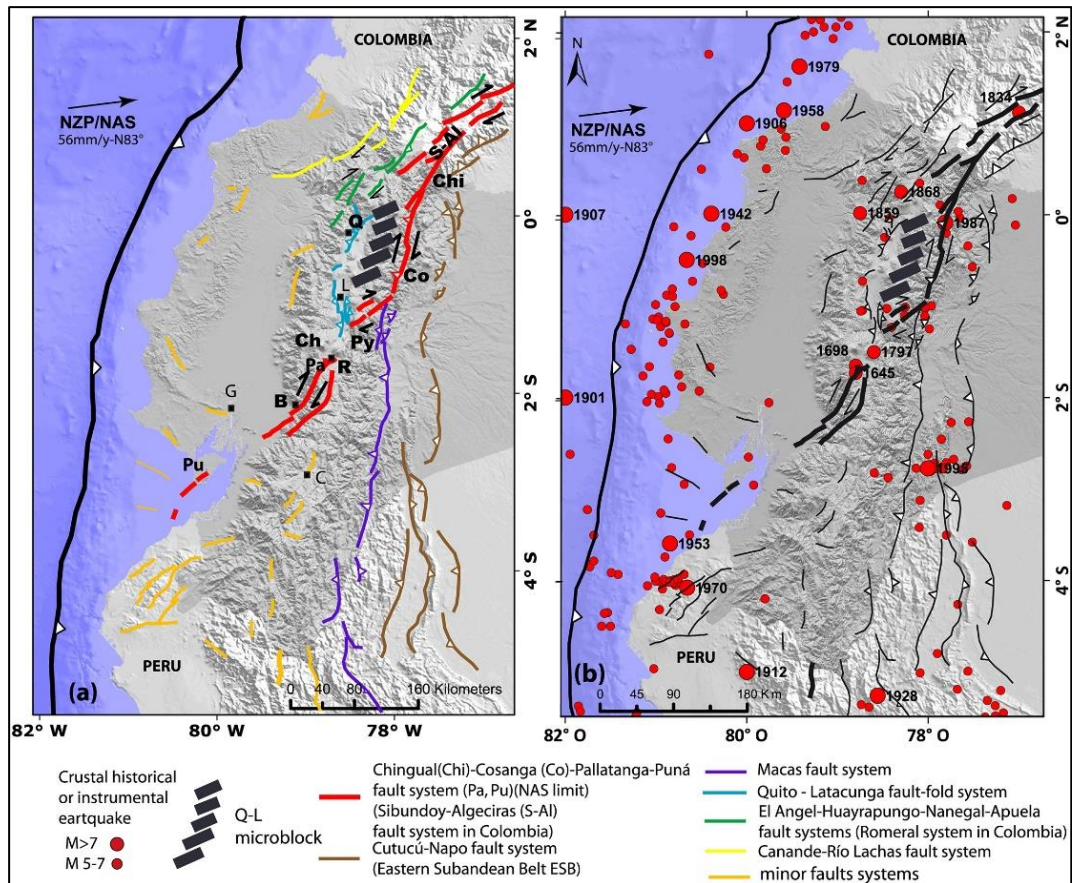


Figura 1. (Fallas activas, cinemática y sismicidad del Ecuador
Fuente: (Alvarado et al., 2016)

(a) Mapa de fallas activas del Ecuador y su cinemática cuaternaria. (b) Sismicidad cortical instrumental e histórica en Ecuador (>40 km de profundidad y magnitud > 5)

La geología metamórfica de la Cordillera Real en Ecuador se ha estudiado en términos de cinco subdivisiones tectónicas. Durante el Mesozoico, hubo múltiples eventos de acreción y la transpresión dextral desempeñó un papel importante en la evolución tectónica de los Andes del Norte. Se identificó un evento temprano relacionado posiblemente con la desintegración de Gondwana y la formación de un cinturón plutoniano. Además, se encontraron rocas alcalinas de calcio durante el Jurásico y se formaron formaciones volcánicas-sedimentarias en el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior. La acumulación de la dorsal oceánica occidental tuvo lugar a finales del Cretácico. Estos eventos coincidieron con un disturbio térmico importante, demostrado por la presencia de minerales jóvenes en la Cordillera Real (Aspden & Litherland, 1992).

El área de este estudio se encuentra en la Zona Subandina, que, desde el punto de vista estructural, se encuentra dentro de la porción deformada de la Cuenca de Oriente. Esta cuenca se formó mediante la inversión tectónica de amplias estructuras previas que datan del período Cretácico Inferior. Estas estructuras están relacionadas con el sistema de rift del Triásico Superior y Jurásico Inferior, con una orientación predominante de NNE-SSO (Barragán & Baby, 2004).

La zona subandina está formada por dos domos, Cucutú y Napo que se encuentran separados por la depresión Pastaza. En la región del Napo y la depresión de Pastaza el drenaje hacia el este consta de tres afluentes principales del río Amazonas que son los ríos Pastaza, Napo y Aguarico. La altitud varía de 3732 a ~900 metros en la zona subandina norte (región Napo), a menos de 400 metros en parte de la depresión de Pastaza y región Oriente. Tal diferencia en elevación está relacionada con levantamientos recientes, pero también con la presencia de tres volcanes: el Sumaco 3732 m, Pan de Azúcar y Reventador (Ruiz, 2002).

El volcán Reventador está ubicado en el levantamiento del Napo. Es un volcán activo y su lava se distingue por una alternancia de andesitas basálticas, andesitas y dacitas. Estas lavas suelen ser porfídicas, con generación de fenocristales cuya composición varía según la evolución de estos magmas. Como resultado, los fenocristales de plagioclasa (An₈₅₋₄₅), clinopiroxeno, olivino, hornblenda, ortopiroxeno y magnetita dominan la matriz con una estructura intercrystalina durante la paragénesis. La lava de andesita a menudo contiene inclusiones de xenolitos de rocas intrusivas de gabro. Desde un punto de vista geoquímico, la lava Reventador muestra una distribución consistente en el campo cálcico-alcálico (Barragán & Baby, 2004).

En la región Napo, se encuentra una serie sedimentaria que forma el basamento de varias estructuras volcánicas, incluyendo el volcán Reventador. Esta secuencia abarca desde el Jurásico medio hasta el Mioceno medio e incluye seis formaciones: Misahuallí, Hollín, Napo, Tena, Tiyuyacu y Chalcana. Las formaciones varían en composición y características sedimentarias, desde vulcanitas y basaltos en Misahuallí, hasta areniscas cuarzosas compactas con lutitas carbonosas en Hollín. La formación Napo se compone de argilitas, areniscas glauconíticas, calcáreas, calizas conchíferas, margas y lutitas silicificadas, mientras que la formación Tena contiene arcillas con intercalaciones de areniscas y conglomerados. Por encima de Tena, se encuentran las formaciones continentales de Tiyuyacu y Chalcana, que presentan conglomerados de areniscas con

lutitas en tonos rojos y grises, y lutitas multicolores con presencia de yeso, respectivamente. Estas formaciones sugieren un aporte continental y su deposición en ambientes de agua dulce (INECEL, 1992).

Rocas plutónicas: Algunos cuerpos intrusivos grandes, la extensión NNE-SSW, ocupan parte de la región subandina occidental a lo largo del contacto tectónico con la Cordillera Real (INECEL, 1992).

Depósitos de avalancha de escombros: Son deslizamientos de rocas, arena y ceniza, conocidos, pueden ocurrir en un volcán cuando sus flancos se vuelven inestables y colapsan. Estos eventos son muy rápidos y destructivos, y el volcán El Reventador ha experimentado al menos dos de ellos en el pasado, resultando en la destrucción de los edificios antiguos y la formación de la caldera actual (IGEPN, 2011).

En el valle del río Coca se encuentran restos de depósitos (Figura 2), que probablemente cubrieron todo el valle tras la avalancha generada por el colapso del volcán Paleo Reventador. Estos restos consisten en fragmentos angulares y subredondeados de diferentes tamaños, desde gravilla hasta bloques, compuestos principalmente por material volcánico. Se mezclan en menor medida con fragmentos de rocas de otros tipos. Los depósitos también contienen brechas volcánicas, que son un conglomerado donde se cementa una matriz de material fino y se añaden granos gruesos (Kawsus, 2020).



Figura 2. Depósitos de avalanchas volcánica y brecha volcánica
Fuente: (CELEC EP, 2022)

Depósitos fluvio-lacustres (Figura 3): Materiales caracterizados por la presencia de capas horizontales de aluvión de grano fino de tonalidades que van de marrones a grises, a veces con capas de arena azul muy fina que varían en tamaño de centímetros a decímetros y parecen como ejes métricos gruesos. Estos depósitos se relacionan a erupciones volcánicas del El Reventador que obstruyeron el valle del río Coca, formando sedimentos fluvio-lacustres (Kawsus, 2020).



Figura 3. Depósitos fluvio-lacustres
Fuente: (CELEC EP, 2022)

En el valle del río Coca se encuentran depósitos compuestos por laharita, sedimentos aluviales, arcilla, arena, grava, cantos rodados y limo. Estos depósitos se distribuyen en las laderas bajas de la margen derecha del valle, bordeados por rocas de la Formación Misahuallí. En el lecho de los ríos Coca, Salado y Quijos también hay depósitos coluviales y aluviales recientes (Figura 4). Durante las inundaciones se forman llanuras aluviales, aunque las pequeñas terrazas previamente depositadas están erosionadas y limitadas en su extensión (Kawsus, 2020).



Figura 4. Depósitos aluviales
Fuente: (CELEC EP, 2022)

MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

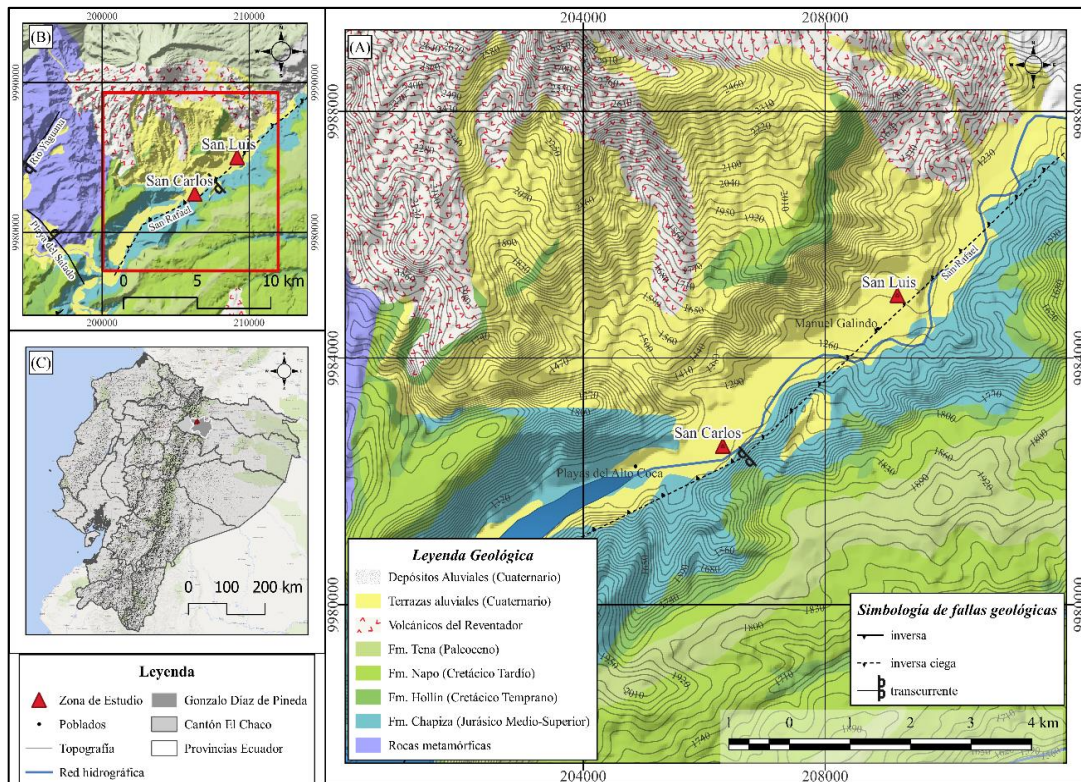


Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio poblados San Luis y San Carlos
Elaborado por: Karina Salcedo

Fuente: Modelo Digital del Terreno (IGM, 2010); División Administrativa del Ecuador (Provincias, cantones y parroquias) (INEC, 2010); Poblaciones, curvas de nivel e Hidrográfica (IGM, 2010); Capas de geología (INIGEM, 2005); Fallas Geológicas (Eguez et al., 2003)

La Figura 5, muestra el mapa geológico de la zona de estudio. (A) Mapa de geología local en la zona de estudio, triángulos rojos muestran los sitios San Carlos y San Luis. La línea entrecortada con triángulos negros muestra la falla San Rafael determinada como inversa ciega y transcurrente (Eguez et al., 2003). La geología es dominada por las calizas de la formación Napo, seguidas por las capas rojas de la formación Chapiza. Así como también, presenta las arcillolitas de la formación Tena. Posteriormente, se observan los depósitos volcánicos provenientes del volcán Reventador. Por último, la geología está dominada por los depósitos aluviales cuaternarios del río Coca. (B) Mapa de geología regional para la zona de estudio, depósitos volcánicos y volcán Reventador en la parte Superior, así como depósitos volcánicos del Sumaco en la parte inferior. De igual manera, se indican las fallas geológicas transcurrentes Río Yaguana y Playas del Salado, además de la falla inversa Tres cruces. (C) Localización geográfica a nivel país

de la zona de estudio, se muestra la parroquia Gonzalo Díaz de Pineda como polígono gris oscuro, el cantón El Chaco en polígono gris claro.

1.1.2. Actividad volcánica

El volcán Reventador tiene un complejo de estructuras volcánicas conformado por dos edificios: El primero de mayor antigüedad que ha experimentado dos colapsos sectoriales y ha dejado un importante escarpe de deslizamiento; y la estructura más reciente, que se ha desarrollado dentro del espacio dejado por ambos deslizamientos. La mayoría de las lavas actuales son andesitas y andesitas basálticas. El cono presenta colgantes de hasta 34 grados y una forma extendida hacia el este. La altura del cono era de 3560 msnm antes de la erupción del 3 de noviembre de 2002; como resultado de la erupción, la parte superior del cono fue destruida y su altura se redujo a 3450 msnm. Desde entonces, se ha ido reconstruyendo el cono gracias a al menos 26 eyecciones de lava, y en este momento se prevé que alcance una altura de 3600 msnm (IGE, 2023).

La actividad histórica de este volcán es poco conocida debido a su lejanía, dificultad de acceso y persistentes condiciones climáticas adversas que dificultan la observación directa. Sin embargo, se cree que el volcán tuvo al menos 16 erupciones desde 1541. Erupciones confirmadas antes de principios de 2002: 1898-1912, 1926-1929, 1944, 1959-1960, 1972-1974 y 1976. Estas erupciones se caracterizan por pequeños flujos de lava, lodo y ceniza (Hall et al., 2004).

La erupción actual comenzó en 2002 con una fase bastante explosiva, alcanzando un índice de actividad volcánica de 3 (VEI=3). La columna de erupción resultante se elevó a una altura de 16-17 km y produjo una tefra con un volumen de 60 millones de m³, hacia el oeste del volcán. La ceniza ha tenido un impacto significativo en el área, con una acumulación de 1 a 2 mm de ceniza en Quito. Además, los flujos de lava que se formaron han afectado carreteras y oleoductos ubicados en la zona. Desde entonces, el volcán ha seguido entrando en erupción con más frecuencia, produciendo flujos de lava y algunos hechizos de explosión de intensidad media que producen columnas de explosiones de 1 a 2 kilómetros de altura. (IGE, 2023).

1.1.3. Erosión regresiva

La erosión regresiva generalmente se presenta cuando la concentración del agua que fluye por canales o cauces hace retroceder las entalladuras aumentando su tamaño y longitud propagándose hacia arriba, lo cual provoca que exista remoción en masa de grandes volúmenes de suelo esto debido a la infiltración del agua y a la acción por la gravedad (Kawsus, 2020).

1.1.4. Efectos de la Erosión Regresiva

El colapso de la cascada San Rafael, ocurrido el 2 de febrero de 2020, desencadenó la erosión regresiva aguas abajo de las poblaciones de San Rafael, San Luis y San Carlos. El lavado de sedimentos producto del derrumbe y posterior colapso del sumidero causó la expansión lateral del mismo, capturando el río Coca y generando múltiples cascadas convergentes en una corriente de desvío más baja. Bajo el contacto discordante de la presa de lava, se formó un desfiladero de cañón profundo y transitorio encabezado por una cascada. La erosión regresiva continúa avanzando río arriba, mientras el nuevo canal del río Coca se ensancha debido a la erosión lateral. El colapso final del arco de la presa de lava ocurrió el 25 de febrero de 2021, debido a la pérdida del soporte basal. Durante este proceso, los bloques colapsados de la presa de lava fueron removidos y transportados por el río, dando lugar a la configuración actual de la zona (Reyes et al., 2021).

Las fuerzas de filtración presentes en el área de la cascada provocaron el arrastre gradual de partículas del suelo hacia aguas abajo, formando ductos y cavidades que se amplificaron con el tiempo, generando erosiones de gran magnitud conocidas como tubificación retrógrada. La inestabilidad interna resultó en el colapso del esqueleto de soporte, especialmente en materiales con granulometría discontinua como combinaciones de grava y arena. Este colapso alteró los esfuerzos y deformaciones del material circundante, generando esfuerzos cortantes que superaron las resistencias y facilitaron su desplome, aumentando la inestabilidad de los taludes formados. Además, factores adversos como condiciones meteorológicas, hidrológicas, geológicas y geotécnicas pueden agravar la situación (Kawsus, 2020).

1.1.5. Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son vibraciones o perturbaciones que se propagan en la Tierra debido a eventos como terremotos, erupciones volcánicas o explosiones. Se dividen en ondas de cuerpo (ondas P y S) que se mueven a través del interior de la Tierra, y ondas de superficie (ondas Rayleigh y Love) que se desplazan a lo largo de la superficie terrestre (Stein & Wysession, 2009).

Según Gómez et al. (2008), la onda está estructurada por los siguientes elementos (Figura 6).

1. Cresta: Es el punto más alto, donde la amplitud es máxima.
2. Valle: Es el punto más bajo, donde la amplitud es mínima.
3. Amplitud: Es la medida de la máxima distancia que una partícula de un medio en vibración se desplaza desde su posición de equilibrio. Representa la magnitud o intensidad de la onda.
4. Longitud de onda: Es la distancia física entre dos puntos equivalentes de la onda, como la distancia entre dos crestas o dos valles sucesivos. Se representa por la letra griega lambda (λ).

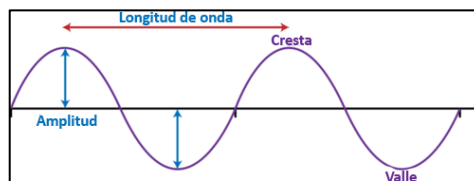


Figura 6. Elementos de una onda
Fuente: (Raymond Chou & CK-12 Foundation, 2021)

1.1.6. Tipos de Ondas

Ondas primarias: También conocidas como ondas P de compresión, se denominan así porque son las primeras en llegar a la superficie de la Tierra. Son las más rápidas y pueden viajar tanto medios sólidos como líquidos. Las ondas P comprimen y expanden el material en la misma dirección de la propagación. Pueden llegar a propagar a unos 7,5 km/s, todo dependerá de la densidad del medio en que se transmiten (Figura 7) (Otero, 2017).

