



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

**USO DEL MODELO DE VELOCIDADES DEL ECUADOR PARA
LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS INTERNAS DE LA
ZONA DE TRANSICIÓN ENTRE EL LEVANTAMIENTO NAPO Y
LA CUENCA ORIENTE.**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTOR: SAMANTHA JOHANNA JIMÉNEZ ARMIJOS

TUTOR: PhD. JOSÉ SEBASTIÁN ARAUJO

Napo - Ecuador

2023

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, SAMANTHA JOHANNA JIMÉNEZ ARMIJOS con documento de identidad N° 1150225686, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de Ingeniería en Geociencias, son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

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

Tena, 28 de junio de 2023



Samantha Johanna Jiménez Armijos

1150225686

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, SAMANTHA JOHANNA JIMÉNEZ ARMIJOS, con documento de identidad N° 1150225686, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: USO DEL MODELO DE VELOCIDADES DEL ECUADOR PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS INTERNAS DE LA ZONA DE TRANSICIÓN ENTRE EL LEVANTAMIENTO NAPO Y LA CUENCA ORIENTE 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 Ikiám 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 Ikiám 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, 28 de junio de 2023



Samantha Johanna Jiménez Armijos

1150225686

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “USO DEL MODELO DE VELOCIDADES SÍSMICAS DEL ECUADOR PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS INTERNAS DE LA ZONA DE TRANSICIÓN ENTRE EL LEVANTAMIENTO NAPO Y LA CUENCA ORIENTE”, en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: Samantha Johanna Jiménez Armijos, 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, 28 de junio de 2023



José Sebastián Araujo Soria

1802672871

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de titulación es dedicado a mi familia quienes me han dado el sustento económico y emocional para estudiar una carrera universitaria, del cual estoy muy agradecida porque contribuye a mi progreso académico y, por ende, cumplir mis metas. Agradezco infinitamente a mi tutor PhD. Sebastián Araujo quien me pudo guiar en un tema que poco conocía pero que se me hacía muy importante para la prospección, alineado al área del cual estoy interesada. Agradezco a mis demás profesores de Geociencias de la Universidad Regional Amazónica Ikiam, que aparte de enseñar también fueron amigos, en varias ocasiones me comprendieron y supieron ayudar en lo que necesitaba, también de ellos aprendí a apasionarme de mi carrera. Agradezco a mis compañeros por la motivación en este largo camino estudiantil y, finalmente agradezco a mis amigos por apoyarme y ofrecerme su hombro cuando desmayaba o quería rendirme. Esta tesis va dirigida a quienes han formado parte de este camino y me han acompañado de alguna u otra manera, así mismo para quienes quieran hacer el uso de manera investigativa.

TABLA DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR.....	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
TABLA DE CONTENIDOS.....	vi
TABLA DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Contexto geológico.....	2
1.1.1. Evolución geodinámica.....	2
1.1.1.1. <i>Tectónica activa de la Cuenca Oriente.....</i>	3
MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
RESULTADOS.....	6
3.1. Modelo de velocidades sísmicas para el cociente entre la velocidad de onda P y la onda S (v_P/v_S) de la sección transversal E- O.....	6
3.2. Modelo de velocidad sísmica relativo de v_P en la sección transversal E-O.....	8
3.3. Modelo de velocidades sísmicas absolutas de la onda P (V_p) de la sección transversal E-O.....	11
3.4. Modelo de velocidades v_P/v_S, v_P absoluto y v_P relativo en el corte transversal N-S de la parte sur de la cordillera Napo – Galeras.....	14

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	15
4.1. Modelo de velocidades v_P/v_S en la sección transversal E-O.....	15
4.2. Modelo de velocidad sísmica relativo de v_P en la sección transversal E-O.....	16
4.3. Interpretación de modelo de velocidad sísmica de v_P absoluto...	17
4.4. Interpretación sísmica en el área de estudio.....	18
CONCLUSIONES.....	20
BIBLIOGRAFÍA.....	21

TABLA DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa de ubicación donde se muestra la sismicidad del área de estudio. Los datos de los hipocentros sísmicos son los resultantes de la tomografía (1988-2016) obtenidos de RENSIG y RENAC.....	2
Figura 2:	Flujo de trabajo de la metodología aplicada por la autora.....	6
Figura 3:	Modelo de velocidades sísmicas vP/vS . (a) primer corte, (b) segundocorte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte y (e) quinto corte.....	8
Figura 4:	Modelo de velocidades relativas de vP en %; (a) primer corte, (b) segundo corte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte y (e) quinto corte....	10
Figura 5:	Mapa que representa el modelo de velocidades vP/vS , a una escala 1:250000 del área de estudio. Cortes realizados en INSIGHT con sus respectivas unidades sismo-estratigráficas.....	11
Figura 6:	Modelo de velocidades sísmicas de velocidad P absoluta en km/s; (a)primer corte, (b) segundo corte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte y (e) quinto corte.....	13
Figura 7:	Modelo de velocidades sísmicas de la cordillera Napo-Galeras. a) Modelo de velocidades vP/vS , b) $P(vP)$ y c) variación $P(vP)$ de la cordillera Napo-Galeras.....	14
Figura 8:	Interpretación de las unidades sismo-estratigráficas a partir del modelo de velocidades relativo de vP en porcentaje de variación; (a) primer corte, (b) segundo corte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte, (e) quinto corte y (f) en dirección a la cordillera.....	16

RESUMEN

La tomografía sísmica es una herramienta útil para identificación de las estructuras de la corteza terrestre. Se analizaron los modelos de velocidades: modelo de velocidades de ondas sísmicas P absoluto, modelo de velocidades sísmicas P relativo y el modelo de velocidades sísmicas v_P/v_S a partir de los sismos registrados por la Red Nacional de Sismógrafos (RENSIG) en los años 1988 a 2016. Se cumplió el objetivo principal de identificar las estructuras de la corteza terrestre que provocaron la geomorfología de la cordillera Napo – Galeras. El área de estudio se encuentra al sur del levantamiento Napo, en la zona de transición entre la cordillera Napo - Galeras y la Cuenca Oriente, tiene una distribución de 25 km al norte, sur, este y oeste del punto con longitud - 77.574439, y latitud 1.055514]. El modelo de relativo de v_P permitió identificar seis unidades sismo-estratigráficas: Fm. Napo, Fm. Hollín, Fm. Misahuallí, Fm. Tena, Fm. Tiyuyacu y Fm. Chalcana. El modelo de v_P/v_S permitió observar que existe magmatismo relacionado con la cámara magmática del volcán Sumaco. Con el modelo de v_P absoluto se demostró un adelgazamiento litosférico ubicado debajo de la cordillera Napo – Galeras, en consecuencia, de una inversión tectónica y al desarrollo de la cordillera. Así mismo, este modelo ayudó a entender la disposición del graben que contiene a las formaciones Hollín y Napo, con respecto al horst que se encuentra tanto en la cordillera Oriental (Oeste) como la Fm. Misahuallí (Este).

Palabras claves: Levantamiento Napo, Cordillera Napo – Galeras, Tomografía sísmica, Inversión tectónica, Graben.

ABSTRACT

Seismic tomography is a useful tool for identifying the structures of the earth's crust. The velocity models were analyzed: absolute P seismic wave velocity model, relative P seismic velocity model and the vP/vS seismic velocity model from the earthquakes recorded by the National Seismograph Network (RENSIG) in 1988 to 2016. The main objective of this study is identifying the structures of the earth's crust that caused the geomorphology of the Napo - Galeras mountain range. The study area is located to the south of the Napo uplift, in the transition zone between the Napo - Galeras mountain range and the Oriente Basin, it has a distribution of 25 km to the north, south, east and west of the point with longitude -77.574439 , and latitude 1.055514 . The relative model of vP allowed to identify six seismic-stratigraphic units: Fm. Napo, Fm. Hollín, Fm. Misahuallí, Fm. Tena, Fm. Tiyuyacu and Fm. Chalcana. The vP/vS model allowed us to observe that there is magmatism related to the magma chamber of the Sumaco volcano. With the absolute vP model, a lithospheric thinning located below the Napo-Galeras range was demonstrated, as a consequence of a tectonic inversion and the development of the range. Likewise, this model helped to understand the disposition of the graben that contains the Hollín and Napo formations, with respect to the horst that is found both in the Eastern (West) cordillera and the Fm. Misahualli (East).