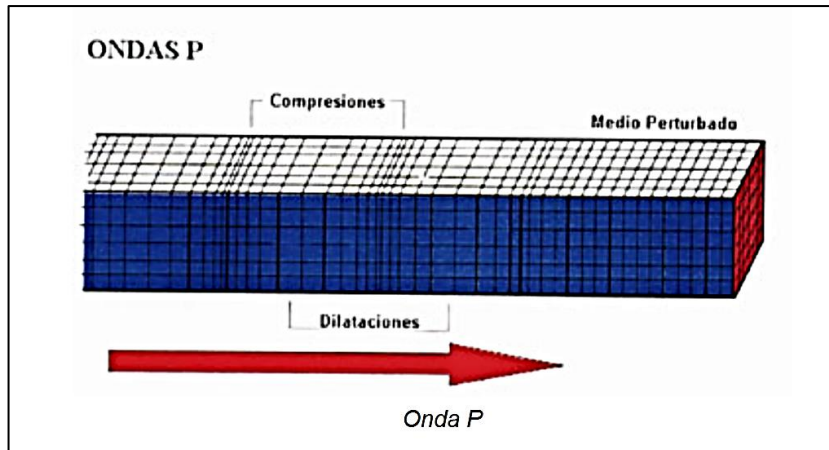


Figura 7. Comportamiento onda P
Fuente: (FUNVISIS, 2020)

Ondas secundarias: También conocidas como ondas S o Shear Waves (Figura 8), se llaman así porque llegan a la Tierra después de las ondas P, es decir en segundo lugar. Las ondas S pueden propagarse a una velocidad de aproximadamente 4, 2 km/s Las ondas S generan movimientos de corte en el material, con las partículas oscilando perpendicularmente a la dirección de propagación (Otero, 2017).

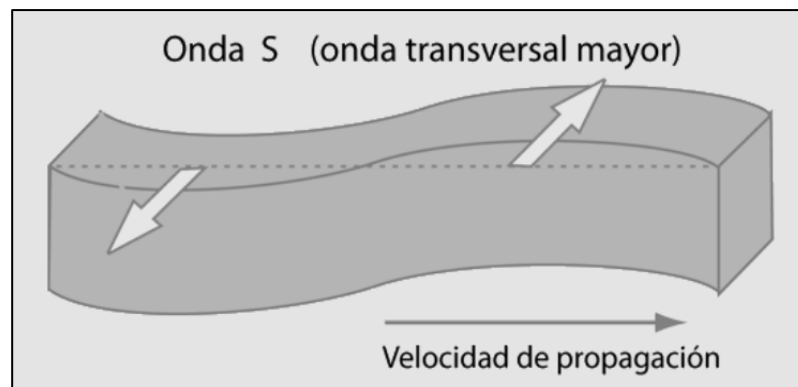


Figura 8. Comportamiento onda S
Fuente: (Otero, 2017)

Ondas de Rayleigh: También conocida como onda superficial (Figura 9), generan un movimiento rodante similar a las olas del mar. Las ondas Rayleigh describen movimientos elípticos en un plano vertical que pasa por la dirección de la propagación (Griem, 2020).

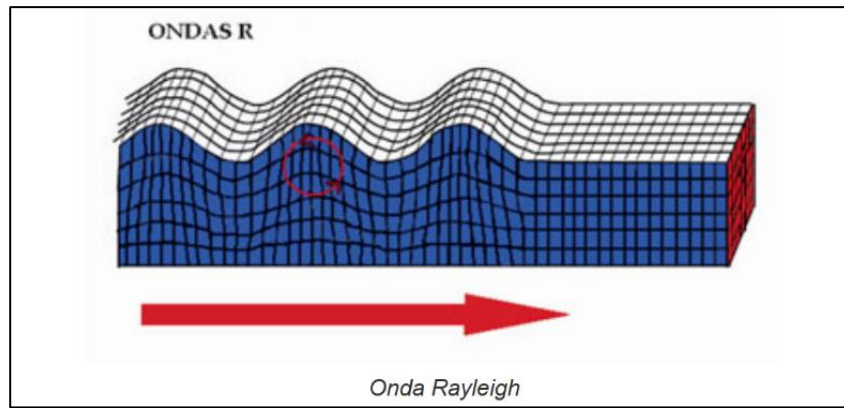


Figura 9. Comportamiento onda Rayleigh
Fuente: (FUNVISIS, 2020)

Ondas Love: la figura10, muestra un tipo de onda de superficie que tienen un movimiento netamente horizontal, sin movimiento vertical. Las ondas Love se desplazan de un lado a otro en dirección perpendicular a la dirección de propagación. Estas ondas son más rápidas que las ondas Rayleigh. Estas ondas necesitan una capa superficial con una velocidad más baja en comparación con las capas subyacentes, lo que se conoce como gradiente de velocidad positivo (Griem, 2020).

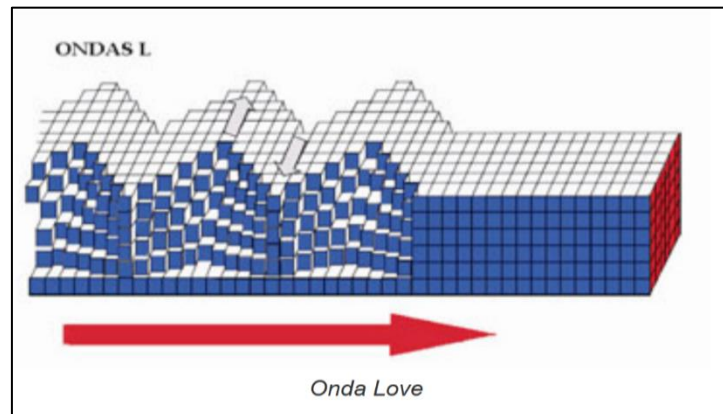


Figura 10. Comportamiento onda Love
Fuente: (FUNVISIS, 2020)

1.1.7. Método de Refracción Sísmica

La sísmica de refracción se dedica al estudio de la propagación de ondas sísmicas en el suelo, particularmente cuando ocurren refracciones totales en las superficies que separan medios con diferentes características elásticas. Este fenómeno permite que las ondas regresen a la superficie cuando inciden en las discontinuidades del subsuelo, y

pueden ser detectadas mediante sensores especializados conocidos como geófonos. Al aplicar los principios de la óptica, podemos reconstruir la trayectoria de las ondas refractadas y calcular la profundidad a la que ocurren estas refracciones, así como las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en cada nivel (Linares et al., 2002).

1.1.8. Expansión y trayectoria de ondas

Principio de Huygens

Según esta ley, cada punto de un frente de onda se comporta como una fuente puntual de ondas secundarias. Estas ondas secundarias se suman y se propagan en todas las direcciones, lo que resulta en la expansión de la onda. En la figura 11 se puede ver el comportamiento de la onda (Reynolds, 2011).

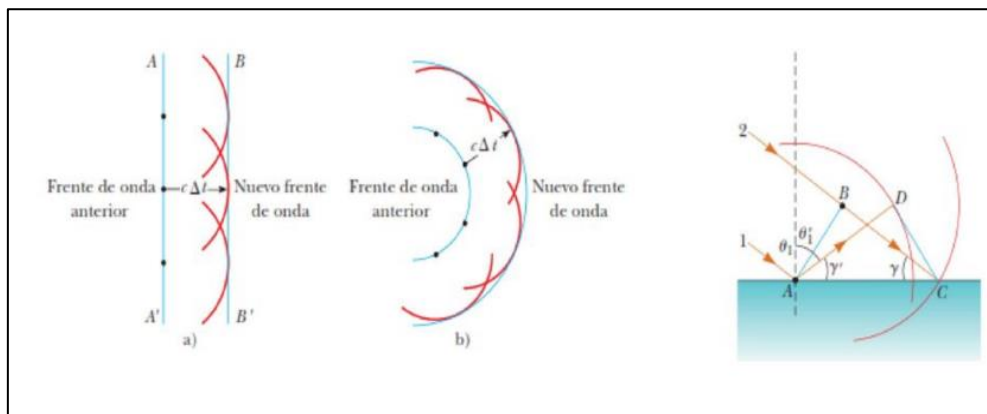


Figura 11. Como actúa un frente de onda según el principio de Huygens.
Fuente: (Vidal, 2018)

El principio de Fermat: Se trata de una especialización del principio de mínima acción de las ondas. El principio de variación expresa matemáticamente el hecho de que un fenómeno ocurre en la naturaleza de la mejor manera posible (Araujo et al., 2023). El principio de Fermat establece que los caminos de los rayos entre dos puntos son aquellos para los cuales el tiempo de viaje es un extremo, un mínimo o un máximo, con respecto a los caminos posibles cercanos. Lo más simple caso es dos puntos en un semiespacio homogéneo; el tiempo necesario para recorrer la línea recta que une los puntos es menor que para caminos adyacentes. Una segunda trayectoria de rayo para la cual el tiempo es un mínimo en comparación con los caminos adyacentes es el del rayo reflejado que satisface la ley de Snell. La trayectoria directa del rayo corresponde

a un mínimo absoluto del tiempo de viaje, mientras que el rayo reflejado corresponde a un mínimo local (Stein & Wysession, 2009).

La ley de refracción: Esta ley se rige en los principios de Huygens por lo que el cociente entre el seno del ángulo de incidencia (θ_1) y el seno del ángulo de refracción (θ_2) es igual a la relación entre las velocidades de propagación de velocidades de ondas en dos medios (Stein & Wysession, 2009).

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Para una comprensión más clara, se representa en la (Figura 12 y 13) este método de manera esquemática, donde tomará en cuenta un medio compuesto por dos velocidades: V_1 y V_2 (siendo V_2 la velocidad más alta) Después de que se produce la perturbación en el área de estudio, las ondas comienzan a propagarse a través del medio superior, generando frentes de onda en su trayectoria.

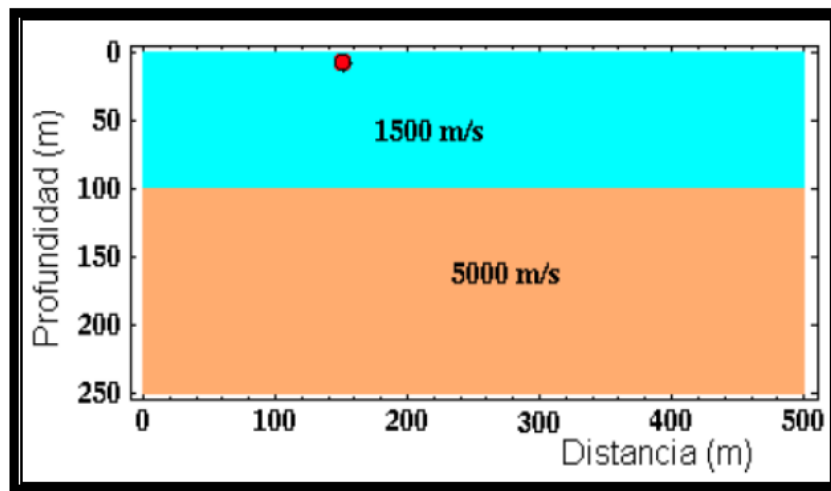


Figura 12. Modelo de dos capas donde se aprecia que la V_2 es mayor que la primera

Fuente: (Boyd, 1999)

El ángulo crítico se alcanza cuando el ángulo de refracción supera al ángulo de incidencia, llegando a un valor de 90 grados. Esto ocurre debido a una expresión determinada únicamente por la velocidad característica de cada capa.

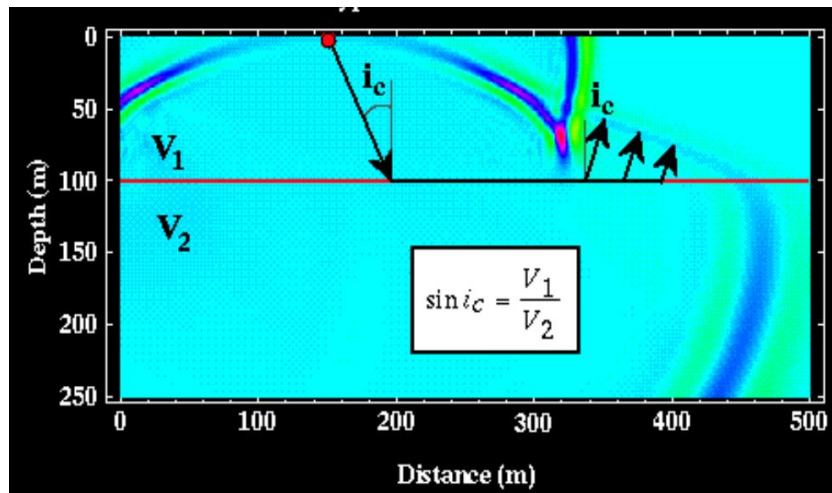


Figura 13. Representación del ángulo crítico.
Fuente: (Boyd, 1999)

1.1.9. Equipo para la medición de refracción sísmica

Según Geometrics (2012) y Reynolds (2011), para la adquisición y procesamiento se deben tener en cuenta los siguientes aspectos.

Registro de las variaciones en la superficie terrestre: El Geode de la figura 14, es un sistema sísmico "distribuido", lo que significa que los módulos de registro sísmico están ubicados físicamente separados de la computadora principal y se distribuyen en el suelo junto a los geófonos. Cada módulo Geode individual tiene capacidad para 8, 12, 16 o 24 canales de registro (Geometrics, 2012). Los geófonos se colocan de forma vertical mismos que están distanciados a una distancia para la refracción sísmica la frecuencia de los geófonos es variable de 1 a 14 Hz. Detecta las variaciones de profundidad de la onda P y S, permitiendo conocer la profundidad entre otras características (Arboleda & Camacho, 2020).

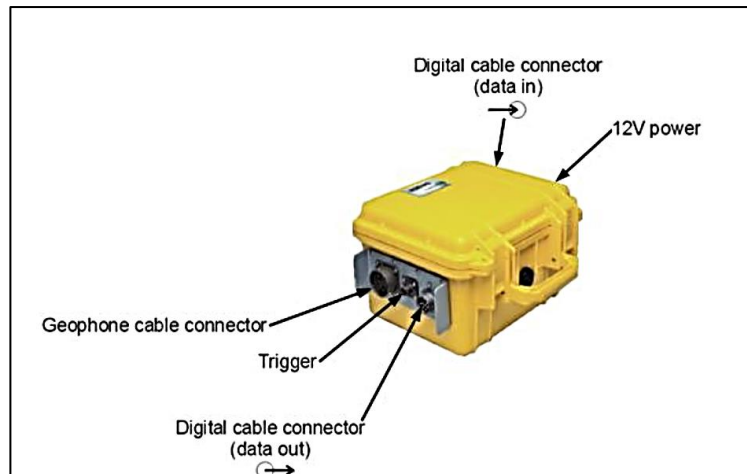


Figura 14. Geode
Fuente: (Geometrics, 2012)

Fuente de energía para generar las ondas sísmicas (Martillo): Consiste en la generación controlada de ondas sísmicas mediante un martillo de impacto o una fuente vibratoria en la superficie de la Tierra. Al golpear el suelo, se generan ondas sísmicas que se propagan a través del subsuelo. Estas ondas se refractan y se reflejan al encontrar diferentes capas de roca con distintas velocidades de propagación. Los geófonos, colocados estratégicamente en la superficie, registran las ondas sísmicas y miden el tiempo de llegada de las ondas a cada receptor. El objetivo de usar cualquier fuente sísmica es producir una señal lo suficientemente grande en el suelo para garantizar una penetración de profundidad suficiente y una resolución lo suficientemente alta como para obtener imágenes del subsuelo (Reynolds, 2011).

Almacenamiento de datos: Son elementos determinantes para la obtención de datos.

- **Unidad de acopio y digitalización:** Esta unidad cuenta con entradas que reciben los caracteres transmitidos por los geófonos. Cada geófono tiene asignado un canal y los caracteres recibidos se digitalizan según las configuraciones establecidas por el usuario.
- **Cables sísmicos:** Estos cables están conectados a los geófonos a través de dos salidas. Su función es transmitir la señal de cada geófono al dispositivo de almacenamiento de datos.

- Trigger: Se trata de un cable conectado de manera adecuada a la fuente sísmica (martillo). Su objetivo es activar el sistema de almacenamiento para que registre las ondas sísmicas en el momento en que se genera el impulso.

La figura 15, muestra los componentes que trabajan en conjunto para capturar y almacenar los datos relacionados con las ondas sísmicas, permitiendo su posterior análisis y estudio.

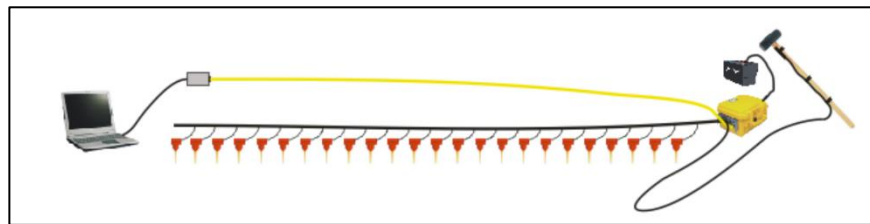


Figura 15. Equipo para la obtención y almacenamiento de datos sísmicos
Fuente: (Geometrics, 2012).

1.1.10. Método tomográfico – Plotrefa – Mínimos cuadrados

Uno de los métodos de interpretación que ofrece Plotrefa es la inversión tomográfica y es un algoritmo que ofrece Seismager. Este método comienza con un modelo de velocidad inicial que a menudo se produce mediante una inversión de término- tiempo que emplea una combinación de mínimos cuadrados lineales y análisis de tiempo de retardo moviendo los rayos de forma iterativa a través del modelo para reducir el error RMSE (*Root Mean Square Error*) entre los tiempos de viaje observados y calculados. El uso de la inversión tomográfica a menudo es mejor cuando se entiende que las variaciones de velocidad topográficas horizontales y extremas son fuertes y que los contrastes de velocidad son más graduales que discretos. Dependiendo de la gravedad de cada caso, las dos técnicas de interpretación anteriores pueden dar lugar a resultados inexactos. Una vez realizada la inversión de tiempo razonable, las velocidades mínimas y máximas de este deberían proporcionar una buena inversión tomográfica (Geometrics, 2009a).

El Seismager tiene un número predeterminado de iteraciones, pero si deseamos un buen modelo se debe hacer más de 10 iteraciones.

Formula RMSE (*Root Mean Square Error*)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

Donde:

X_{obs} : Representa los valores observados

X_{model} : Valores Calculados en la celda i

Mediante el software de Matlab es necesario aplicar pruebas de suavizado y número de iteraciones, donde se realizó varios modelos de inversión modificando los suavizados en sentido horizontal y vertical de forma independiente. Hay dos razones por las cuales se debe realizar varias pruebas de suavizado una de ellas es porque se genera un gráfico de velocidad bueno y otro que elimina objetos de velocidad que muchas de las veces pueden ser interpretados como reales (Geometrics, 2009a). Ahora para el criterio de la Curva L, Según Hansen, 1999 dice que la curva L es una representación gráfica de la norma de una solución regularizada en comparación con la norma de la norma residual correspondiente. Es una herramienta gráfica útil para demostrar la relación de compensación entre el tamaño de una solución regularizada y su ajuste a los datos a medida que cambia el parámetro de regularización. Como resultado, la curva L ayuda a elegir un parámetro de regularización que sea apropiado para los datos al dar una idea de las propiedades de regularización del método de regularización subyacente.

Una vez que se obtiene el modelo a priori se debe establecer un método de regularización numérica, una forma muy conveniente de mostrar información sobre la solución regularizada es graficar la norma o seminorma de la solución frente a la norma del vector residual según el criterio de la curva L (Hansen, 1992). Para obtener el modelo final de la tomografía sísmica de refracción en este caso se aplica el método de la regularización de Tikhonov donde la solución de la serie de Tikhonov tiene coeficientes que son funciones del parámetro de regularización que controlan el grado de regularización y que dan mayor peso a los elementos del modelo asociados con valores singulares más grandes. Para un problema general de mínimos cuadrados lineales, puede haber infinitos mínimos cuadrados soluciones Si consideramos que los datos contienen ruido, y que no tiene sentido al ajustar tal ruido exactamente, se hace evidente que puede haber muchas soluciones que pueden ajustar adecuadamente los datos (Aster et al., 2018).

Según Araujo et al. (2023), se explica el método de regularización de Tikhonov como una solución óptima para abordar el problema de definición con datos (**d**) y parámetros (**m**) en el campo de estudio. Donde la regularización radica en minimizar el parámetro de normalización α para el funcional paramétrico $P^\alpha(m, d)$ establecido en la siguiente ecuación: definido

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

Además, para construir mediante un gráfico el RMS (error cuadrático medio) mediante la norma con los modelos a priori. El RMS se obtiene sumando la ecuación (1) $RMS = \|Am - d\|$ e indica el ajuste de datos para los resultados de la tomografía (Araujo et al., 2023).

A continuación, se muestra las ecuaciones por las que están definidas las normas:

$$\ell_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (m_i - m_i^{apr})^2}$$

$$\ell_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |m_i - m_i^{apr}| \quad (2)$$

$$\ell_\infty = \max\{|m_i - m_i^{apr}|\}$$

Donde m_i^{apr} tiene puntos discretos y m_i es el vector donde se encuentra el modelo posterior. La curva L otorga los parámetros de suavizado que sirve para regularizar el problema, donde una de las estrategias es fijar el valor horizontal al máximo e ir variando el valor vertical, después se continua con valores horizontales hasta obtener la curva L (Araujo et al., 2023).

1.1.11. Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (MASW)

Un método de investigación no invasivo llamado MASW (Análisis multicanal de ondas superficiales) permite la definición del perfil de velocidad de onda de corte vertical Vs en función de la medición de ondas superficiales adquiridas de sensores colocados en el suelo. Las ondas de Rayleigh constituyen la mayor parte de la contribución, ya que se

propagan a una velocidad inversamente proporcional a la rigidez del área de tierra que afectan. Las ondas de Rayleigh se propagan con velocidades de fase y velocidades de grupo variables en un medio estratificado porque son dispersivas. En otras palabras, las ondas de Rayleigh son ondas cuya velocidad depende de la frecuencia, y su velocidad aparente de fase (o grupo) depende de la frecuencia de propagación. Con MASW, se puede calcular la velocidad de las ondas de corte V_s y por ello el tipo de suelo (Park et al., 2001).

Este proceso consiste en tres pasos tal como se muestra en la figura 16:

- Registro de datos de campo
- Obtención de la curva de dispersión
- Análisis de inversión de la curva de dispersión para obtener el perfil de velocidad de onda de corte V_s en función de la profundidad.

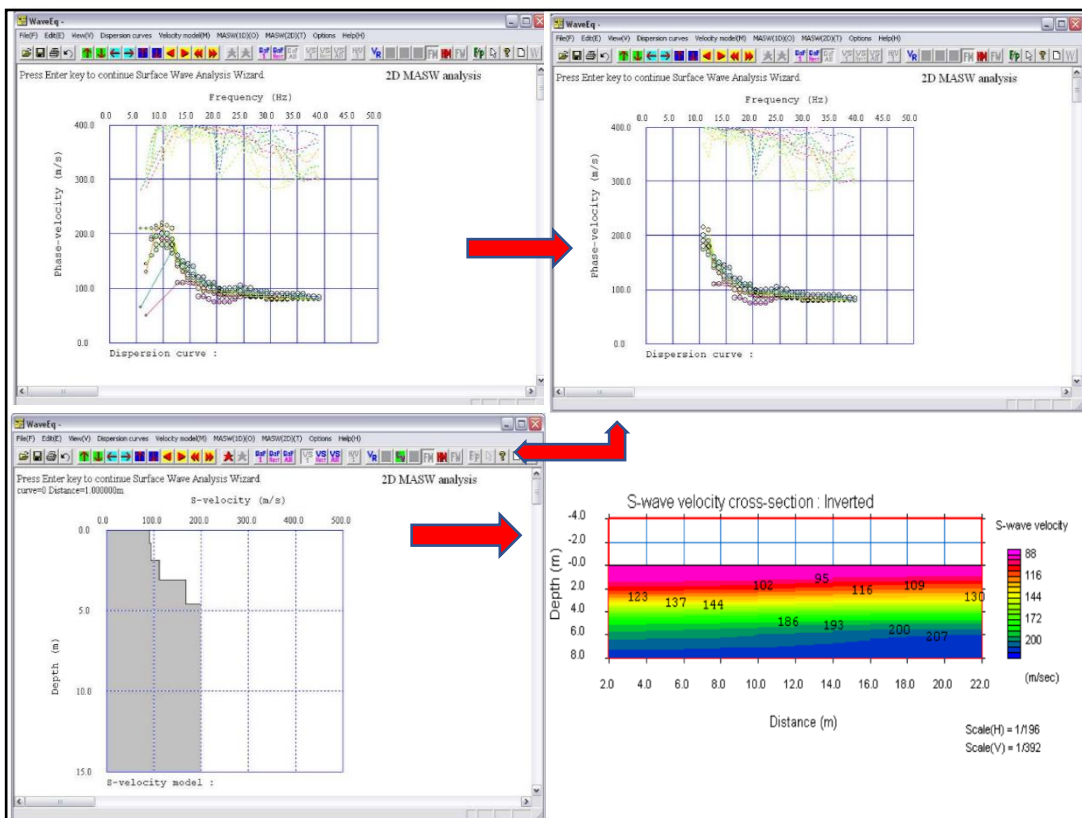


Figura 16. Proceso de obtención de la curva de dispersión, modelo inicial y final
Fuente: (Geometrics, 2009b)

Curva de dispersión

Una gráfica de dispersión (Figura 17), representa la relación entre la frecuencia y la velocidad de propagación (fase) de una onda. El estado fundamental se refiere a la curva de dispersión con la velocidad de fase más lenta. Cuando una frecuencia determinada tiene múltiples velocidades de fase (como en el caso de una cuerda vibrante), los modos superiores (armónicos) se propagan más rápido. Por lo general, existen varios modos presentes. La capacidad para identificar patrones individuales de forma clara (o la falta de ella) afecta la calidad de la interpretación. Si el modo superior se identifica erróneamente como el estado fundamental, la estimación final de la velocidad de la onda de corte será anormalmente alta (Reynolds, 2011).

El índice de calidad de una curva es una medida relativa que indica la calidad de los puntos de datos que conforman una dispersión, representada mediante el tamaño de los círculos de los datos. Si todos los puntos de datos son de alta calidad (círculos grandes), la curva será mayormente plana. Sin embargo, debido a las variaciones en la relación señal-ruido, la curva de calidad presentará picos y valles que se relacionan con puntos de datos de calidad relativamente alta y baja (círculos más pequeños), respectivamente (Geometrics, 2009b).

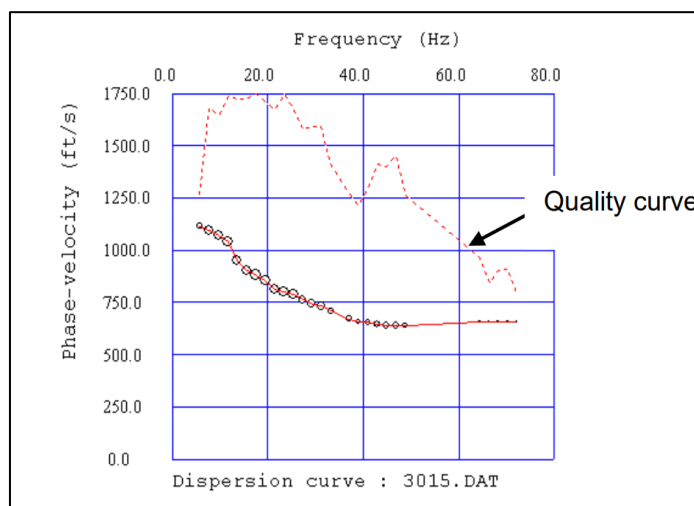


Figura 17. Curva de dispersión
Fuente: (Geometrics, 2009b)

Inversión de la curva de dispersión

Utilizando procesos de inversión interactivos, que precisan datos de dispersión, como el módulo Poisson y densidad. El proceso se puede automatizar creando una aproximación por el método de mínimos cuadrados y obteniendo como resultado los perfiles de velocidad de onda de corte Vs. Es necesario tener un modelo inicial para poder iniciar el proceso de inversión. La velocidad de las ondas Rayleigh y la curva de dispersión, así como el espectro de potencia o distribución de energía, son los datos clave para el cálculo de la curva de dispersión.

El ensayo de refracción sísmica y el análisis de ondas superficiales en arreglo multicanal (MASW) son métodos geofísicos que permiten determinar la estratigrafía del subsuelo a través de la medición de las propiedades dinámicas de los materiales que lo conforman. En el caso del ensayo de refracción sísmica, se miden los tiempos de viaje de las ondas P, de compresión generadas por una fuente de energía impulsiva, mientras que el método MASW se basa en la interpretación de las ondas superficiales de un registro en arreglo multicanal. Este último permite obtener perfiles de ondas S hasta profundidades promedio de 25 m a 30 m (Rivera et al., 2016).

Ambas técnicas son útiles para la caracterización geofísica del subsuelo, además se utilizan en diferentes aplicaciones como la exploración de hidrocarburos, la evaluación de riesgos geotécnicos.

1.1.12. Marco legal

El Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda es el ente rector de la política nacional de hábitat y vivienda, responsable de desarrollar normas que promuevan el desarrollo ordenado y seguro de los Asentamientos Humanos, la densificación urbana y el acceso a una vivienda digna. Como parte de esto y teniendo en cuenta que nuestro país se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico. El Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda han actualizado las normas técnicas para la seguridad de las estructuras de edificación (Código de Construcción de Ecuador 2001). La norma de Construcción Ecuatoriana está diseñada para responder a las necesidades públicas de mejorar la calidad y seguridad de los edificios para proteger a los residentes y promover el desarrollo urbano sostenible (NEC, 2014).

Según la norma NEC (2014), para el análisis de la onda V_p se utiliza la norma internacional ASTM D5777-00 (2011), titulada "Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation" (Guía normalizada para el uso del método de refracción sísmica para la investigación del subsuelo). Además, para el análisis de la onda de corte V_s se emplea la Norma Ecuatoriana NEC - DS - 2014 "Peligro sísmico diseño sismo resistente".

1.2. Planteamiento del Problema

A principios de febrero de 2020, se reportó la desaparición de la Cascada de San Rafael, lo que provocó una rápida erosión regresiva (Reyes et al., 2021). Como consecuencia, se produjo el derrame de petróleo y la suspensión del sistema de oleoducto. La ocurrencia de estos dos eventos afectó el patrón de flujo del río Coca en el área donde se deposita la antigua avalancha del volcán Reventador y por lo tanto se erosiona fácilmente. Además, es importante mencionar que estos eventos han afectado de forma directa a las poblaciones cercanas al Río Coca, como son: San Rafael, San Luis y San Carlos (Figura 48), dejando grandes pérdidas económicas que tienen que ver con el colapso de viviendas, vías, puentes y tierras, también poniendo en peligro la vida de las personas que habitan en dichas poblaciones debido a que la erosión ha creado zonas inestables (SGR, 2023).

Ante esta situación, en estudio se desarrolló un modelo de velocidad de ondas V_p y V_s mediante el uso de los métodos de tomografía de refracción sísmica y MASW. Estos modelos proporcionaron información detallada sobre las características del subsuelo, permitiendo una mejor comprensión de la naturaleza de las zonas inestables.

1.3. Justificación de la investigación

La erosión regresiva del río Coca ha generado gran preocupación debido a los desafíos geotécnicos que representa para la infraestructura y para la seguridad de las poblaciones aledañas (SGR, 2023). El conocimiento detallado de los materiales geológicos que comprende el subsuelo es fundamental para evaluar y mitigar los riesgos asociados a deslizamientos de tierras. Por lo cual el presente estudio llena esa brecha de conocimiento al proporcionar perfiles detallados de las velocidades de ondas sísmicas V_p y V_s en diferentes profundidades del subsuelo por medio del método de refracción sísmica y MASW. Ambos métodos permiten determinar indirectamente la

estratigrafía del subsuelo, a partir de las velocidades generadas por las ondas de compresión (V_p) y de corte (V_s), generadas por la fuente de energía del pulso a puntos ubicados a ciertas distancias a lo largo del eje en la superficie terrestre (Rivera et al., 2016).

1.4. Objetivos de la investigación (desarrollar generales y específicos)

1.4.1. General

Generar un modelo de velocidad de ondas V_p y V_s , en los poblados de San Luis y San Carlos a partir de los métodos de refracción sísmica y MASW.

1.4.2. Específicos

- Obtener un modelo de velocidad de ondas V_p y V_s de la estructura del subsuelo para determinar la estratigrafía de la zona mediante la interpretación de las tomografías y modelos 2D.
- Comparar los modelos de velocidades de ondas sísmicas de los poblados de San Luis y San Carlos.
- Analizar los estudios geofísicos y geotécnicos realizados por La Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) para la sustentación de la estratigrafía de la zona de estudio.

CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO

1.1. Descripción del área de estudio

1.1.1. Ubicación geográfica del área de estudio

Este estudio se llevará a cabo en la provincia de Napo, cantón El Chaco, parroquia Gonzalo Díaz de Pineda, poblaciones de San Luis y San Carlos. Véase en la **Figura 18**.

MAPA DE UBICACIÓN ZONA DE ESTUDIO

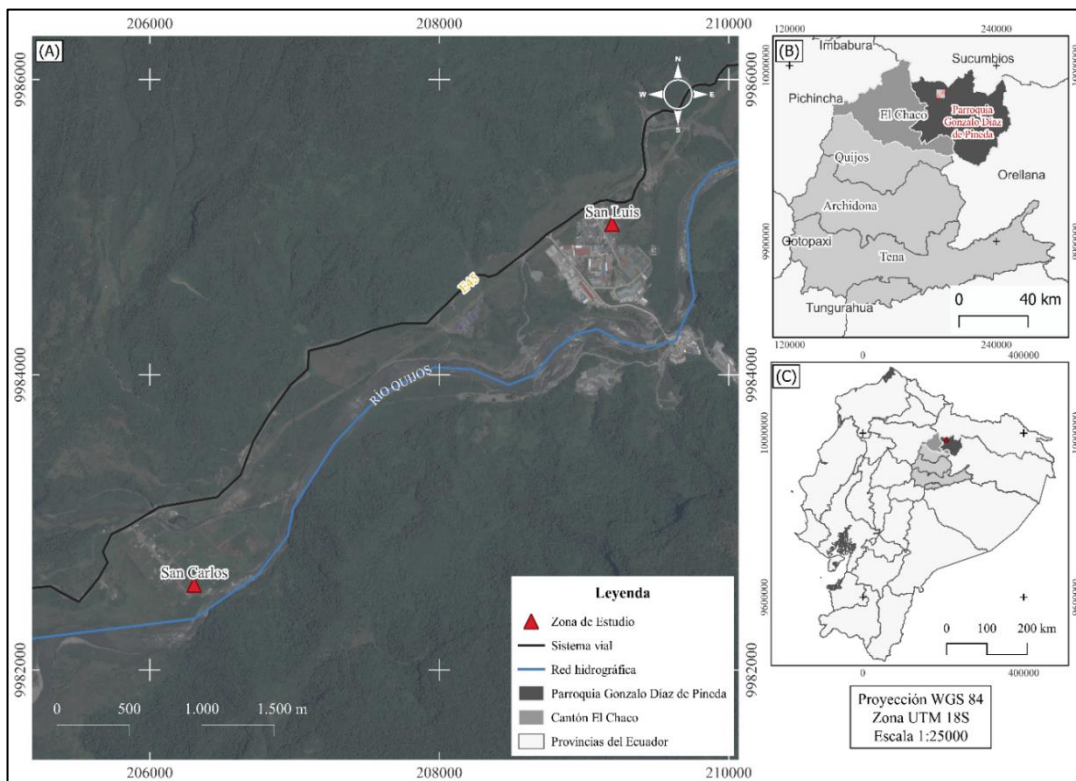


Figura 18. Mapa de localización de la zona de estudio.

Elaborado por: Karina Salcedo

Fuente: Cartografía Satelital de la Zona de Estudio (Google, s.f.); Sistema vial e Hidrográfica (IGM, 2010); División Administrativa del Ecuador (Provincias, cantones y parroquias) (INEC, 2010).