Keywords: Napo Uplift, Napo - Galeras mountain range, Seismic tomography, Tectonic inversion, Graben.

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1980, la tomografía sísmica ha sido utilizada como herramienta para obtener imágenes internas de la Tierra, en virtud de ello, ha incrementado significativamente su potencial (Rinaldi, Ibarra, Viguera, & Harasimiuk, 2016). Los modelos de velocidades son registrados por las ondas P y S, dependen de la densidad y elasticidad del medio que circundan, como medida de la resistencia al esfuerzo cortante (Don & Dziewonski, 1984). Tarbuck & Lutgens (2005) teóricamente explican que las ondas compresivas (ondas P) vibran hacia atrás y adelante en el mismo plano que su dirección de movimiento, son más rápidas y son capaces de propagarse a través de líquidos y sólidos. Las ondas de cizalla (ondas S), vibran en ángulo recto con respecto a su dirección de desplazamiento. Por lo tanto, dependiendo de la naturaleza de las capas a través de las cuales pasen, las ondas sísmicas van más rápidas o más lentas, y pueden refractarse o reflejarse.

En este trabajo investigativo se aplicará la tomografía sísmica para la determinación de los acontecimientos que provocaron la morfología de la cordillera Napo-Galeras. A partir de ello, se obtendrán los modelos de velocidades vP/vS , relativo de vP y vP absoluto para la interpretación de las estructuras de la corteza terrestre del área de estudio, como son; el magmatismo, caracterización de las unidades sismo-estratigráficas, identificación de la amenaza sísmica, entre otras interpretaciones.

El sitio de interés se encuentra en el Oriente Ecuatoriano, el cual se divide en dos zonas estructurales y provincias fisiográficas distintas: la Cuenca Oriente y la Zona Subandina. Ésta consiste en colinas de piedemonte que alcanzan elevaciones hasta 2000 m (Nieto, 2000). El área delimitada se ubica al sur del Levantamiento Napo, en la zona de transición entre la cordillera Napo – Galeras y la Cuenca Oriente, latitud -1.055 y longitud -77.57, con una distribución de 25 km al este y al oeste.

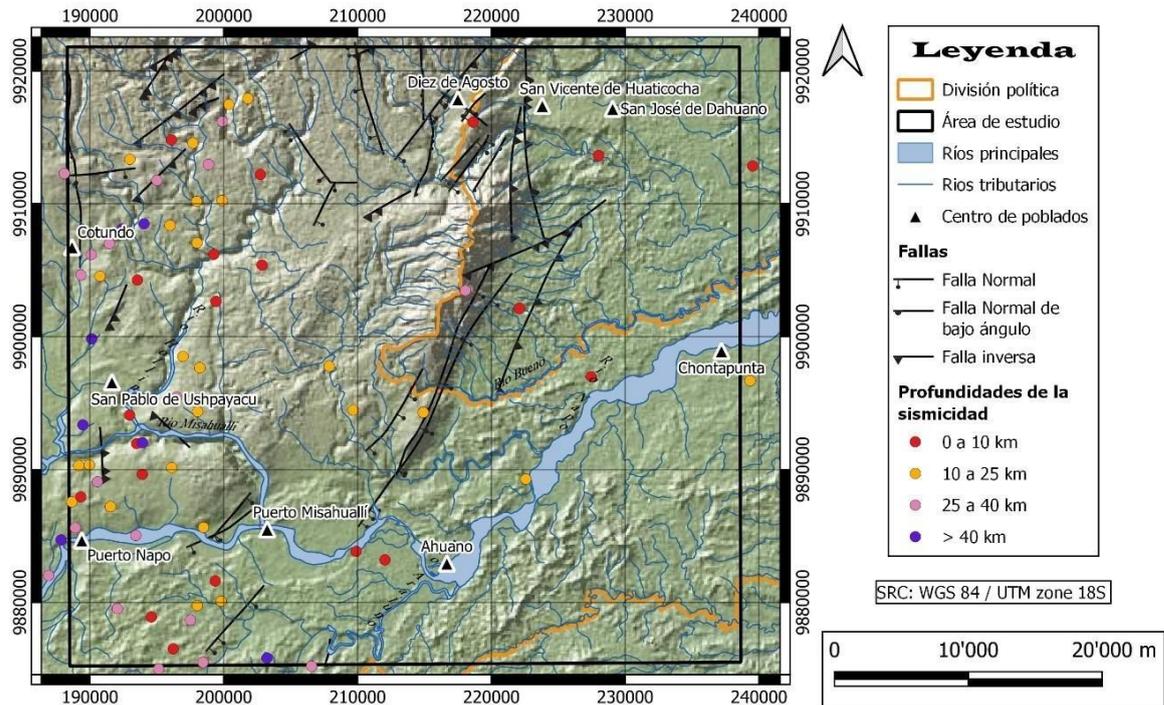


Figura 1: Mapa de ubicación donde se muestra la sismicidad del área de estudio. Los datos de los hipocentros sísmicos son los resultantes de la tomografía (1988-2016) obtenidos de RENSIG y RENAC.

Realizado por: Jiménez, 2023.

1.1. Contexto geológico

1.1.1. Evolución geodinámica

La Zona Subandina es la parte más próxima al oeste de la Cuenca Oriente, comprende de un basamento paleozoico caracterizado por rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico-Cenozoico, encontradas en el Sistema de Empuje Subandino donde la inversión tectónica del sistema de cuenca extensional del Triásico-Jurásico las deformó (Baby, Rivadeneira, & Barragán, 2004). Se encuentran dos elementos plegados; al Norte, el levantamiento Napo y al Sur, el levantamiento Cutucú que están separados por el arco Loracachi (Nieto, 2000). Según el estudio de Vallejo et al. (2021) afirma que el empuje y la deformación de las rocas sedimentarias del Mioceno de la Formación Arajuno indica que el levantamiento Napo y Cutucú estuvieron activos durante el Mioceno Superior y el Plioceno. “Ambas unidades forman

la transición entre la Cordillera Real de más de 4000 m de altura y el Oriente frente a la Falla Frontal Andina con una elevación de menos de 400 m” (Ruiz, Seward, & Winkler, 2007).

El levantamiento Napo tiene una amplia antiforma (domo) causada por la inversión estructural de cuenca cretácica al terciaria de la Zona Subandina (Tibaldi & Ferrari, 1992). Correspondiente al texto de (Brito, 1985), el Levantamiento Napo tiene aproximadamente 150 km de longitud y 50 km ancho, se profundiza hacia el Oeste en dirección a la zona de empuje formando un sinclinal “Sinclinal Subandino”. En el flanco Este tiene buzamientos suaves, pero conforme se acerca a la ruptura producida por el empuje de la cordillera Galeras, se presentan buzamientos fuertes presentes igual en la falla Galeras que pueden tener inclusive buzamientos verticales inversos. Mientras que, al oeste de la falla se han formado una serie de estructuras anticlinales (Brito, 1985).

Según los datos sedimentológicos, de procedencia y geocronológicos recopilados por Vallejo et al. (2021) que se obtuvieron del relleno de la cuenca de retroarco del Ecuador sugiere que el relieve creado por el *rifting* del Jurásico Superior es un evento de deformación del Cretácico Inferior que fue llenado por depósitos fluviales del Miembro AVF basal de la Formación Hollín. Así mismo, la Formación Tena del Maastrichtiano-Paleoceno inferior se depositó de manera disconforme sobre la Formación Napo durante la inversión tectónica parcial de la Cuenca Oriente. Los depósitos de abanicos aluviales de la Formación Tena se derivaron de los Andes, lo que indica una reorganización del drenaje a escala continental (Vallejo et al., 2021).

1.1.2. Tectónica activa de la Cuenca Oriente

La Cuenca Oriente está deformada por zonas de fallas, sus estructuras principales corresponden a las estructuras de flor positivas, las mismas que se componen por fallas transcurrentes compresivas, también nombradas como transpresivas NNE-SSW correspondientes a sistemas de rift mesozoicos invertidos y a la extensión de la Cuenca Oriente rellena por sedimentos. Se desarrollan a lo largo de tres zonas de falla transpresivas dextrales NNE-SSW. (1) En la parte occidental, la Zona Subandina aún se encuentra sísmica y volcánicamente activo. (2) En el centro de la cuenca, el Corredor Shushufindi-Sacha resulta de la inversión tectónica de una tendencia NNE-SSW del Triásico Superior que limita los semi-grabens del Jurásico Inferior que emerge en realidad en el Levantamiento Cutucú. (3) Hacia el este, el juego Capirón-

Tiputini es un sistema invertido de semi-grabens probablemente de edad Permo-Triásica (Baby, Rivadeneira, & Barragán, 2004).

En el Sistema de Empuje de la Cordillera Real es afectada por fallas inversas regionales paralelas a esta, que han sido conductos para el flujo magmático que condujo a la formación del Batolito de Abitagua – Guacamayos, a las rocas de la Fm. Misahuallí y del vulcanismo reciente de esta zona. Así mismo, se han formado estructuras como es el Horst de Borja y el Graben de Cosanga ubicadas al Norte (Brito, 1985).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la identificación de las estructuras internas de la cordillera Napo – Galeras se utilizará el software INSIGHT, donde se emplea el modelo matemático con enfoque bayesiano para resolver el problema inverso de la tomografía y reducir el daño de la propagación excesiva de errores.

Las imágenes están representadas como un conjunto de píxeles, y se establecen de acuerdo a la relación teórica de $\mathbf{d} = \mathbf{g}(\mathbf{m})$, donde \mathbf{m} son los parámetros y \mathbf{d} los datos, y la relación entre ellos es el problema directo donde d contiene los tiempos de viaje de las ondas P y las diferencias entre los tiempos de viaje de las ondas P y S (Paredes & Araujo, 2021). La Ecuación (1) es el algoritmo Cuasi-Newton del problema de Tikhonov, se utiliza para buscar el mínimo de una función de costo en un espacio de regularización. Donde \mathbf{T} es el operador de regularización que en el caso del enfoque estocástico gaussiano es la raíz cuadrada del operador de covarianza $\mathbf{C}_m^{-1/2}$ del modelo. \mathbf{C}_d es la matriz de covarianza de los datos (Araujo, Valette, Potin, & Ruiz, 2021).

$$\left\| \mathbf{C}_d^{-\frac{1}{2}} (\mathbf{d}^{obs} - \mathbf{g}(\mathbf{m})) \right\|_0^2 + \left\| \mathbf{T}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{prior}) \right\|_M^2 \quad (1)$$

El software INSIGHT (Potin, 2016) invierte los tiempos de arribo de las ondas P y S para determinar los hipocentros y los valores de los modelos de velocidades sísmicas de v_P relativo y absoluto, y v_P/v_S . Los parámetros de amortiguamiento y las longitudes

de suavizado se deben obtener a través de un proceso de regularización basado en la curva L (Paredes & Araujo, 2021).

La tomografía se elabora a partir de los valores de las ondas sísmicas que se han generado por los terremotos, estos datos son proporcionados por el Instituto Geofísico (IGEPN), que consiste en los tiempos de llegada de ondas P y S recogidos manualmente de estaciones de la Red Nacional de Sismógrafos (RENSIG), la Red Nacional de Movimientos Fuertes (RENAC) y de observatorios volcánicos. Estos datos han sido obtenidos desde 1988 hasta el 16 de abril del 2016, antes del terremoto de subducción de Pedernales. Los datos abarcan un total de 45941 eventos sísmicos registrados en 256 estaciones sísmicas en todo el territorio ecuatoriano (Paredes & Araujo, 2021).

Se toma un punto inicial cercano a la elevación más alta de un área montañosa poco explorada, en este caso nos referimos a la cordillera Napo – Galeras, que tiene su ubicación $[-1.055514, -77.574439]$ con acimut de 90 grados y un ancho de 50 km, como punto inicial de referencia. A partir de esta longitud, se realizan cinco cortes de tomografía sísmica que atraviesen la cordillera para determinar si las unidades sismo-estratigráficas cambian de norte a sur (figura 5). Los cinco cortes corresponden a las latitudes: -0.7341 (al sur del volcán Sumaco) -0.8, -0.9, -1 y - 1.1. De la misma manera, para contrastar las unidades sismo-estratigráficas de la cordillera Napo - Galeras, se realiza un corte en $[-0.875237, -77.543268]$, con orientación de 20° (dirección aproximada de la cordillera) y con un ancho de 35 km. Todas las tomografías realizadas se las hicieron a una profundidad de 40 km, tomando en cuenta que la imagen comienza alrededor de los 7.5 km, el espesor aproximado de las tomografías serán de 32.5 km.

Para la elaboración de la (figura 5) se utilizó el programa AutoCAD, dónde se graficó las unidades sismo-estratigráficas obtenidas en los cinco cortes a partir de sus rangos de velocidades, del cual se lo exportó como un ráster. Estas unidades sismo-estratigráficas se las describirán en las siguientes secciones. Los datos de profundidad de los sismos registrados por RENSIG, las fallas y los centros de poblados fueron obtenidas a través del Geoportal del Instituto Geofísico Militar Ecuatoriano (IGME) y fueron utilizadas en el programa Qgis.

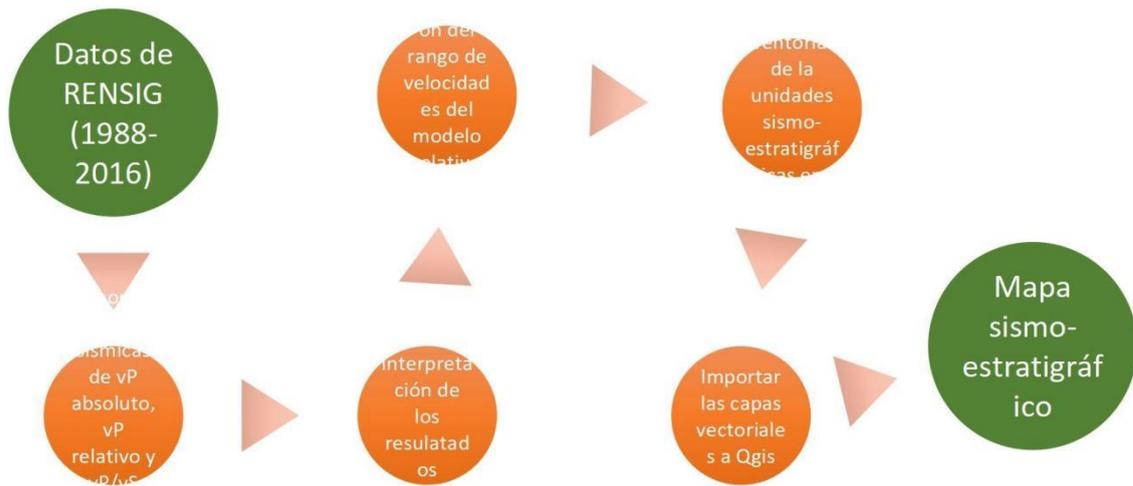
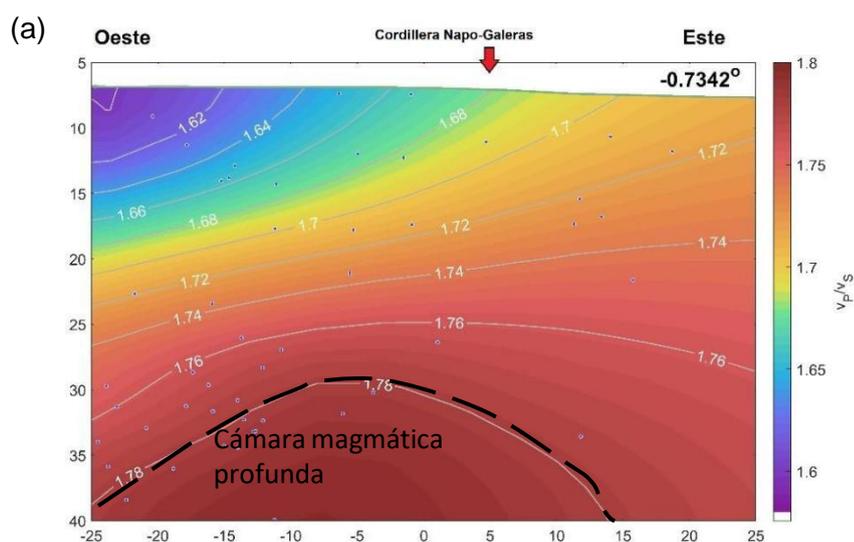