1.2. Descripción de la metodología de investigación

1.2.1. Diseño de la investigación

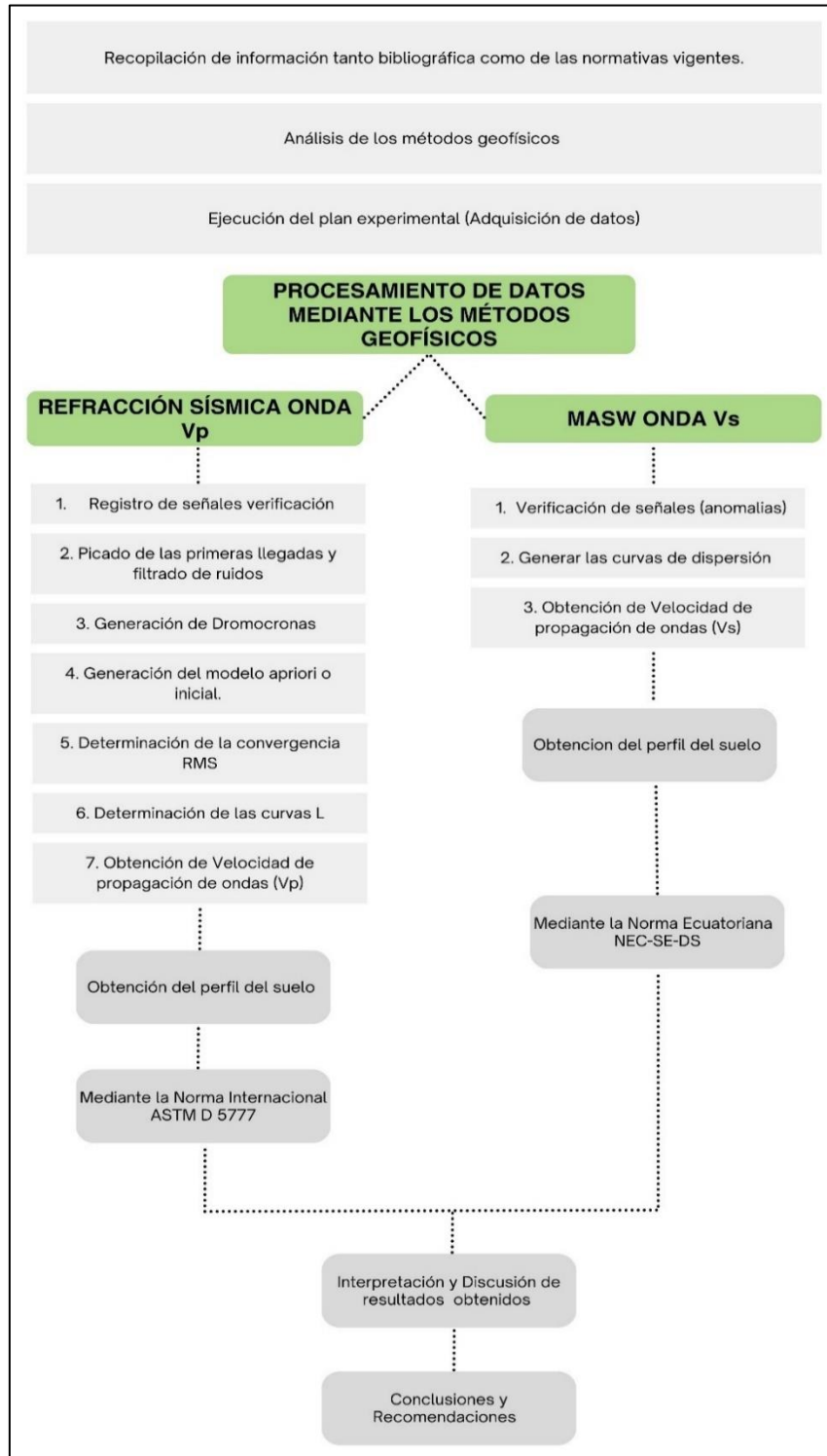


Figura 19. Diseño de la investigación
Realizado por: Karina Salcedo

1.2.2. Herramientas para la obtención de datos

Los instrumentos que se utilizaron durante esta investigación fueron:

- Sismógrafo Geometrics ES-3000.
- Geófonos 4.5 Hz
- Martillo de impacto de 6 kg
- Placa metálica de aluminio de 3 cm de grosor
- Cables sísmicos y de disparo
- Cámara

Software

- Seislmager módulos (Pickwin, Plotrefa, Geoplot, WaveEq)
- Matlab

1.2.3. Adquisición de datos sísmicos

El levantamiento de datos se llevó a cabo en San Luis y San Carlos (Figuras 18, 20) mediante un tendido sísmico de 120 m de longitud, empleando el Equipo Geometrics ES-3000. Se colocaron 24 geófonos a una distancia de 5 m y a 10 cm de profundidad asegurando su fijación estática, los cuales están conectados por un cable de transmisión. La estimulación se realizó con un martillo sobre una placa de acero a 2.5 m de distancia de cada punto. Para el estudio por el método de Refracción Sísmica se denominó a San Carlos y San Luis como línea "AB" y línea "CD" respectivamente. Mientras que, por el método de Masw se denominó a San Carlos como línea "EF" y San Luis como línea "GH", para ambos métodos con una orientación de SO-NE. En la Figura 21 y 22 se puede observar el arreglo sísmico que se llevó a cabo.



Figura 20. Ubicación de las líneas sísmicas San Carlos y San Luis
Realizado por: Karina Salcedo

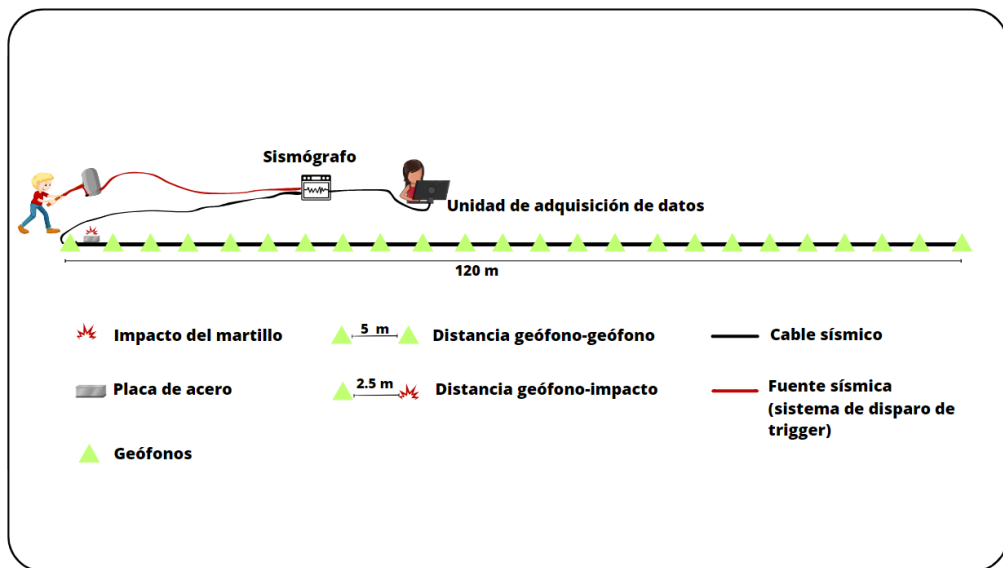


Figura 21. Arreglo sísmico en la investigación.
Realizado por: Karina Salcedo



Figura 22. Obtención de señales sísmicas
Elaborado por: Karina Salcedo

1.3. Procesamiento de datos

1.3.1. Metodología por tomografía de refracción sísmica

Se realizó el filtrado y la corrección de datos obtenidos in-situ por el sismógrafo y el procesamiento se ejecutó mediante el software Seislmager, utilizando los módulos Pickwin, Plotrefa, WaveEp y Geoplot. Para la curva L y el RMS se trabajó con el software de Matlab.

- Se realizaron los cálculos de elevación empleando la ecuación 2, mientras que la variación de alturas se determinó a partir de la ecuación 3.

Estos resultados se guardaron en un archivo tipo texto donde las distancias entre los geófonos son coordenadas X y los valores resultantes son coordenadas Y, para después adjuntarlo al modelo a_priori

$$\tan^{-1} = \frac{\text{cateto opuesto } (x)}{\text{cateto adyacente } (y)} \quad (2)$$

$$n - 5 \sin \theta \quad (3)$$

Cálculo de la elevación de la línea sísmica San Luis

$$\tan^{-1} \frac{y}{x} = \tan^{-1} \frac{1}{60} = 0.95$$

Fórmula para determinar elevación en cada punto

$$n - 5 \sin \theta$$

$$n = 60$$

$$55 \sin 0.95 = 0.91$$

Cálculo de la elevación línea sísmica San Carlos

$$\tan^{-1} \frac{y}{x} = \tan^{-1} \frac{0.80}{115} = 0.39$$

Fórmula para determinar elevación en cada punto

$$n - 5 \sin \theta$$

$$n = 115$$

$$110 \sin 0.39 = 0.74$$

- Posteriormente, con el módulo Pickwin se visualizó las primeras llegadas de las señales obtenidas por el sismógrafo y se realizó el filtrado de ruidos de alta y baja frecuencia. Además, se realizó el picado de manera manual, colocando el mouse en la ubicación deseada hasta asignar correctamente los trazos a cada una de las señales para así obtener las curvas denominadas dromocronas (Figura 23).
- Luego, con el módulo Plotrefa, se generó el gráfico de las dromocronas y se verificó que no exista ningún cruce entre ellas, para esto se utilizó color traveltime curves, después se obtuvo el modelo a_priori y se cargó los datos de elevación. Para determinar los parámetros del modelo a_priori se inició con los parámetros por defecto del programa y se realizó la inversión de parámetros aleatorios para encontrar las velocidades máximas y mínimas. Una vez generado el modelo a_priori se efectuó las pruebas de inversión de tomografía, minimizando el error RMS entre lo observado y los tiempos de viaje calculados. La parametrización consistió en mantener constante el suavizado horizontal y variando el suavizado vertical con 50 iteraciones y 8 nodos. Las iteraciones ayudaron a mejorar la calidad de la de tomografía mientras que, el número de nodos definieron la densidad de los rayos para determinar el modelo óptimo.

Seguidamente, a partir del trazo de rayos y el RMS se determinó la profundidad, las velocidades máximas y mínimas (Figura 24).

- A continuación, con el programa de Matlab se corroboró el modelo de tomografía final óptimo, donde, mediante cálculo matricial se realizó la conversión de datos y se generó el gráfico de convergencia y la regularización de la curva L haciendo referencia a la prueba estadística (Figura 25 y 26).
- Los datos generados por Matlab se procesaron en el módulo Plotrefa y se obtuvo el modelo de tomografía de refracción sísmica, teniendo en cuenta la curva L y la convergencia, suavizados horizontales y verticales a partir del punto de inflexión (Figura 27)
- Finalmente, con Geoplot se visualizó los perfiles sísmicos y se procedió ajustar los parámetros para cada línea sísmica para tener una buena visualización (Figura 27).

1.3.2. Metodología con el método Surface Wave Analysis Wizard (MASW)

- Se cargó los datos con el módulo Surface Wave Analysis Wizard y automáticamente se abrió en el módulo Pickwin con las señales, mismas que se mantienen con la configuración de la onda p. Se siguió el proceso predispuesto por el manual geometrics y se verificó que todas las señales estén en orden y no existan anomalías (Figura 28).
- Después, se efectuó el cálculo de la velocidad de fase (ecuación 5 y 6), los cálculos se obtuvieron a partir de la velocidad máxima del modelo V_p y se obtuvo un valor similar por lo que se redondeó la velocidad a 600 Hz para San Luis y 700 Hz para San Carlos. El valor predeterminado de fin de frecuencia se adaptó a la mayoría de los casos.

$$V_S = \frac{V_p}{1.74} \quad (5)$$

$$C = V_S * 0.92 \quad (6)$$

Velocidad de fase de onda superficial Rayleigh San Luis

$$V_s = \frac{V_p}{1.74}$$

$$V_s = \frac{1.10}{1.74} = 0.63$$

Velocidad de fase referencial

$$C = V_s * 0.92$$

$$C = 0.63 * 0.92 = 0.57$$

$$0.57 \frac{km}{s} * \frac{1000m}{km} = 570 \frac{m}{s}$$

Velocidad de fase de onda superficial Rayleigh San Carlos

$$V_s = \frac{V_p}{1.74}$$

$$V_s = \frac{1.30}{1.74} = 0.74$$

Velocidad de fase referencial

$$C = V_s * 0.92$$

$$C = 0.74 * 0.92 = 0.68$$

$$0.68 \frac{km}{s} * \frac{1000m}{km} = 680 \frac{m}{s}$$

- A continuación, se ingresó los resultados de los cálculos y se procedió a generar las curvas de dispersión de las ondas superficiales registradas mismas que son analizadas para obtener información sobre la velocidad de las ondas en función de la frecuencia (Figura 29).
- Una vez obtenida la curva de dispersión se realizó el corte, filtrados individuales, filtros automáticos y suavizados para cada curva (Figura 30).
- En la inversión y el modelado, se generaron 50 iteraciones y se ingresaron los datos de elevación de onda (V_p), una vez ejecutada la inversión se obtiene el modelo de velocidad inicial V_s (Figura 30 y 31).
- Finalmente, se realizó la visualización de resultados en geoplot donde se configuran los parámetros para una buena visualización de los perfiles.

Para San Luis y San Carlos se realizó el mismo procedimiento, lo único que varía son las señales con las que se trabaja, los datos de elevación y cálculos de velocidad de fase.

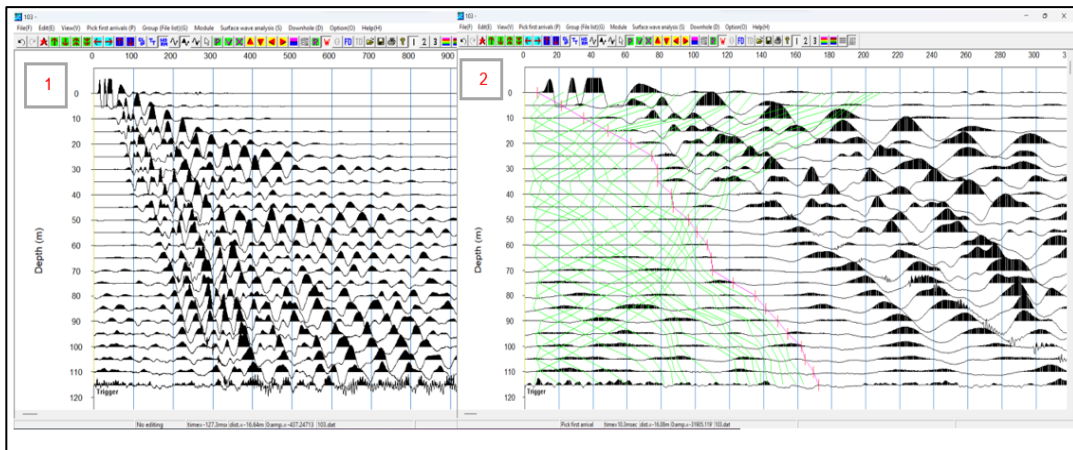


Figura 23. Módulo Pickwin – Línea Sísmica de San Luis

En la figura 23, sección 1, se muestra las señales limpias para ser procesadas, mientras que en la sección 2, se realizó el picado manual de cada una de las señales.

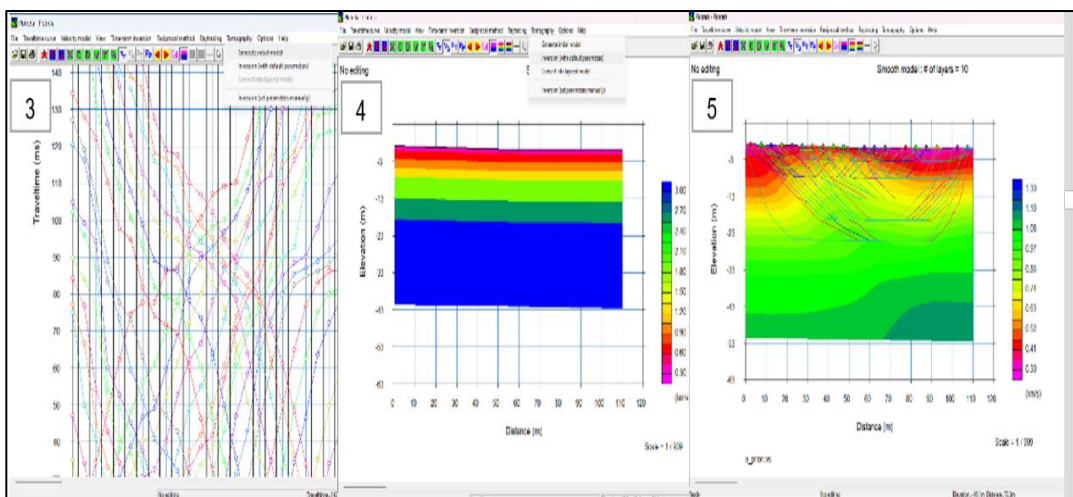


Figura 24. Módulo Plotrefa – Línea Sísmica de San Luis

En la figura 24 se observa: en la sección 3 la generación de dromocronas de San Luis, en la sección 4 el modelo a priori y en la sección 5 el trazado de rayos que permitió determinar la profundidad.

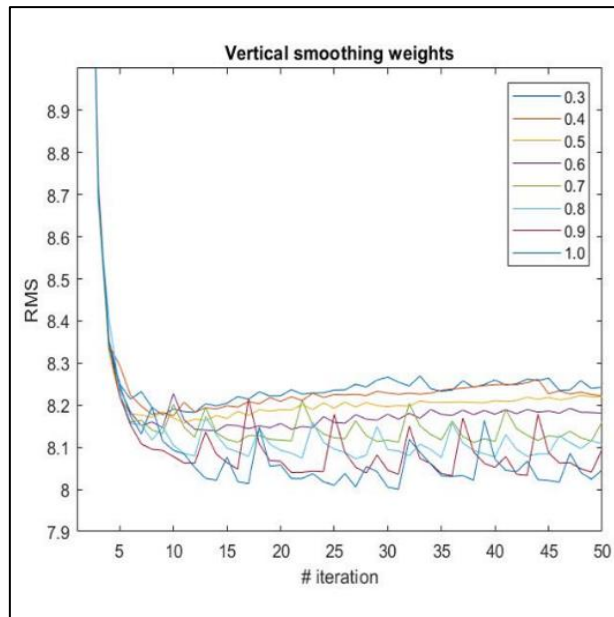


Figura 25. Software de Matlab-Convergencia - San Luis

A través de comandos, se estableció el modelo de tomografía más adecuado y se llevó a cabo la conversión grafica de datos mediante el cálculo del RMS (Figura 25). En esta sección, se puede apreciar el resultado más óptimo obtenido después de ocho iteraciones de convergencia.

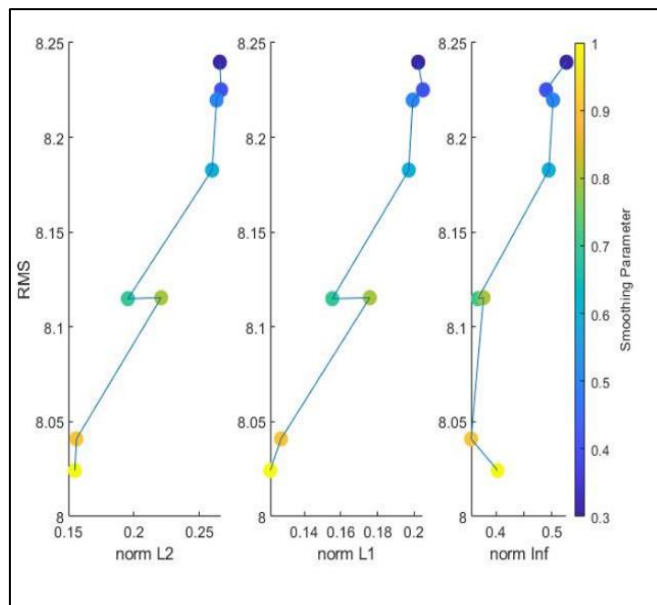


Figura 26. Software de Matlab- Curva L - San Luis

Uno de los 8 resultados de la carpeta de datos de la curva L se observa en la figura 26, donde, muestra los puntos de inflexión que ayudan a establecer el modelo adecuado para la tomografía de refracción sísmica.

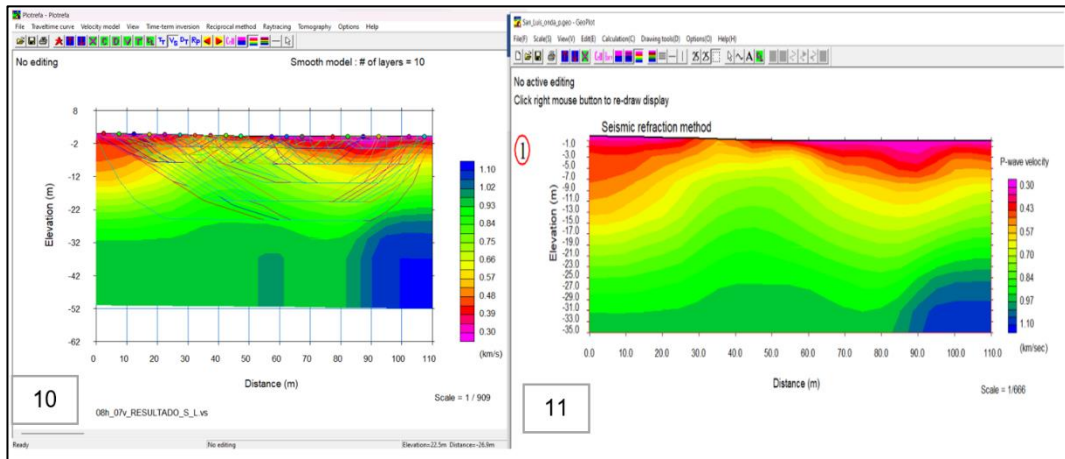


Figura 27. Modelo Final- San Luis

En la figura 27, sección 10, se generó el modelo de tomografía de refracción sísmica, considerando tanto la curva L como la convergencia RMS de suavizado mientras que en la sección 11, se muestra la imagen de tomografía sísmica de refracción de onda Vp para San Luis.

MÉTODO MASW O Vs (SAN LUIS)

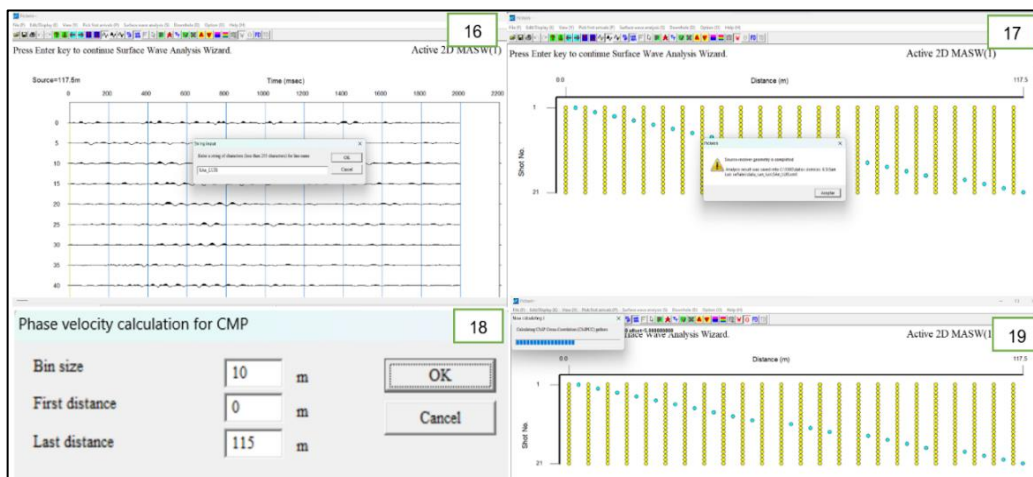


Figura 28. MASW- Procesamiento – San Luis

La figura 28 sección 16 y 17, se aprecia las señales en orden, mientras que en la sección 18, se evidencian los valores por defecto que da el programa y en la sección 19 se observa como el programa genera los rangos de velocidad de fase.

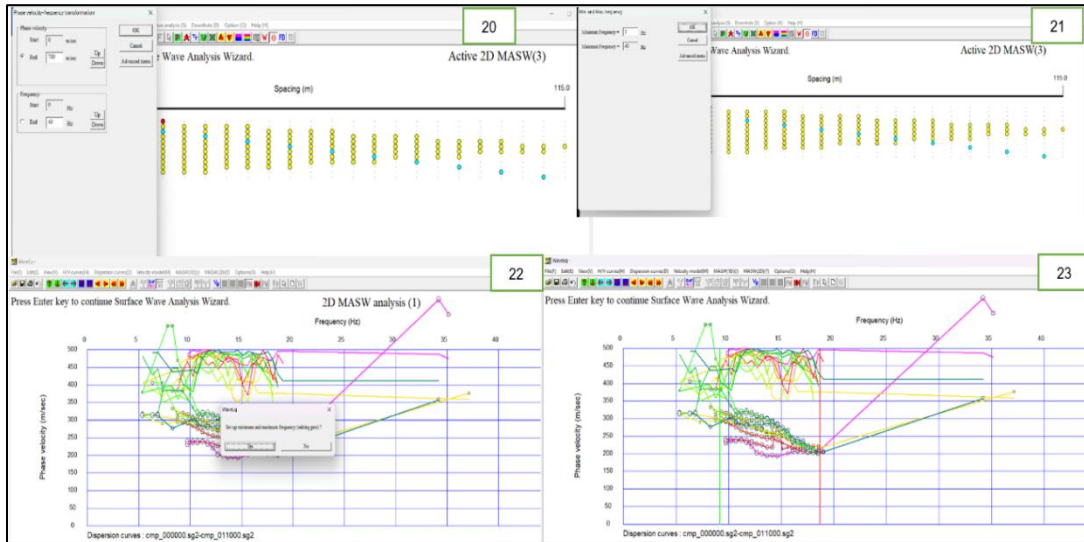


Figura 29. Proceso para obtener las curvas de dispersión – San Luis

En la figura 29 sección 20, se ingresó de los resultados del cálculo de velocidad de fase referencial y en la frecuencia se mantuvieron los parámetros predeterminados del programa (Minimun Frequency 5 Hz y Maximun Frequency 40 Hz), en la sección 21, se presentan los parámetros para seleccionar las amplitudes máximas, que determinan la curva de dispersión en el gráfico de velocidad de fase- frecuencia y en las secciones 22 y 23, se muestra la curva de dispersión.

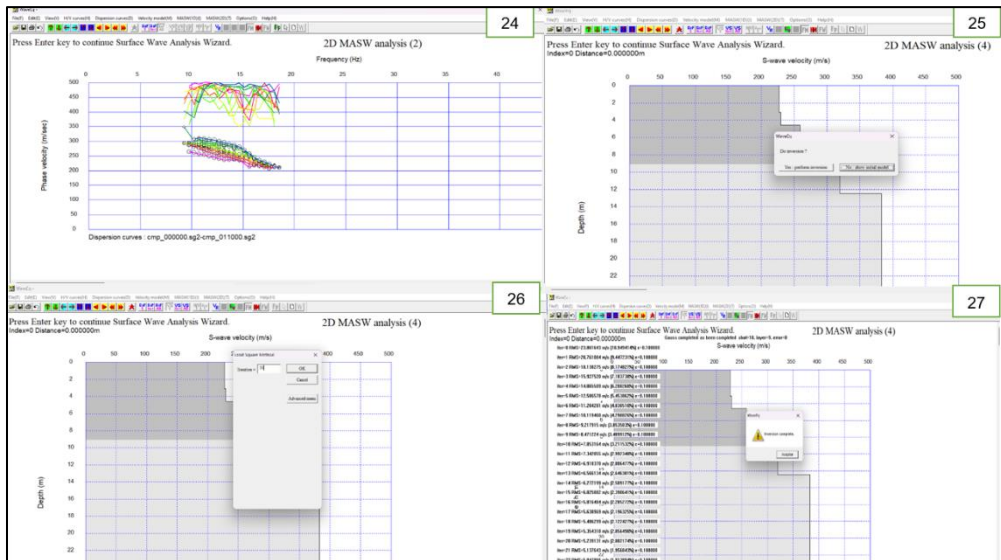


Figura 30. Corte de curva y obtención del modelo inicial – San Luis

La figura 30 en la sección 24, muestra el corte de la curva de dispersión, mientras que, la sección 25, se aprecia el modelo inicial donde se realizó la inversión y modelado. Posteriormente se hizo 50 iteraciones como se ve en la sección 26 y 27 (es importante destacar que a medida que se realizan las iteraciones se reduce el valor del RMS).

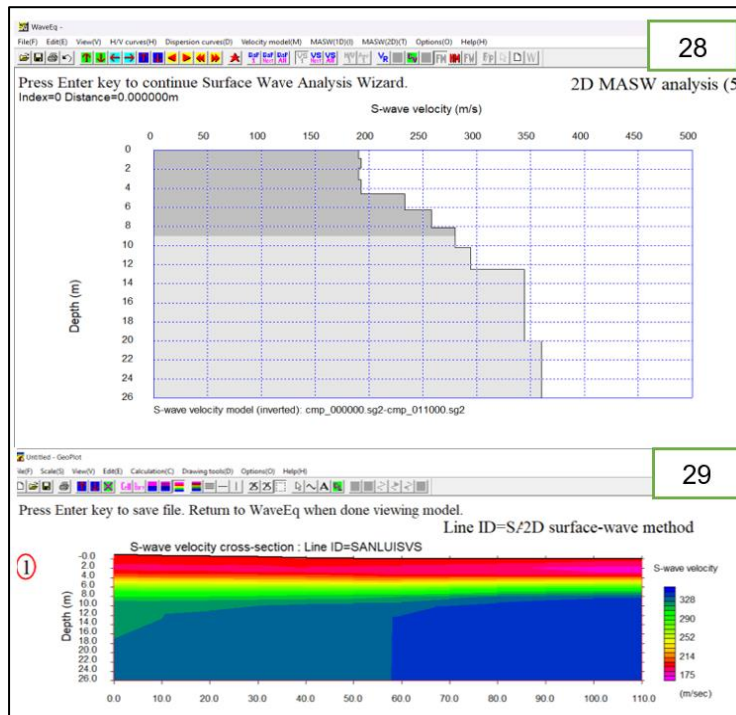


Figura 31. Perfil de velocidad MASW

La figura 31 sección 28, se presenta el modelo inicial (V_s) y en la sección 29, se muestra la tomografía final de la onda V_s .

CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS

2.1. Tomografía de refracción sísmica Onda Vp San Carlos (AB) San Luis (CD)

Tabla 1. Parámetros utilizados para el modelo a priori de refracción sísmica.

Línea	Profundidad desde la superficie hasta la capa más baja (m)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
San Carlos	35	303	1039
San Luis	35	300	1105

Realizado por: Karina Salcedo

2.1.1. Dromocronas San Carlos (AB), San Luis (CD)

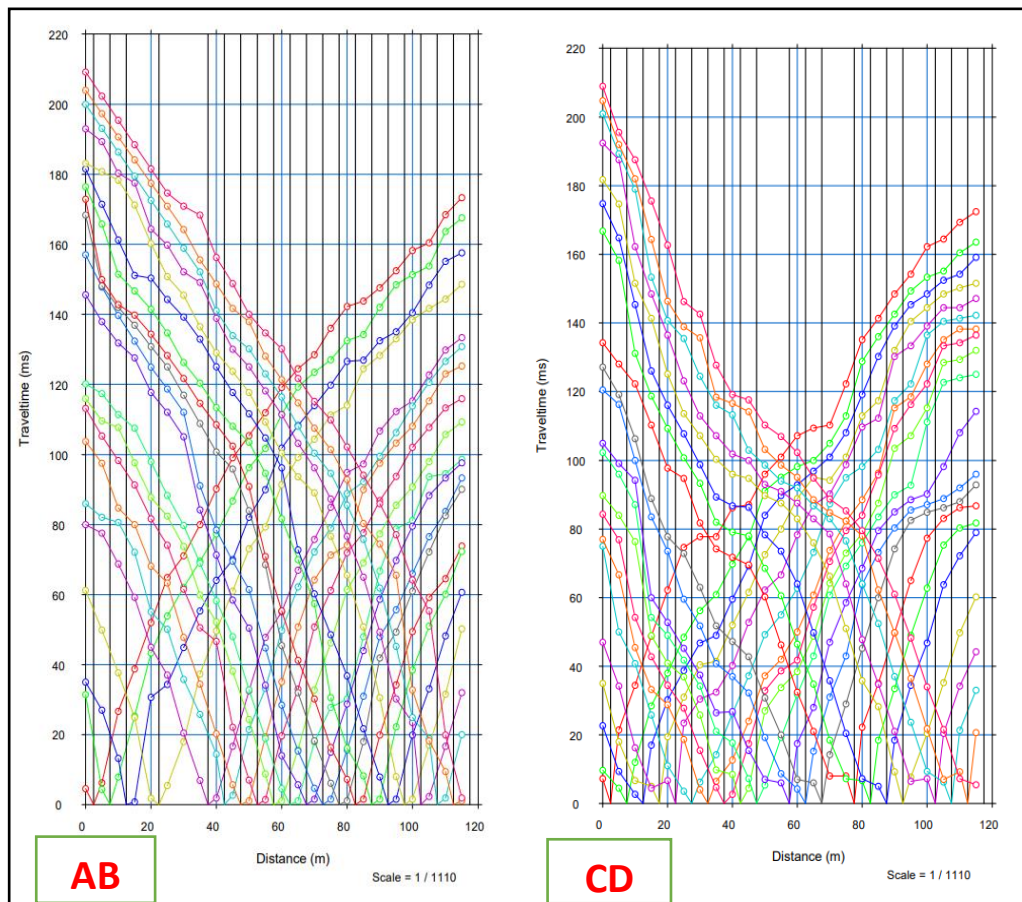


Figura 32. Gráfico de dromocronas (Curvas de tiempo vs Distancia)
Realizado por: Karina Salcedo

Las dromocronas, de la figura 32 representan los tiempos de llegada de las ondas sísmicas en función de la distancia, proporcionando información crítica sobre las propiedades del subsuelo, como la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, identificar capas y la estructura del subsuelo. Cada dromocrona representa un golpe.

2.1.2. Modelos a priori San Carlos (AB), San Luis (CD)

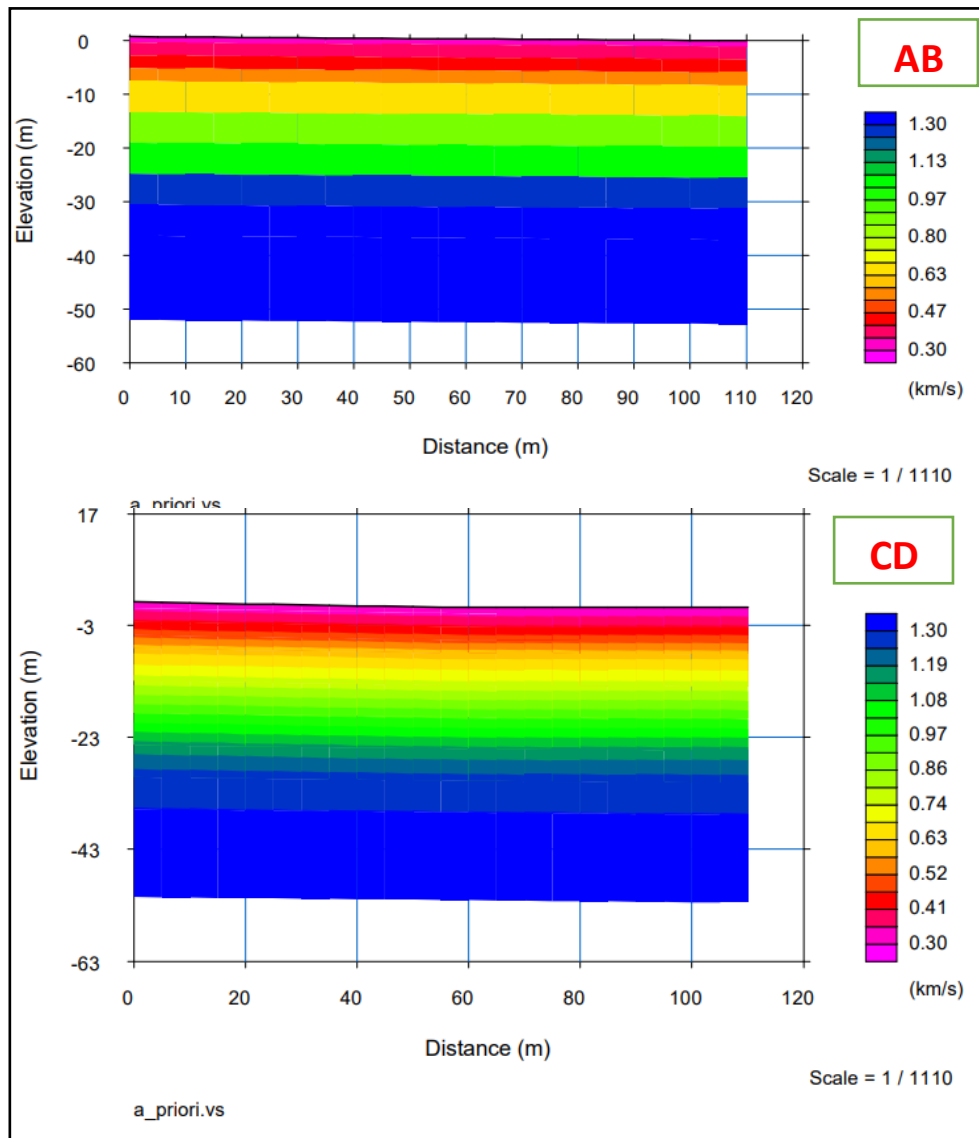


Figura 33. Modelo a priori generado para las líneas sísmicas AB y CD.
Realizado por: Karina Salcedo

El modelo a priori o inicial (Figura 33), representa las propiedades geofísicas en el subsuelo proporcionando una representación inicial de las características geológicas del área de estudio, incluyendo estimación de velocidades de la propagación de ondas

sísmicas así la elevación y distancia. Para obtener un modelo óptimo se realizó varias pruebas numéricas dentro del programa plotrefa. Para AB, se obtuvo un (RMSE)= 7.48 ms y para CD se obtuvo un (RMSE)= 8.12 ms

2.1.3. Gráficos de Convergencia RMS San Carlos (AB), San Luis (CD)

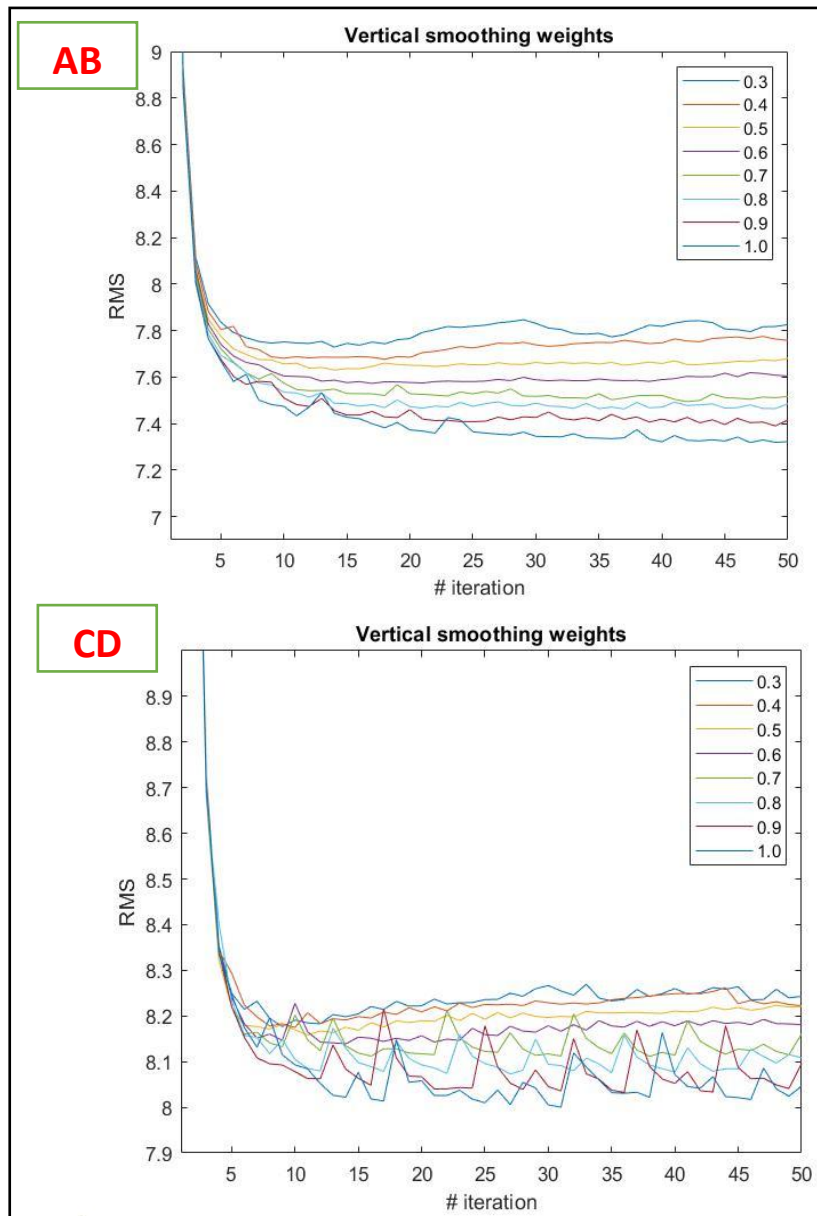


Figura 34. Gráfico de convergencia para el RMS, de las líneas AB y CD.
Realizado por: Karina Salcedo

El grafico de convergencia (RMS) de la figura 34, comprende de un suavizado horizontal de 1 y vertical de 0.3 a 1.0 respectivamente para cada línea y con 50 iteraciones realizadas para obtener el modelo óptimo.