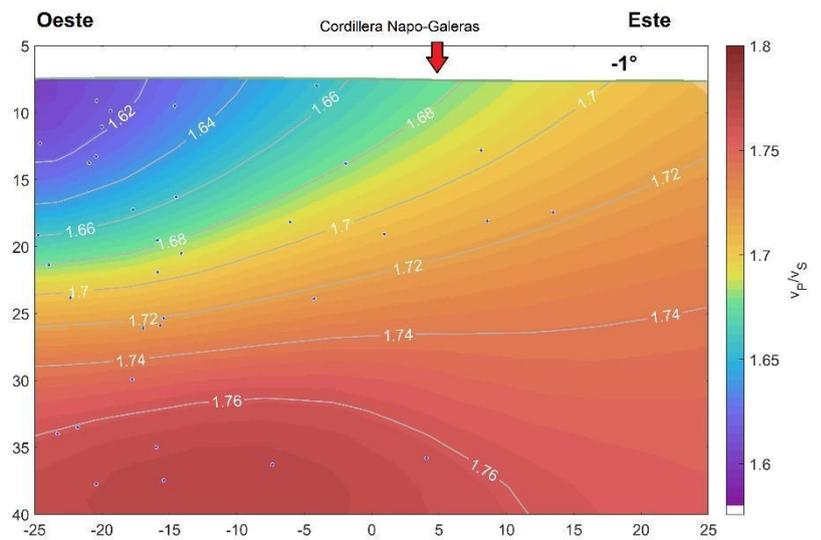
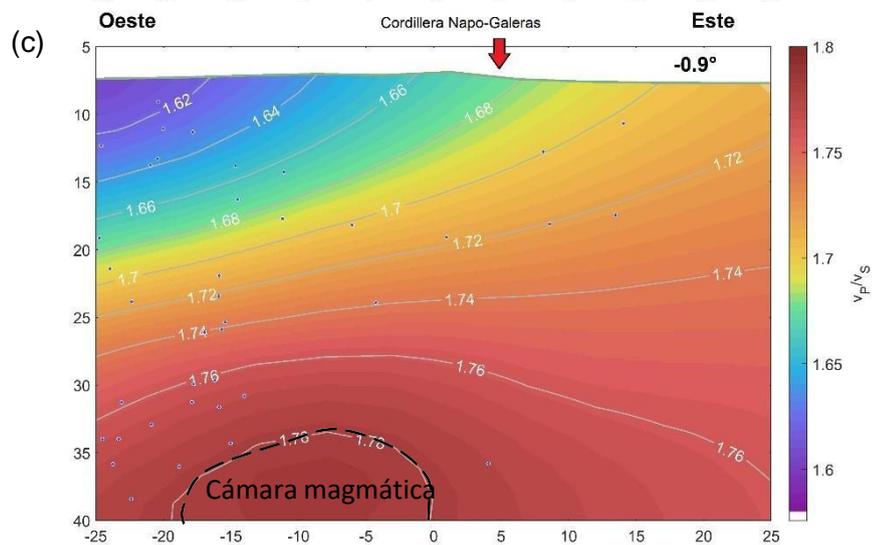
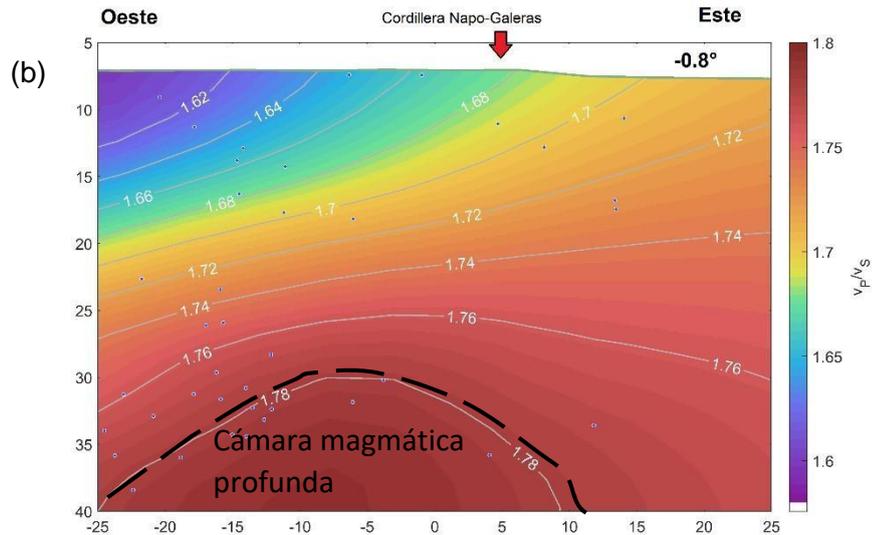
Figura 2: Flujo de trabajo de la metodología aplicada por la autora.

3. RESULTADOS

Para la interpretación de las estructuras internas de la cordillera Napo-Galeras (*figura 5*), primero se obtuvieron las imágenes de tomografía sísmica en los cinco cortes descritos anteriormente, los cuales están representados en los modelos de velocidades: de vP/vS, vP relativo y vP absoluto.

3.1. Modelo de velocidades sísmicas para el cociente entre la velocidad de onda P y la onda S (vP/vS) de la sección transversal E-O.





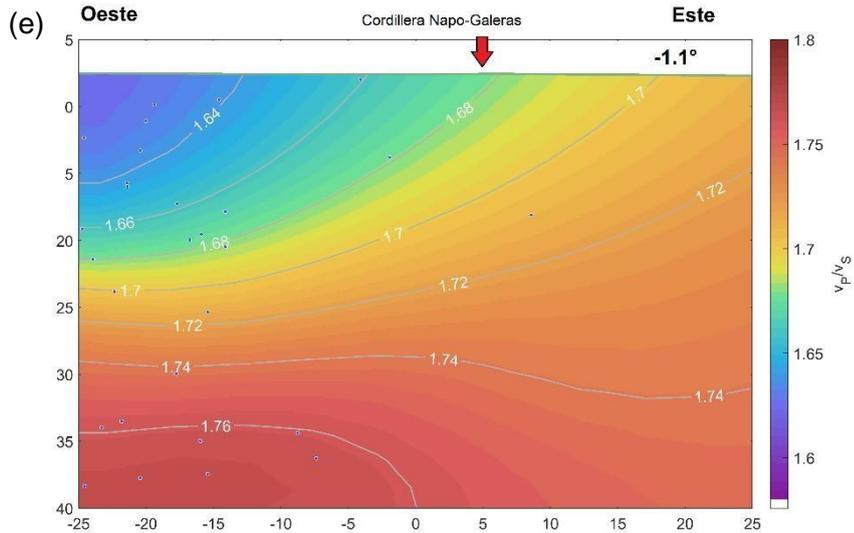
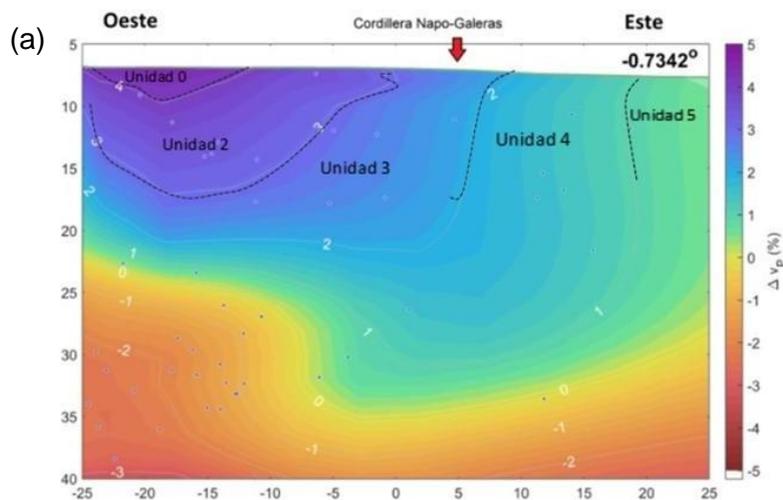