2.1.4. Gráficos curva L RMS San Carlos (AB), San Luis (CD)

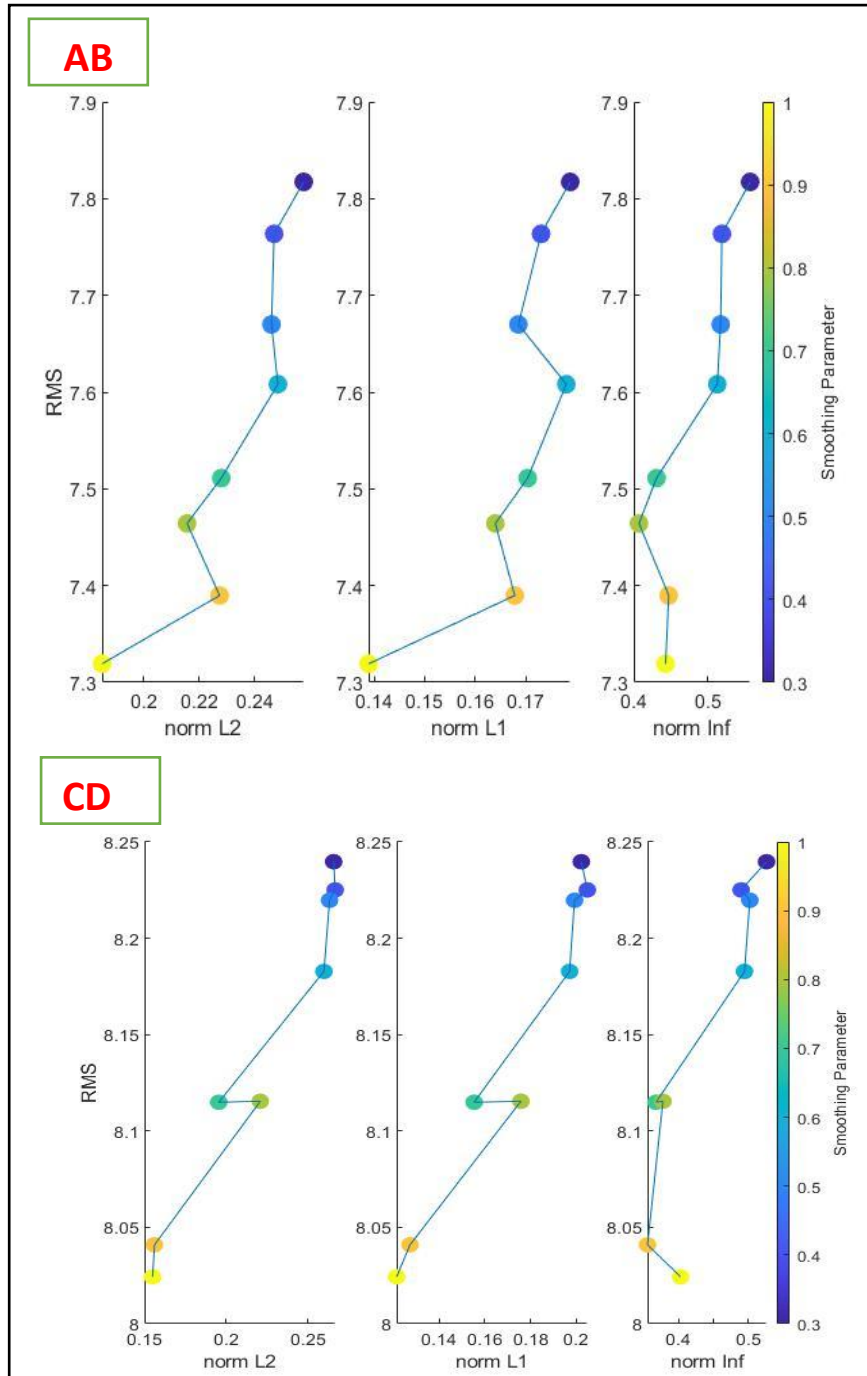


Figura 35. Curva L para la línea de AB y CD
Realizado por: Karina Salcedo

En los gráficos de la curva L (Figura 35), en el eje vertical se aprecia el error RMS y en el eje horizontal las normas L2, L1 e Infinito, estas normas ajustan el modelo óptimo de velocidades de los datos observados en la refracción sísmica. Cabe recalcar que está inferido por los parámetros de suavizado vertical indicados por el punto de inflexión para AB en (0.8) y para CD en (0.7). Esto se realiza mediante el criterio de Hansen.

2.1.5. Perfiles de velocidad Onda Vp San Carlos (AB), San Luis (CD)

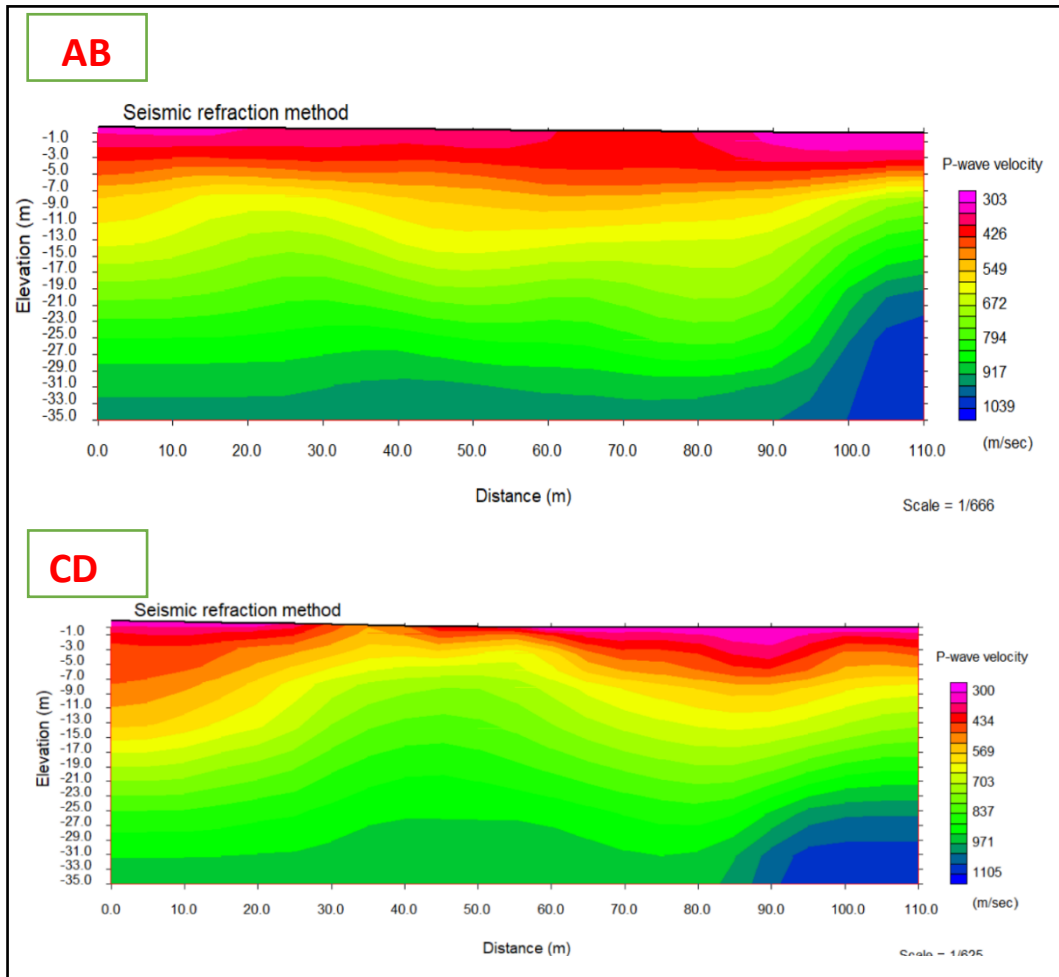


Figura 36. Resultado final de la tomografía sísmica de refracción Onda Vp de AB y CD.
Realizado por: Karina Salcedo

En los modelos finales mostrados en la figura 36, se puede apreciar que existen 3 unidades sismoestratigráficas, mismas que muestran la elevación, distancia y la velocidad de la Onda Vp (m/s).

2.2. Método Surface Wave Analysis Wizard (MASW) Onda Vs San Carlos (EF), San Luis (GH)

2.2.1. Curvas de Dispersión San Carlos (EF), San Luis (GH)

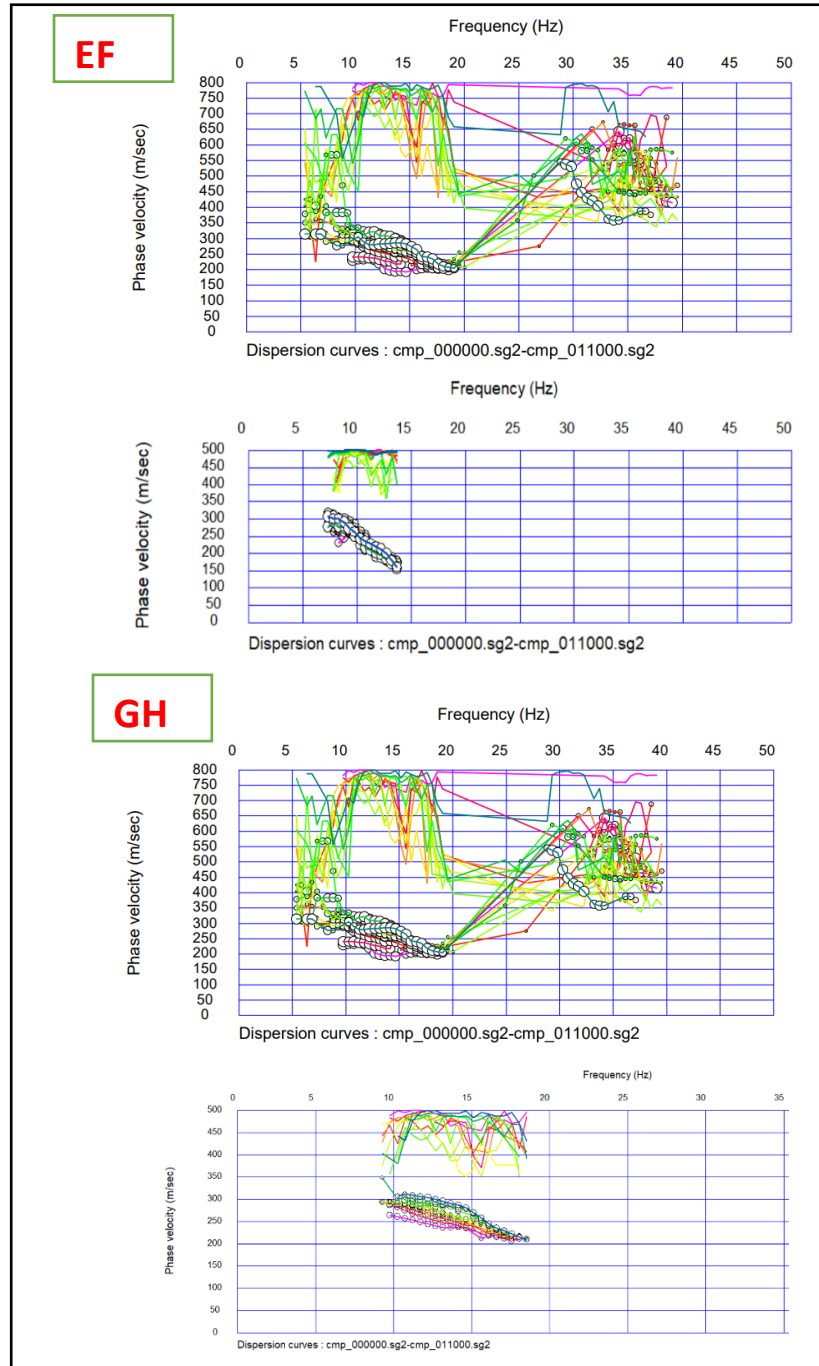


Figura 37. Curva de dispersión (con corte, filtrados individuales y filtrados automáticos)
Realizado por: Karina Salcedo

2.2.2. Perfiles de velocidad 1D San Carlos (EF), San Luis (GH)

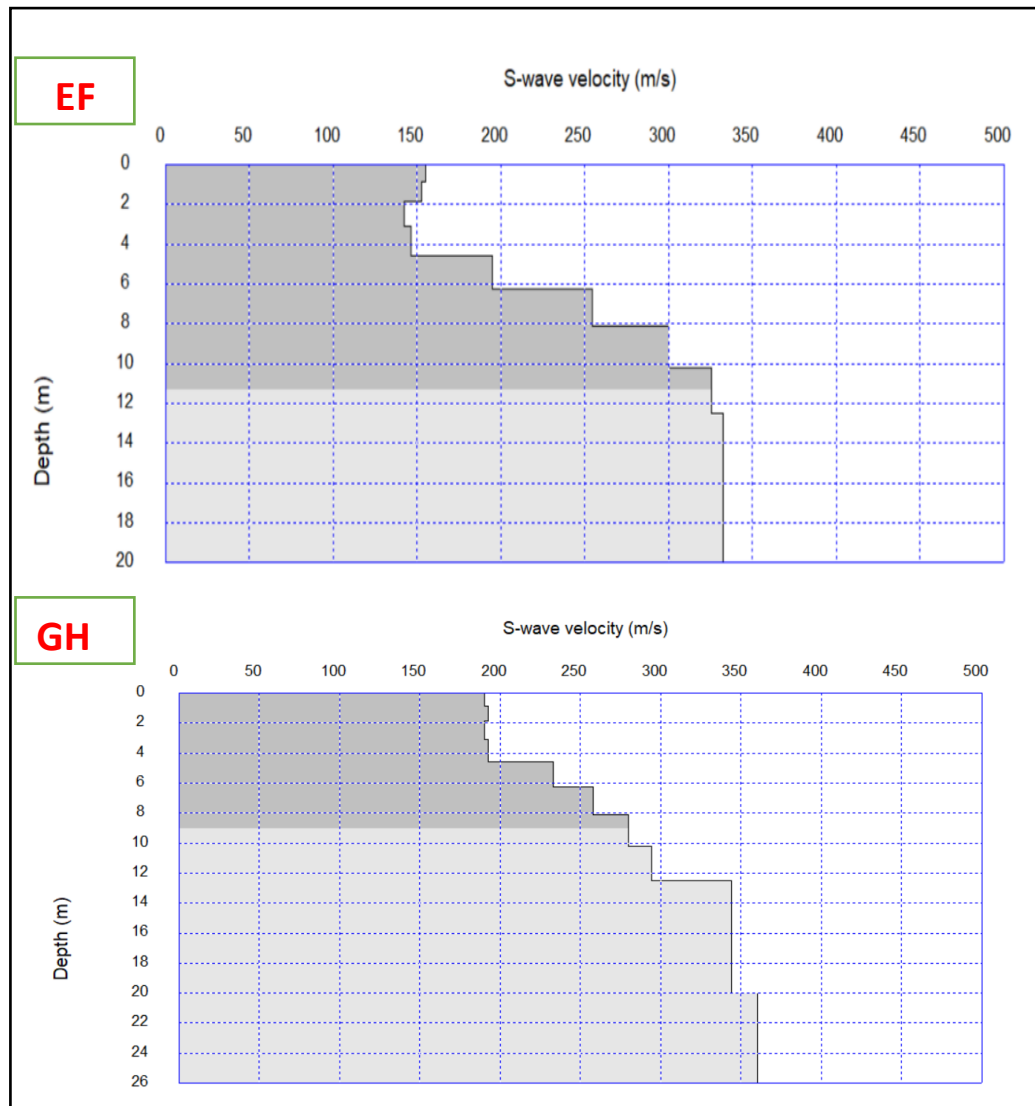


Figura 38. Perfiles de velocidad Vs.
Realizado por: Karina Salcedo

2.2.3. Perfiles de velocidad 2D de Onda Vs San Carlos (EF), San Luis (GH)

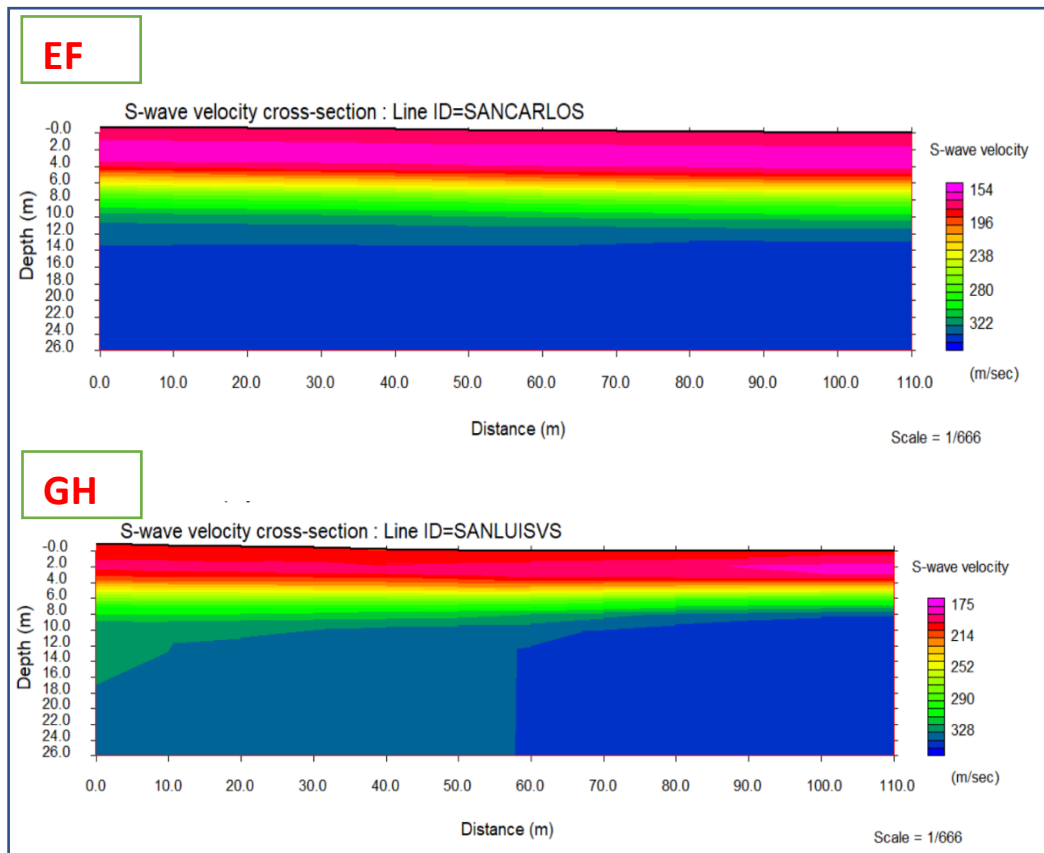


Figura 39. Resultado final en 2D de la velocidad de onda de corte Vs San Carlos y San Luis
Realizado por: Karina Salcedo

CAPÍTULO IV: INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

2.3. Interpretación

2.3.1. *Perfiles de velocidad onda Vp San Carlos (AB), San Luis (CD)*

En ambas líneas sísmicas AB y CD, de perfiles de velocidad de Onda Vp se puede constatar tres unidades sismoestratigráficas (**Figura 40**) que a continuación se describen:

- La unidad 1 (AB) es la más superficial, ubicada entre los 0 y 4 metros de profundidad, con velocidades sísmicas que van aproximadamente de 303 a 467 m/s. Es importante notar que el espesor varía en el tramo de 0 a 55 metros, mostrando un adelgazamiento. De los 60 a 90 m, se mantiene constante, mientras que de los 90 a 110 metros vuelve a disminuir el espesor de la capa, en general, no se aprecia una deformación considerable.
- La unidad 2 (AB) se encuentra entre los 4 y 28 metros de profundidad, con velocidades sísmicas aproximadas de 549 a 876 m/s. Tiene un espesor casi constante de 24 metros, pero muestra una disminución considerable en dirección NE, desde los 95 hasta los 110 metros de distancia, donde presenta una deformación.
- La unidad 3 (AB) está ubicada entre los 28 y los 35 metros de profundidad, con velocidades sísmicas de aproximadamente 958 a 1039 m/s que varían desde la parte central. El espesor de esta unidad es de 7 m, el cual se mantiene constante de los 0 a 20 metros de distancia, pero en dirección NE, varía, llegando a tener un espesor de 9 a 20 m en el tramo de 95 a 110 m de distancia. Esta unidad presenta una geometría que afecta considerablemente a la unidad 2.
- La unidad 1 (CD) se encuentra entre los 0 y 3 metros de profundidad, con velocidades de onda de 300 a 479 m/s. Es importante destacar que esta unidad presenta un adelgazamiento considerable desde los 20 hasta los 70 metros de distancia, en dirección NE.