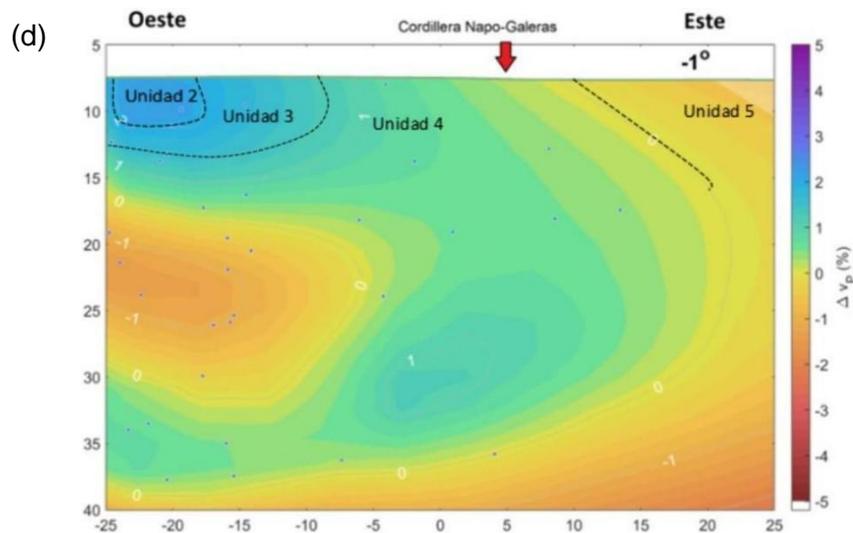
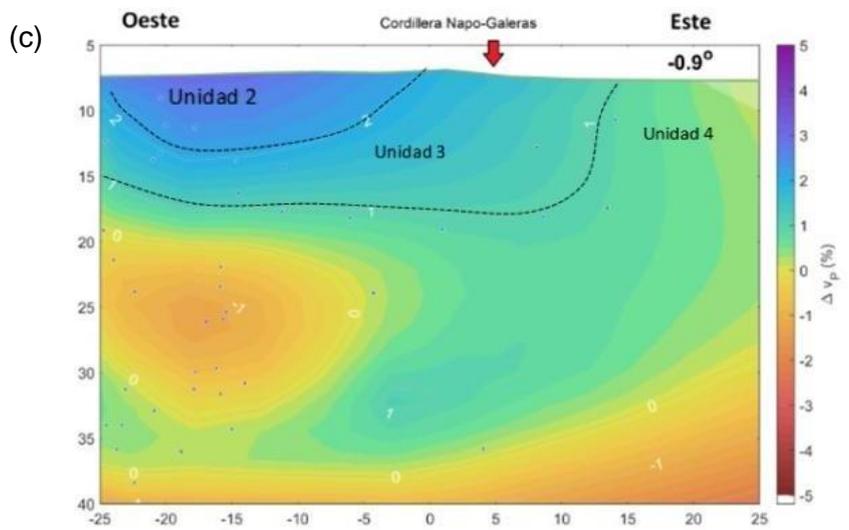
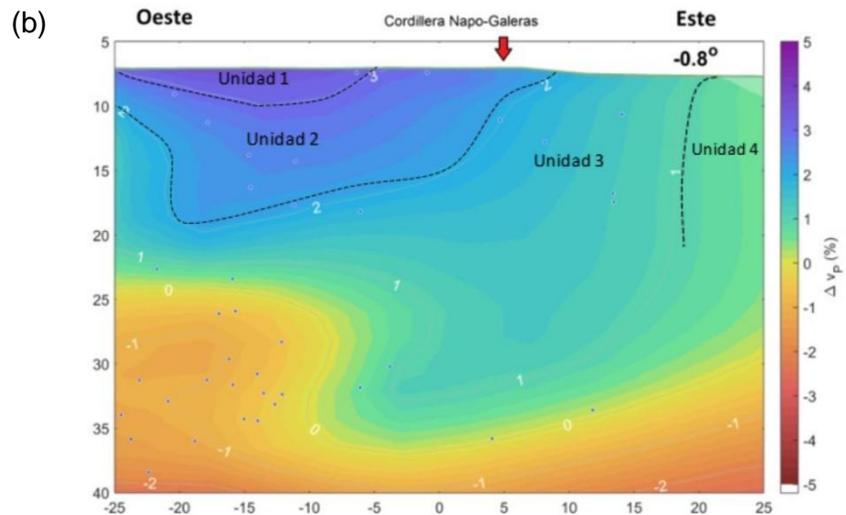
Figura 3: Modelo de velocidades sísmicas v_P/v_S . (a) primer corte, (b) segundo corte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte y (e) quinto corte.

Realizado por: Jiménez, 2023.

En el modelo de velocidades v_P/v_S se utiliza para identificar regiones magmáticas o freáticas. En el corte (a) del modelo de velocidades de v_P/v_S se puede observar que existe una anomalía magmática con velocidad de 1.78 km/s que disminuye desde el segundo corte conforme se ubique en dirección sur. Así mismo, se ha observado que entre los 7.5 km a 20 km de profundidad existen velocidades bajas de v_P/v_S . Se ubican al noreste, corte (a, donde se obtienen velocidades que comienzan en 1.6 km/s y que aumenta hacia los demás cortes a 6.8 km/s al oeste.

3.2. Modelo de velocidad sísmica relativo de v_P en la sección transversal E-O





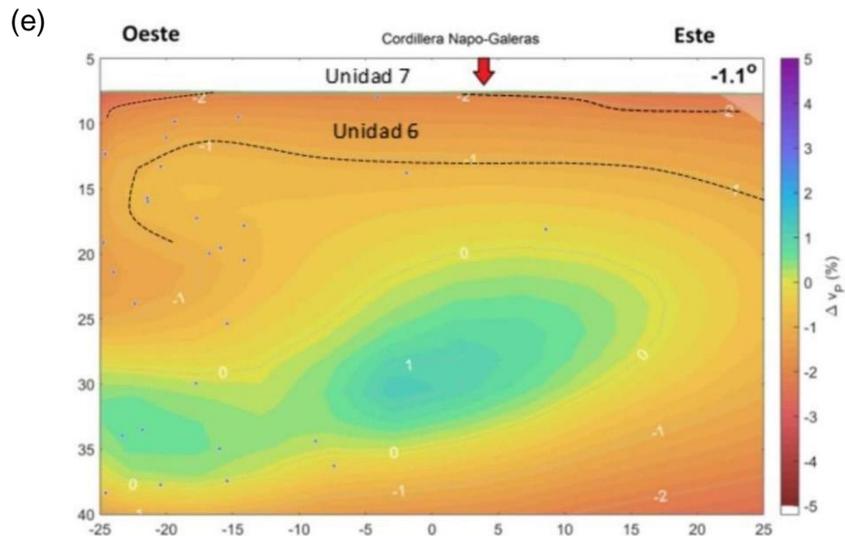


Figura 4: Modelo de velocidades relativas de vP en %; (a) primer corte, (b) segundo corte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte y (e) quinto corte.

Realizado por: Jiménez, 2023.

El modelo de velocidades relativas de vP determina la variación de velocidades laterales, donde se han observado que se extienden al este. Las líneas punteadas están definidas por las curvas de isovalores con diferentes velocidades, que, a su vez representan las unidades sismo-estratigráficas. No se tomaron en cuenta los isovalores de profundidades mayores a 15 km, puesto que algunas rocas, como son las ígneas, tienen una curva de fusión que comienza desde los 700 °C (Tarbuck & Lutgens, 2005) y no aportan en la identificación de unidades.

Se han identificado un total de ocho unidades sismo-estratigráficas a partir de sus rangos de velocidades. En el corte (a) se observaron las primeras cuatro; la unidad 0 representa el isovalor positivo más alto, sin embargo, no se lo han considerado para la identificación de las unidades al no tener relación con otros cortes del área de estudio. Las unidades 1, 2, 3 y 4 guardan relación con las unidades observadas en el corte (b). En el corte (c) se observan tres unidades, unidad 2, 3 y 4, al desaparecer la velocidad vP relativa del 2 %. En el corte (d) se volvió a observar cuatro unidades correspondientes: 2, 3 y 4 que ya se han observado anteriormente, y la unidad 5. En el corte (e), según el modelo de velocidades relativas vP, las unidades sismo-estratigráficas se encuentran relativamente horizontales, como no existe una diferencia de velocidades verticales, se identificará como una sola unidad, denominada “unidad 6” que se propaga hacia el este.

En la (Figura 5) se ha representado las velocidades relativas vP con sus respectivas

unidades sismo-estratigráficas que se han mencionado anteriormente. En este mapa se puede observar que los hipocentros (focos) se acumulan en su mayoría al oeste del área de estudio, coincidiendo con algunas fallas geológicas. Las fallas geológicas han sido obtenidas del Geoportal de IGME y nos ayudará a entender la sismicidad del área de estudio.

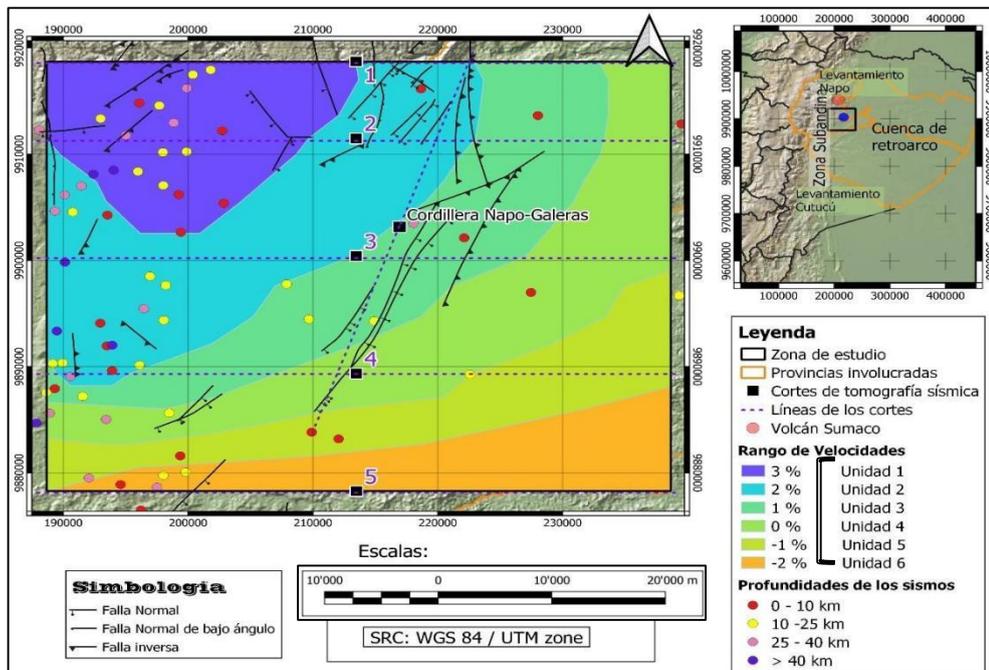
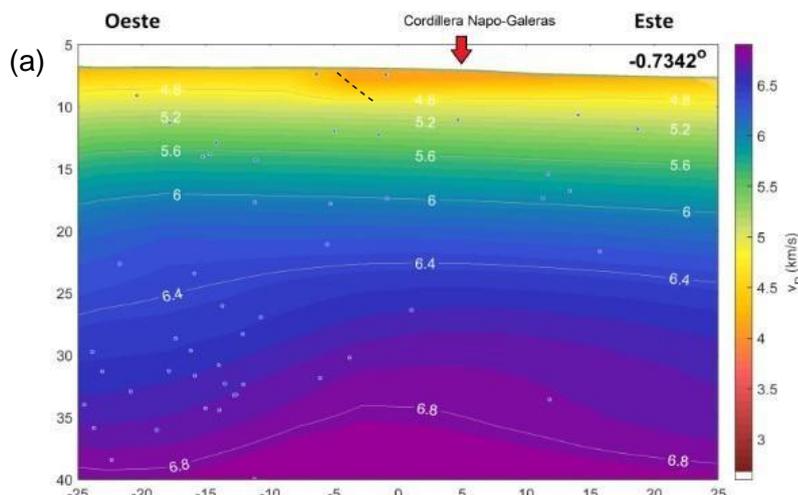
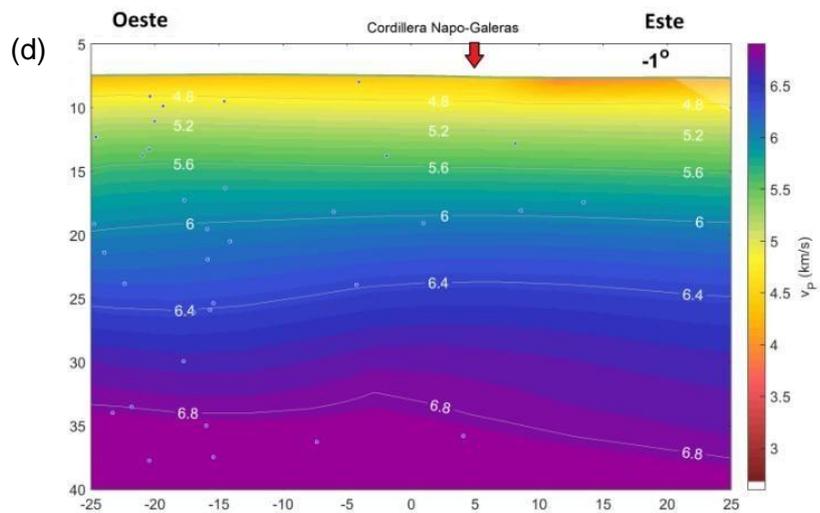
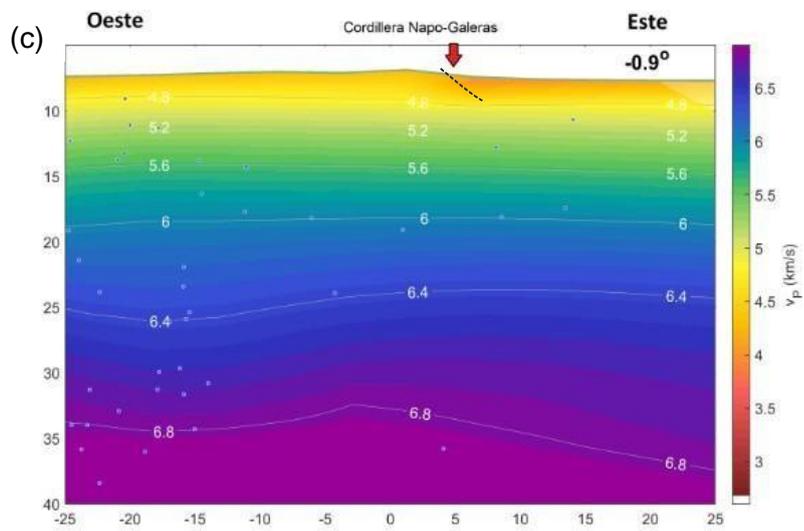
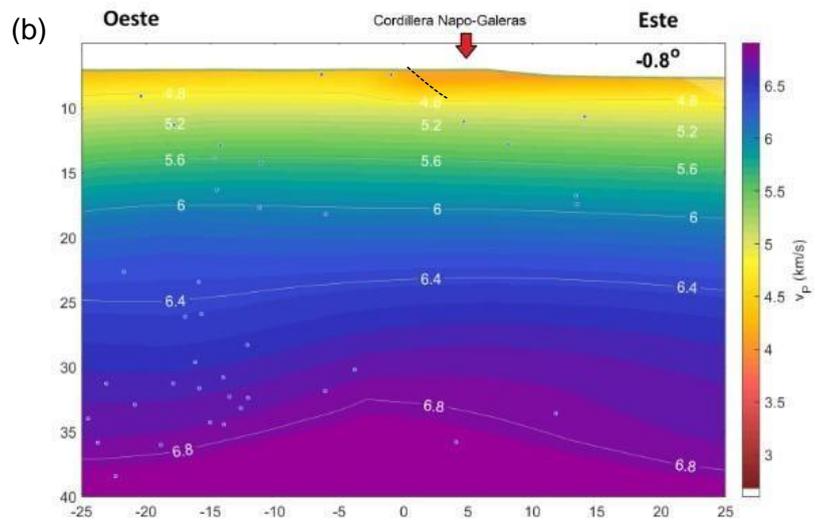


Figura 5: Mapa que representa el modelo de velocidades v_P/v_S , a una escala 1:250000 del área de estudio. Cortes realizados en INSIGHT con sus respectivas unidades sismo-estratigráficas.
Realizado por: Jiménez, 2023.