- La unidad 2 (CD) tiene velocidades de 569 a 927 m/s y muestra cierta deformación en el estrato. Se extiende desde los 3 hasta los 31 metros de profundidad, y su espesor es de 28 metros, pero varía de los 20 a los 110 metros, manteniéndose constante de los 0 a los 20 metros.
- La unidad 3 (CD) se encuentra a partir de los 31 hasta los 35 metros de profundidad, con una velocidad de 1016 a 1105 m/s. Esta unidad presenta algún tipo de geometría que puede estar asociada a alguna falla que afecta a la unidad 2. Su espesor es de 4 m, pero varía considerablemente a lo largo de su tramo en dirección NE.

A continuación, se muestran los modelos de velocidad Vp para San Carlos y San Luis

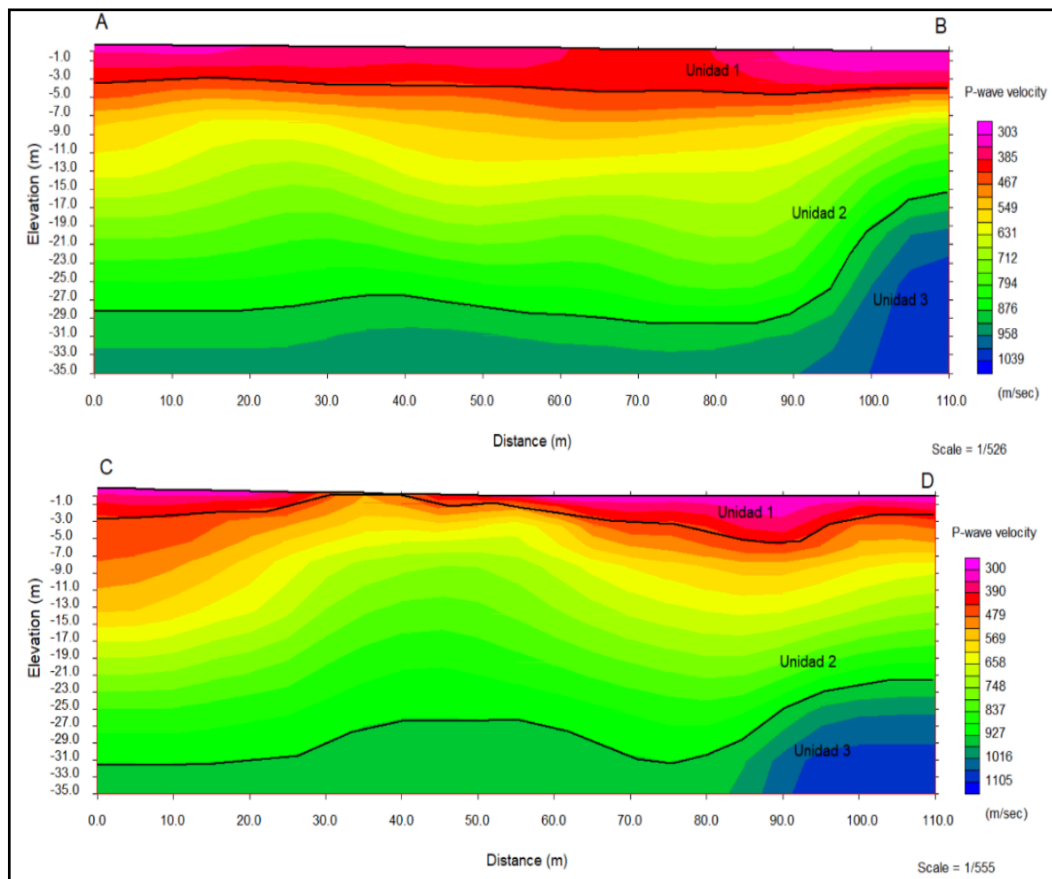


Figura 40. Perfil de velocidades de onda Vp de San Carlos (AB) y San Luis (CD) con sus respectivas unidades.

Realizado por: Karina Salcedo

2.3.2. Perfiles de velocidad onda Vs San Carlos (EF), San Luis (GH)

Para el caso de los perfiles de velocidad de ondas Vs, se toma en cuenta tres unidades sismoestratigráficas para EF y GH (**Figura 41**) que se detallan a continuación:

- La unidad 1 (EF) se encuentra de 0 a 5 metros de profundidad, con velocidades de 154 a 196 m/s. Su espesor se mantiene constante a lo largo de la línea sísmica SO-NE, se considera una unidad plana debido a la ausencia de deformidades.
- La unidad 2 (EF) se ubica entre 5 y 14 metros de profundidad, con velocidades sísmicas que van de 239 a 280 m/s. Esta unidad presenta un espesor de 7 metros que varía a partir de los 50 hasta los 110 metros de distancia.
- La unidad 3 (EF) es la más profunda, abarcando desde los 14 hasta los 26 metros de profundidad. Tiene velocidades de 322 m/s, y su espesor es de 12 metros, el cual se mantiene constante de 0 a 80 metros, variando ligeramente después de esta distancia.
- La unidad 1 (GH) se puede apreciar desde la superficie hasta los 4 metros de profundidad, manteniendo velocidades sísmicas que van desde 175 a 214 m/s. Su espesor es casi constante, con algunas variaciones a los 10 metros y a los 80 metros de distancia.
- La unidad 2 (GH) se encuentra entre los 4 y 17 metros de profundidad, con velocidades sísmicas de 252 a 290 m/s. Además, su geometría muestra cambios graduales en la parte SO.
- La unidad 3 (GH) es la más profunda, desde los 17 hasta los 26 metros de profundidad. Experimenta variaciones en su espesor de 9 a 18 m y es importante destacar que esta unidad muestra una deformación que afecta a la unidad 2, posiblemente debido a la compactación del suelo o una falla inclinada.

A continuación, se muestran los modelos de velocidad Vs para San Carlos y San Luis

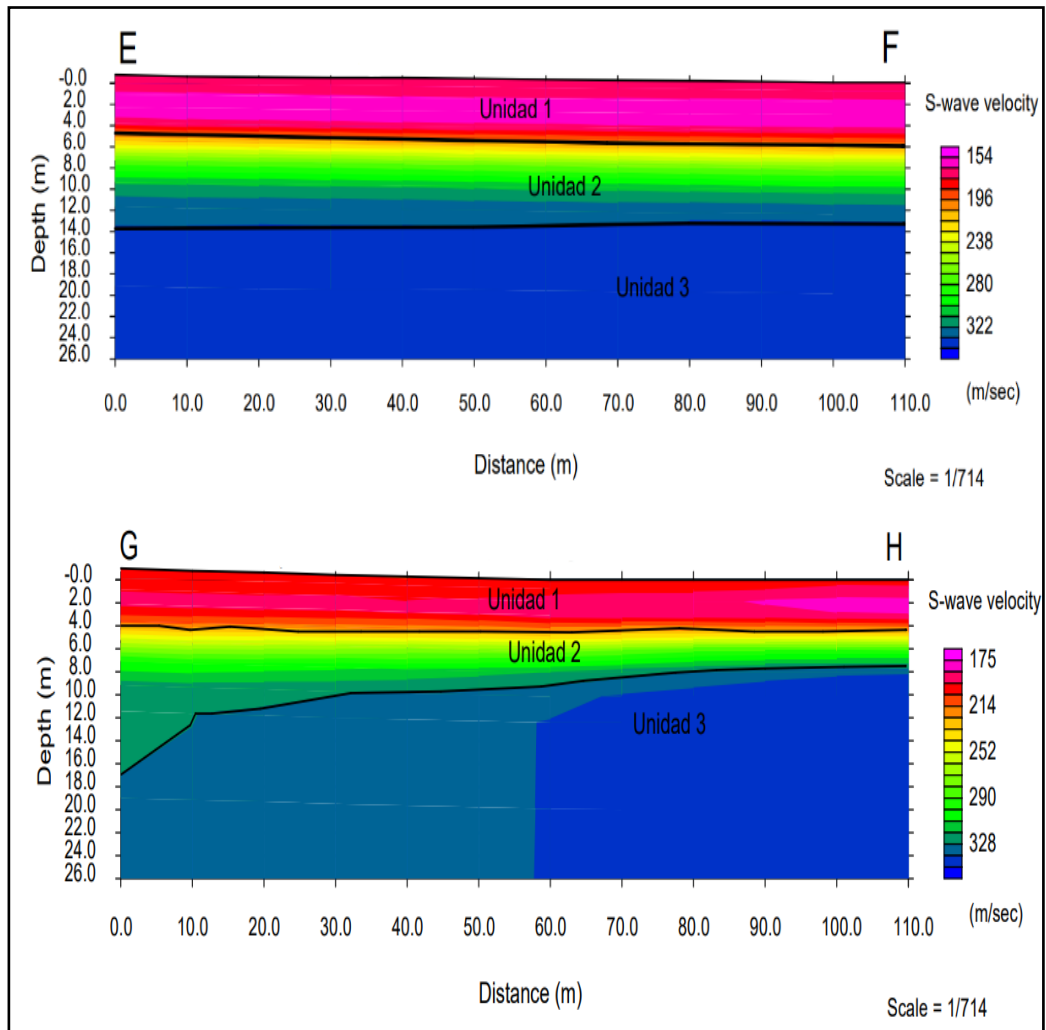


Figura 41. Perfil de velocidades de onda Vs de San Carlos y San Luis con sus respectivas unidades.

Realizado por: Karina Salcedo

2.4. Discusión

Los resultados obtenidos revelan que hay diferentes dominios de velocidades en el subsuelo, y estos dominios muestran cambios graduales entre uno y otro. Para determinar rangos específicos de velocidades y estratigrafía presente en el área de estudio, se utilizaron valores específicos de velocidades de ondas Vp y Vs, tal como se muestra en la tabla 2 y 3.

Los valores de la tabla 2 permiten correlacionar las velocidades de propagación de ondas longitudinales (V_p) (AB y CD) mediante la guía normalizada para el uso del método de refracción sísmica para la investigación del subsuelo ASTM-D5777 y CNA 1993. Para la clasificación de los perfiles de ondas de corte V_s (EF y GH), se aplica la Norma ecuatoriana NEC - DS - 2014 "Peligro sísmico diseño sismo resistente" (tabla 3).

Tabla 2. Clasificación de suelos en base CNA 1993 y ASTM-D5777

CNA, 1993		ASTM-D5777	
Velocidad V_p [m/s]	Descripción	Velocidad V_p [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: (Bernal & Tavera, 2020); (ASTM D5777 - 00, 2011)

Tabla 3. Tipo de perfiles de suelos para el diseño sísmico

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: Adaptado de: (NEC, 2014)

Para realizar el análisis de ripabilidad se hizo uso del criterio de la tabla 4.

Tabla 4. Criterio general de ripabilidad basado en la velocidad de ondas sísmicas

Velocidad sísmica (m/s)	Excavabilidad
< 1.500	Rocas excavables con mototraillas, excavadoras o tractores. No precisan voladura.
1.500-2.000	Ripado fácil. Excavación de estratos sin volar, algo difícil para excavadoras o tractores con riper.
2.000-2.500	Ripado algo costoso. Voladuras ligeras (grandes longitudes de retacado, bajos consumos específicos).
2.500-3.000	Se precisan voladuras ligeras. Prevodaduras.
>3.000	Voladuras importantes (esquemas de perforación cerrados, pequeñas longitudes de retacado, altos consumos específicos).

Fuente: Ingeniería Geológica. (Vallejo, 2002)

En relación, al objetivo general de este estudio se hizo el modelamiento de ondas V_p y V_s , en donde estos resultados fueron evaluados, contrastando la composición geológica del subsuelo a partir de las velocidades y de los estudios previos. En este contexto, el modelo de velocidad de la onda V_p San Carlos (AB) destacó tres unidades sismoestratigráficas, que según la norma ASTM-D5777, la primera unidad está conformada por suelo intemperizado (material desgastado) y según CNA (1993),

clasifica a esta unidad dentro de los suelos arenosos. La segunda unidad pertenece al tipo de suelo de grava o arena seca constituyéndose dentro de los suelos gruesos. La tercera unidad, basada en las velocidades sísmicas, muestra un tipo de suelo de grava o arena seca en dirección a arena saturada, clasificándose como depósitos de talud (Tabla 5).

El modelo de velocidad de San Luis (CD). Según, ASTM-D5777, la unidad 1 está conformada por suelo intemperizado y la CNA (1993), lo describe como suelos arenosos. Seguido de la unidad 2 que su tipo de suelo es de grava o arena seca, clasificado como suelos gruesos. La unidad 3 está compuesto de grava o arena seca/arena saturada, donde se clasifica como depósitos de talud (Tabla 5).

Los resultados de la presente investigación coinciden con lo obtenido por Araujo et al. (2023), ya que utilizaron el método de Refracción Sísmica y las velocidades se encuentran en un rango de 320 a 1260 m/s, lo cual es similar a los rangos de velocidad de San Carlos (303 a 1039) m/s y San Luis de 300m/s a 1105 m/s. En Araujo et al. (2023), denominaron 3 unidades estratigráficas sísmicas, que clasificaron como: unidades 1 y 2 (sin diferenciar), las cuáles se interpretaron como deposición de avalancha, mientras que la unidad 3 se identificó como brecha volcánica. Esta interpretación, la hicieron correlacionando los resultados con el Mapa Geológico Local (Figura 43) y los estudios previos (Araujo et al., 2023). En las Figuras 45, 46 y 47 se puede apreciar en fotografías tomadas en campo de los depósitos de avalancha.

Por otra parte, también se encontraron coincidencias con el estudio realizado por Terrahidro S.A. (2020), que destacó la aplicación del método de refracción sísmica utilizando un equipo de la marca Dolang TM, modelo DBS 280A, lo que les permitió identificar hasta 5 niveles de estratos, alcanzando velocidades de hasta 2139 m/s. En este caso, se pudo contrastar que existen coincidencias en las velocidades de los estratos 1, 2 y 3, ya que presentan un rango de 250 m/s a 1250 m/s. Terrahidro S.A. (2020), clasificó el primer nivel como el más superficial, destacando que contiene materiales geológicos poco compactados, suelos naturales, materiales de alteración y sedimentos aireados y poco compactados. El segundo nivel lo relaciona con sedimentos recientes de avalancha del volcán Reventador. En cuanto, al nivel 3 indica una mayor compacidad y destaca la presencia de posibles cantos y bloques de material volcánico (TERRAHIDRO S. A, 2020).

También, se relacionó el sondeo (perforaciones) cercano a la línea sísmica de San Carlos, realizado por TERRAHIDRO (2020). El sondeo fue denominado PCR-6 (Figura 42) en donde se identificó una capa inicial de 0 a 28 m de profundidad como depósitos de avalancha, de 28 a 79 m material fluvio- lacustre (Figura 48), y en adelante comprende material laharíticos.

En referencia a los modelos de velocidad Onda de corte Vs San Carlos (EF), la norma NEC (2014), las velocidades sísmicas, de la primera unidad está constituida por suelo blando, mientras que la segunda y la tercera unidad que se clasifican como suelo rígido. En relación al modelo de velocidad Vs de San Luis (GH), Las tres unidades, de acuerdo con la norma ecuatoriana, se clasifican de la siguiente manera: la unidad 1 como suelo blando, las unidades 2 y 3 como suelo rígido (Tabla 6). Estos hallazgos son consistentes con la clasificación de suelo rígido encontrada, en el estudio realizado por Rivera et al. (2016). Además, el estudio de Gómez et al. (2020) reveló la presencia de suelo intermedio y suelo rígido/roca basándose en las velocidades de onda de corte Vs. Estos resultados resaltan la importancia de los modelos de velocidad de onda de corte Vs para caracterizar los suelos.







A continuación, se realiza la comparación de ambas líneas sísmicas de San Carlos y San Luis de ondas (V_p), las unidades 3 que recaen dentro del rango de < 1.500 de excavabilidad del criterio general de ripabilidad basado en ondas sísmicas (tabla 4). Lo cual nos da entender que el material geológico que componen estas unidades es excavables siendo así poco resistente a las altas tasas de erosión y del poder erosivo (Meneses, 2022).

Tabla 5. Clasificación de materiales geológicos Onda Vp (AB y CD)

Línea y tipo de Onda	Profundidad del estrato (m) aprox.	Velocidad de Onda	Tipo suelo ASTM 5777-00	CNA, 1993
San Carlos (Vp)	4	 Vp1 = 303 a 467 m/s	Suelo intemperizado	Suelos arenosos
	24	 Vp2 = 549 a 876 m/s	Grava o arena seca	Suelos gruesos
	7	 Vp3= 958 a 1039 m/s	Grava o arena seca/ arena saturada	Depósitos de Talud
San Luis (Vp)	3	 Vp1 = 300 a 479 m/s	Suelo intemperizado	Suelos arenosos
	28	 Vp2 = 569 a 927 m/s	grava o arena seca	Suelos gruesos
	4	 Vp3= 1016 a 1105m/s	grava o arena seca/ arena saturada	Depósitos de Talud

Realizado por: Karina Salcedo

Tabla 6. Clasificación de materiales geológicos de Onda Vs mediante NEC-SE-DS

Línea y tipo de Onda	Profundidad del estrato (m) aprox.	Velocidad de Onda	Tipo suelo o perfil	Descripción del suelo
San Carlos (Vs)	5	 Vs1 = 154 a 196 m/s	E	Suelo blando
	9	 Vs2 = 238 a 280 m/s	D	Suelo rígido
	12	 Vs3= 322 m/s	D	Suelo rígido
San Luis (Vs)	4	 Vs1 = 175 a 214 m/s	E	Suelo Blando
	13	 Vs2 = 252 a 290 m/s	D	Suelo rígido
	9	 Vs3= 328 m/s	D	Suelo rígido

Realizado por: Karina Salcedo



INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS RÍO COCA

COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE LOS SONDEOS:

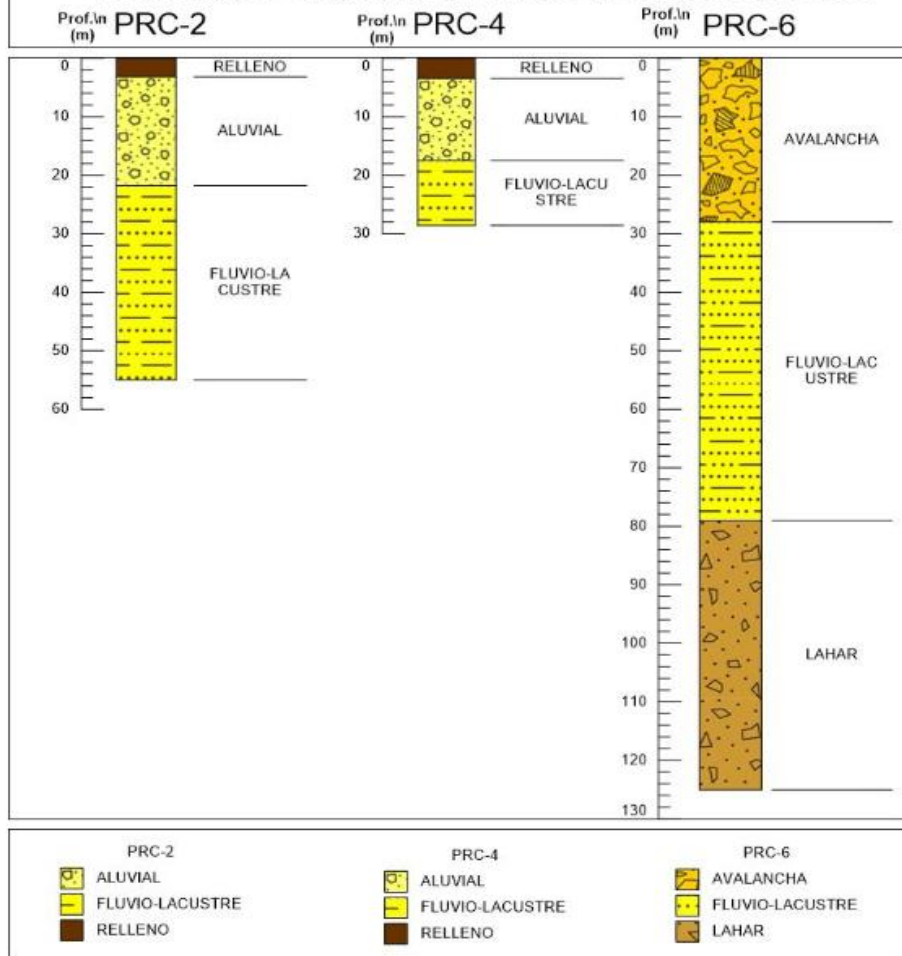


Figura 42. Columna estratigráfica de los sondeos realizados al margen del río Coca.
Fuente: (Terrahidro, 2020)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se generaron, los modelos de velocidad de ondas V_p y V_s en los poblados de San Luis y San Carlos, a partir de los métodos de tomografía de refracción sísmica y MASW. Se obtuvieron velocidades en un rango de 300 a 1105 m/s de la onda (V_p) y 154 a 322 m/s onda (V_s), casi similares en ambos casos y se pudo evaluar las características sismoestratigráficas clasificándolos de la siguiente manera: En San Carlos, se identificó la unidad 1 como suelo intemperizado, la unidad 2 como avalancha de escombros, con una transición hacia la unidad 3 de depósitos fluvio-lacustres. Por otro lado, en el caso de San Luis, se evidenció lo siguiente: en la unidad 1 se clasificó, como suelo intemperizado, seguido de la unidad 2 que abarca avalancha de escombros, la unidad 3 como brecha volcánica y para las ondas de corte se clasificó de suelo blando a rígido.
- Además, se identificó que las unidades geológicas son excavables, que pueden representar riesgos geotécnicos, como deslizamiento de tierras en masa ya que la ripabilidad se encuentra en este rango de velocidades sísmicas < 1.500 m/s.
- En el presente estudio, también se realizaron comparaciones con investigaciones anteriores, como las de Araujo et al. (2023), Terrahidro y CELEC EP (2020). En estos estudios, se analizó las velocidades de la onda V_p que van de 320 a 1260 m/s y 250 a 2139 m/s, respectivamente. Estas velocidades, junto con la información geológica recopilada por Kawsus (2020), indican la predominancia de depósitos de avalanchas del volcán Reventador, así como brechas volcánicas y depósitos fluvio-lacustres. En cambio, para el método MASW, se realizó una comparación con los resultados de los estudios de Rivera et al. (2016) y Gómez et al. (2020). En estos estudios, se observó un rango de velocidades de 310 a 312 m/s y 330 a 716 m/s, respectivamente. Estas velocidades coinciden en la clasificación de suelo rígido a intermedio para las velocidades más bajas, mientras que la velocidad más alta es característica de la presencia de roca.
- Este estudio, tiene una aplicabilidad amplia y económica. Estos métodos no son costosos y ofrecen información crucial para comprender la estructura geológica, evaluar el riesgo sísmico y diseñar infraestructuras seguras. Además, son

herramientas valiosas en la planificación urbana y la gestión del riesgo. En resumen, este estudio brinda datos relevantes y asequibles para la toma de decisiones en las zonas de San Carlos y San Luis. Este estudio proporciona a la población acceso a información que normalmente es confidencial y de difícil acceso en muchos casos.

- Se recomienda emplear perforaciones en el lugar de estudio para realizar un análisis más avanzado. Si bien los estudios previos realizados por perforaciones cercanas proporcionan información relevante, contar con perforaciones directamente en el área de estudio permitiría obtener datos más precisos y detallados sobre la composición del subsuelo y las características geológicas específicas de la zona. Con ello se minimizarían las incertidumbres asociadas a la extrapolación de datos de perforaciones cercanas.
- Es necesario que en base a estas investigaciones se tomen medidas de mitigación en la planificación de proyectos. Además, es necesario compartir la información con las autoridades locales y los habitantes de los poblados de San Carlos y San Luis. Con el fin de concientizar sobre los riesgos geotécnicos y para planes de mitigación seguros.

REFERENCIAS

- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia, M., Rolandone, F., & Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. *Tectonics*, 35(5), 1048–1065. <https://doi.org/10.1002/2016TC004117>
- 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>
- Arboleda, M., & Camacho, S. (2020). Manual de procedimientos de refracción sísmica y procesamiento de registro. <https://hdl.handle.net/10901/23220>
- Aspden, J. A., & Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205(1–3), 187–204. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90426-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90426-7)
- Aster, R. C., Borchers, B., & Thurber, C. H. (2018). *Parameter Estimation and Inverse Problems (Third Edition)*. Copyright©2019 Elsevier Inc.
- ASTM D5777 - 00. (2011). Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. <https://www.environmental-expert.com/news/astm-d5777-00-2011-e1-standard-guide-for-using-the-seismic-refraction-method-for-subsurface-investig-258337>
- Barragán, R., & Baby, P. (2004). Evolucion magmatica actual de la zona subandina : volcanes el reventador y sumaco, modelos geodinamicos preliminares.
- Bernal, I., & Tavera, H. (2020). Evaluación geofísica de la piscina semi-olímpica de la Universidad Nacional de Moquegua.
- Boyd, T. (1999). *Introduction to Geophysical Exploration-Refractive Seismic Methods*.
- CELEC EP. (2022). Estudio fluviomorfológico del río Coca-modelo hidromorfodinámico del tramo entre la captación y descarga CCS. www.celec.gob.ec
- CELEC EP, & Terrahidro, S. A. (2020). Investigación del subsuelo con métodos de geofísica, en el tramo entre el Salado y la cascada San Rafael, debido a la erosión regresiva en el río Coca. Provincia de Napo. <https://www.celec.gob.ec/comision-ejecutora-rio-coca/>
- Eguez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M., Costa, C., & Dart, R. (2003). Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions.
- FUNVISIS. (2020). Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. <http://www.funvisis.gob.ve/old/glosario.php#O>
- Geometrics. (2009a). *SeisImager/2D TM Manual*.
- Geometrics. (2009b). *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 (Manual v. 3.0)*.

- Geometrics. (2012). Operation and Reference Manual for Geometrics Seismograph models Smartseis ST Geode Stratavisor. 8519-01_M_Geode-NZ-SmartSeis-ES-3000.doc. www.geometrics.com
- Griem, W. (2020). Apuntes Geología General: Métodos geofísicos, sismología. <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap01c.htm>
- Hall, M., Ramón, P., Mothes, P., LePennec, J. L., García, A., Samaniego, P., & Yepes, H. (2004). Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador. *Revista Geológica de Chile*, 31(2), 349–358. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200010>
- Hansen, P. C. (1992). Analysis of Discrete Ill-Posed Problems by Means of the L-Curve. <https://doi.org/10.1137/1034115>, 34(4), 561–580. <https://doi.org/10.1137/1034115>
- IGEPN. (2011). Mapas de los peligros potenciales del volcán Reventador. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. <https://www.igepn.edu.ec/reventador-mapa-de-amenaza-volcanica/file>
- IGEPN. (2023). El Reventador. Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional.
- IGM. (2010). Mapa de Sombras 50k. <https://www.Geoportaligm.Gob.Ec/Dtm/Wms>.
- IIGE. (2022). La geología del Ecuador y sus paisajes. Instituto de Investigación Geológico y Energético. El Oriente. <https://www.goraymi.com/es-ec/morona-santiago/li->
- INEC. (2010). División Político - Administrativa. <https://www.Ecuadorencifras.Gob.Ec/Division-Politico-Administrativa/>.
- INECEL. (1992). 2. FASE B VULCANOLOGIA-Proyecto Hidroeléctrico Coca-Coso Sinclair. <https://www.celec.gob.ec/comision-ejecutora-rio-coca/>
- INIGEM. (2005). Cartas Geológicas del Ecuador. <https://Sni.Gob.Ec/Geoservicios-Ecuador>.
- Kawsus. (2020). Contrato de consultoría para levantamiento topográfico con ortofotografía - lidar y diagnóstico geológico geotécnico de erosión del lecho del río Coca. KAWSUS. <https://www.celec.gob.ec/comision-ejecutora-rio-coca/>
- Linares, R., Brusi, D., Pallí, L., Roqué, C., Almanza, X., Cebrià, A., Geis, C., Zamorano, M., Soler, D., Vehí, M., & Clapés, S. (2002). Métodos de reconocimiento del subsuelo. *Subsoil studies methods*. 10(1), 1132–9157.
- Lonsdale, P. (1978). Ecuadorian Subduction System[^]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, V.62. No 12. <https://doi.org/doi:10.1306/c1ea5526-16c9-11d7-8645000102c1865d>
- López, S. (2016). Ensayos geofísicos para la exploración de suelos en estructuras patrimoniales. Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú). <http://hdl.handle.net/20.500.12390/305>
- Marocco, R., & Winter, T. (1997). Bosquejo de la evolución geodinámica del Ecuador.
- Meneses, V. (2022). Evaluación de los Factores que controlan la Erosión Regresiva en el río Coca. Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos.
- NEC. (2014). Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente-Norma Ecuatoriana de la Construcción.

- Otero, D. Z. (2017). ONDAS SÍSMICAS, su importancia para la geofísica y la humanidad. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20029.08168>
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2001). Seismic Characterization of Geotechnical Sites By Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) Method. En La Décima Conferencia Internacional Sobre Dinámica Del Suelo e Ingeniería Sísmica (SDEE), Filadelfia .
- Proaño, R. (2023). Artículo Técnico 01 CERC_ Investigaciones Geotécnicas. CELEC EP. <https://celeccloud.celec.gob.ec/s/p3a6q2eH3n6iTMF?dir=undefined&openfile=20683526>
- Raymond Chou & CK-12 Foundation. (2021). Ondas Sísmicas de Terremotos.
- Reyes, P., Procel, S., Sevilla, J., Cabero, A., Orozco, A., Córdova, J., Lima, F., & Vasconez, F. (2021). Exceptionally uncommon overburden collapse behind a natural lava dam: Abandonment of the San-Rafael Waterfall in northeastern Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 103353. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2021.103353>
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics (2nd Edition)*. www.wiley.com/go/reynolds/introduction2e
- Rivera, M. A., Rubio, R., & Paripanca, Y. (2016). Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. Universidad Nacional de Ingeniería, Gerente Técnico GEORYS Ingenieros S.A.C, Gerente de Proyectos GEORYS Ingenieros S.A.C.
- Ruiz, G. (2002). Exhumation of the northern Sub-Andean Zone of Ecuador and its source regions a combined thermochronological and heavy mineral approach. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004489528>
- SGR. (2023). INFORME N°SGR-IASR-02-2023-015. SUBSECRETARÍA DE GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE RIESGOS / COORDINACIÓN ZONAL 2 DE GESTIÓN DE RIESGOS.
- Stein, S., & Wysession, M. (2009). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure: Vol.* John Wiley & Sons.
- Terrahidro, S. A. (2020). Informe de avance de las investigaciones geotécnicas río Coca. Semana del 26 octubre al 01 de noviembre 2020. <https://www.celec.gob.ec/comision-ejecutora-rio-coca/>
- Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica.
- Vidal, A. (2018). Relación entre velocidad de la luz, frecuencia y longitud de onda $\lambda = -$ ppt descargar. <https://slideplayer.es/slide/13115868/>

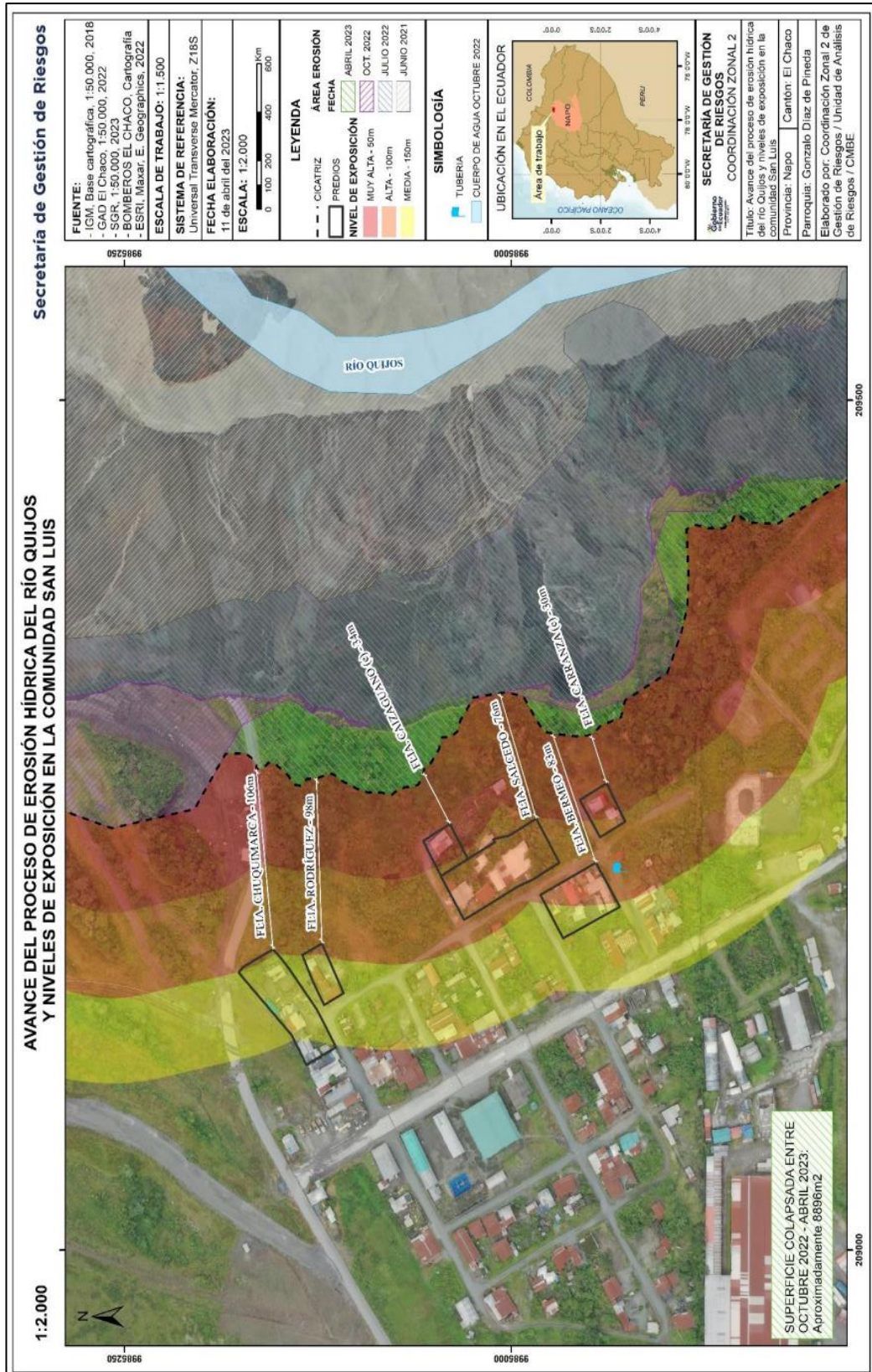


Figura 44. Avance del proceso de erosión hídrica del río Quijos y niveles de exposición en la comunidad San Luis
Fuente: (SGR, 2023)



Figura 45. Depósitos de avalancha de escombros (SAN LUIS) en dirección NE de la línea sísmica

Fuente: Karina Salcedo



Presencia
de
acuíferos

Figura 46. Suelo vegetal seguido de avalancha de escombros con presencia de acuíferos como conductos de transmisión de agua. (San Luis)

Fuente: Karina Salcedo



Figura 47. San Luis sobre depósitos de avalancha de escombros del volcán Reventador.
La línea roja representa la línea sísmica de San Luis

Fuente: Karina Salcedo & Armando Navarrete



Figura 48. Avalancha de escombros y Depósitos fluvio-lacustres (San Carlos) en Dirección Sureste de la línea sísmica.

Fuente: Karina Salcedo

Tabla 7. Resultados de los cálculos de elevación.

Resultados de los cálculos de elevación			
San Carlos		San Luis	
Distancia (m)	Elevación (m)	Distancia (m)	Elevación (m)
0	0.8	0	1
5	0.74	5	0.91
10	0.71	10	0.82
15	0.68	15	0.74
20	0.64	20	0.66
25	0.61	25	0.58
30	0.57	30	0.49
35	0.54	35	0.41
40	0.51	40	0.33
45	0.47	45	0.24
50	0.44	50	0.16
55	0.40	55	0.08
60	0.37	60	0.01
65	0.34	65	0
70	0.30	70	0
75	0.27	75	0
80	0.23	80	0
85	0.20	85	0
90	0.17	90	0
95	0.13	95	0
100	0.10	100	0
105	0.06	105	0
110	0.03	110	0
115	0	115	0

Fuente: Karina Salcedo