3.3. Modelo de velocidades sísmicas absolutas de la onda P (V_p) de la sección transversal E-O





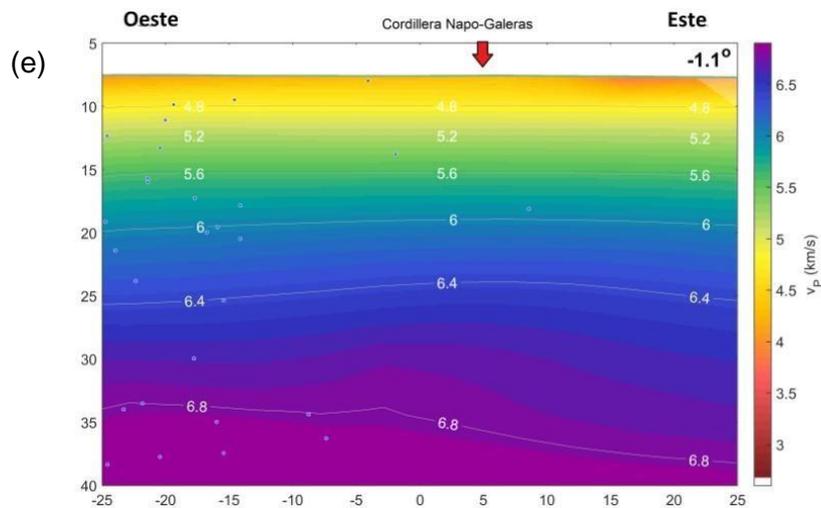


Figura 6: Modelo de velocidades sísmicas de velocidad P absoluta en km/s; (a) primer corte, (b) segundo corte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte y (e) quinto corte.

Realizado por: Jiménez, 2023.

En este modelo se observa un espesor aproximado de 25,25 km en la parte de cordillera Napo - Galeras. Se ha definido que a los 35 km se visualiza el MOHOroviic (Araujo, 2013), por consiguiente, el MOHO en el área de estudio comienza con el isovalor de 6.7 y aumenta su velocidad hacia el sur a 6.8. El modelo de velocidad de v_P permite conocer las variaciones de velocidad vertical y al mismo tiempo, el espesor de cada capa definido por su velocidad.

La primera capa tiene espesor ≈ 2 km, la segunda capa ≈ 3 km, la tercera capa ≈ 4 km, la cuarta capa ≈ 6 km y la quinta capa ≈ 8 km. Las dos últimas capas tienen formas convexas.

En este modelo también se puede observar que entre la profundidad de 7.5 km a 10 km existe una estructura con velocidad menor a 4.5 km/s, representada con color anaranjado. La estructura se encuentra en la parte lateral derecha de la cordillera Napo - Galeras corte (c). Hacia el norte, la estructura se ubica a la izquierda (a) y (b), y al sur hacia la derecha, pero ésta no tiene conexión con la cordillera.

La baja resolución observada a los 20 km desde el punto de referencia (0), se debe a que existe una discontinuidad al estar próxima al límite de los datos tomográficos.

3.4. Modelo de velocidades vP/vS , vP absoluto y vP relativo en el corte transversal N-S de la parte sur de la cordillera Napo – Galeras.

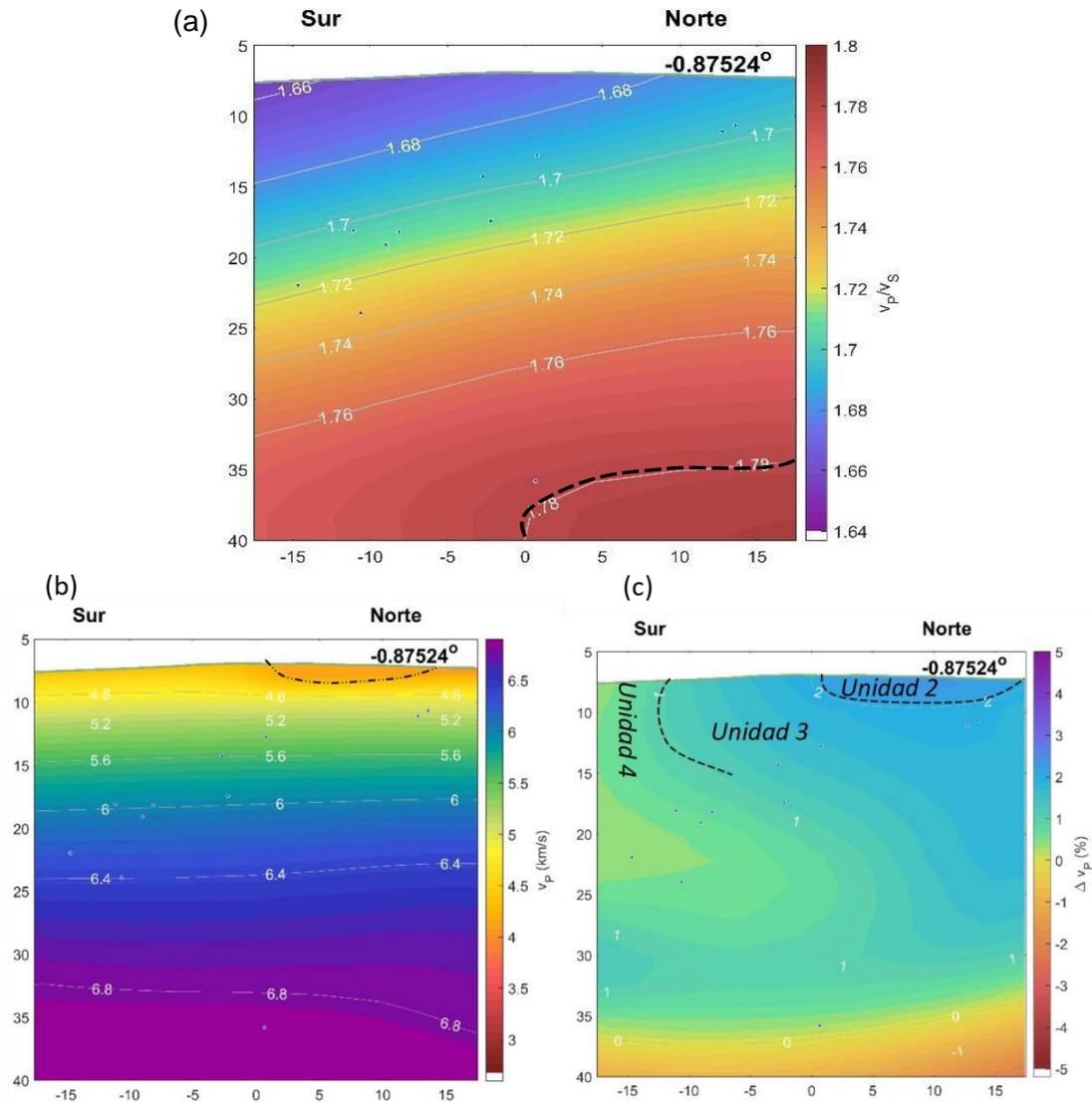


Figura 7: Modelo de velocidades sísmicas de la cordillera Napo-Galeras. a) Modelo de velocidades vP/vS , b) $P(vP)$ y c) variación $P(vP)$ de la cordillera Napo-Galeras. **Realizado por:** Jiménez, 2023.

Los modelos vP/vS , vP absoluto y vP relativo fueron obtenidos en un fragmento de la cordillera Napo-Galeras, en dirección Norte a Sur y con inclinación de 20° . En el modelo vP/vS se muestra que existe una anomalía magmática de 1.78 km/s hacia el norte, relacionado con los cortes transversales (a) y (b) que anteriormente se describieron. En el modelo vP absoluto se puede observar que en superficie existe una menor velocidad, de alrededor de 4 km/s, ubicada entre las distancias entre 0 a 15 km dirección noreste. En el modelo de vP relativo hubo dos líneas de isovalores correspondientes a tres unidades sismo-estratigráficas: desde el norte, unidad 2, unidad 3 y hacia el sur, la unidad 4.

4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Modelo de velocidades vP/vS en la sección transversal E-O

Se muestra una anomalía magmática alta en los dos primeros cortes (a y b) que aumenta hacia el Norte. Se considera una anomalía el valor 1.78 ya que es elevado a comparación de los demás representados en este modelo de velocidades. La velocidad de las ondas sísmicas vP/vS tiende a aumentar con la profundidad como resultado del aumento de presión al comprimir la roca, transformándose en un material elástico más compacto (Tarbuck & Lutgens, 2005; Venerdini et al., 2016). Este comportamiento se constata en las zonas cercanas a la anomalía magmática, con valores de velocidad mayores a 1.7 km/s.

Se deduce que en las profundidades del área de estudio se conecta con la cámara magmática del volcán Sumaco ya que, por una parte, es el volcán más próximo a la cordillera, con una distancia de 13.5 km desde el punto inicial de referencia (figura 1). Por otro lado, Guamán (2020), concluye que la cámara magmática principal ubicada debajo del volcán Sumaco es ligeramente compartida con los volcanes extintos Pan de Azúcar y Yanaurco (últimos volcanes del sur de la zona Volcánica del Norte, sus siglas en inglés NVZ, sobre el retroarco del Ecuador). Tanto las anomalías magmáticas del área de estudio como la ubicación de la cámara magmática del volcán Sumaco se encuentra entre los 35 km a 60 km de profundidad.

Por otra parte, según el artículo de Doi, Noda, Iio, & Shigeki (2013), las velocidades bajas de vP/vS corresponden a un área o áreas donde existen limitados hipocentros. Esto se puede corroborar con las tomografías sísmicas del modelo de velocidad vP/vS donde al este, los sismos son escasos y están estrechamente relacionados con las limitaciones de sismógrafos localizados al este de la Cuenca Oriente.

En otro estudio de Zhao, Zhang, Bai, Badal, & Zhang (2013), donde los resultados obtenidos a profundidades de 8 km a 14 km, las velocidades vP/vS eran bajas, debido a la depresión “Huiyuan” en el margen sur de China. Con características similares se puede observar en dirección noroeste del área de estudio que continúa al suroeste. Por otro lado, los valores altos del modelo vP/vS están relacionados con el levantamiento de una estructura. En nuestro caso son consistentes con el

Levantamiento Napo, donde surge la Cordillera Napo - Galeras que incluye al volcán Sumaco, ubicado en el centro de la cordillera.

4.2. Modelo de velocidad sísmica relativo de v_P en la sección transversal E-O

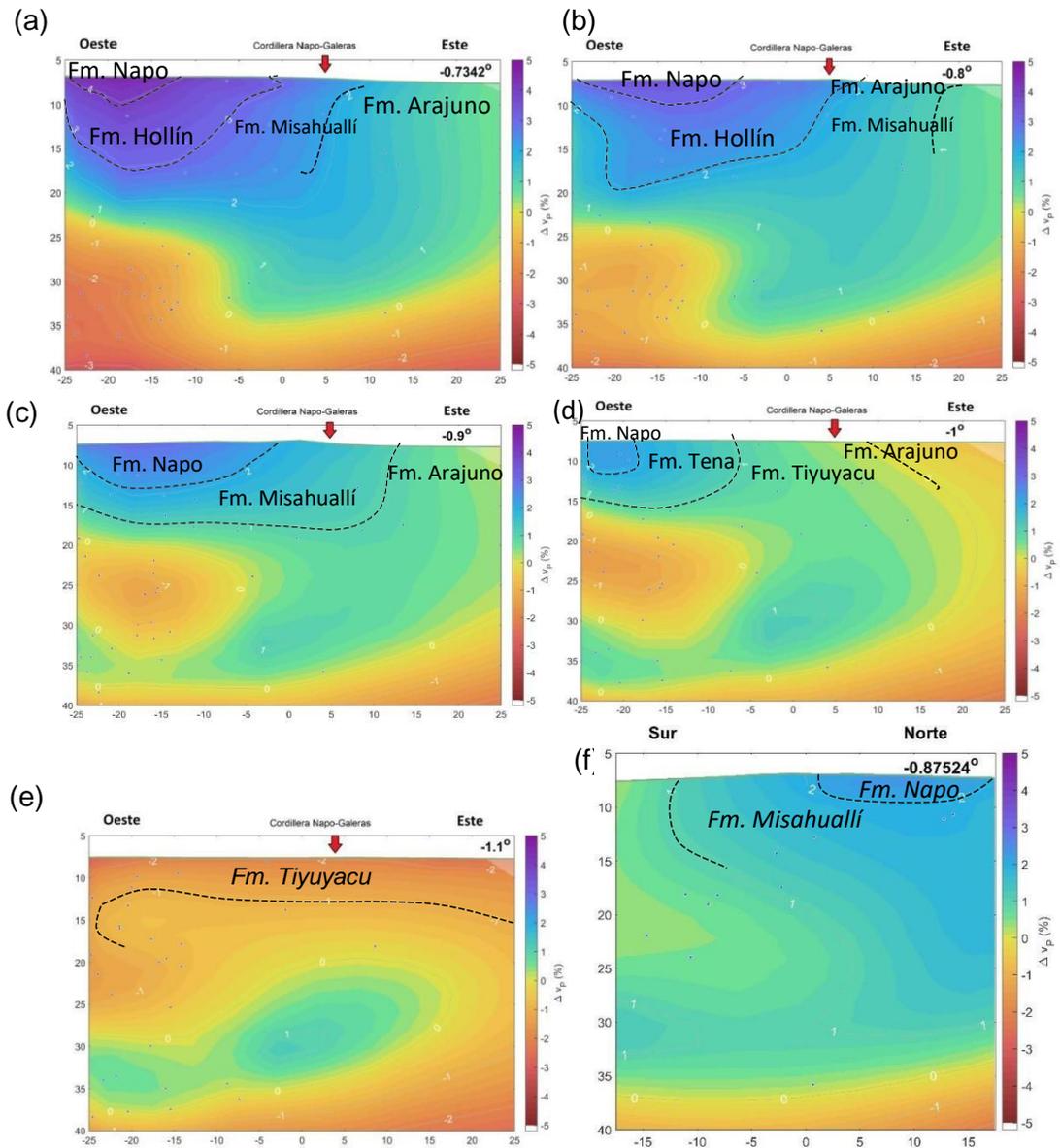


Figura 8: Interpretación de las unidades sismo-estratigráficas a partir del modelo relativo de v_P en porcentaje de variación; (a) primer corte, (b) segundo corte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte, (e) quinto corte y (f) en dirección a la cordillera.

Realizado por: Jiménez, 2023.

En la (figura 8), se interpreta que las unidades sismo-estratigráficas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 corresponden a las formaciones Fm. Napo, Fm. Hollín, Fm. Misahuallí, Fm. Tena, Fm. Tiyuyacu y Fm. Chalcana. Éstas interpretaciones se basan en la comparación de un mapa geológico actual con las unidades sismo-estratigráficas obtenidas, para así

identificarlas lo más cercanamente posible. También se ha interpretado que existe una verticalidad de las formaciones Tena y Tiyuyacu al observar que se empiezan a formar desde el corte (c), se aprecian con mayor facilidad en el corte (d) y desaparecen en el corte (e). Este modelo de velocidades permite identificar una discordancia angular entre las formaciones cretácicas inferior y las cretácicas superior, así mismo, entre las formaciones cretácicas y cuencas sedimentarias del Paleógeno.

A continuación, se realizará una síntesis sobre las formaciones correspondientes a la zona de estudio:

- Unidad 1 - Fm. Napo (Albiano Superior al Campaniano): Se infiere que el área de estudio está asociado al ciclo I correspondiente a la Fm. Napo Inferior.
- Unidad 2 - Fm. Hollín (Albiano): Según datos sísmicos de la bibliografía, esta capa se adelgaza rápidamente hacia el noreste (figura 5). Se determinaron velocidades relativas v_P que aumentan al este del área de estudio, dónde se interpreta que pueden estar asociadas a las rocas porosas presentes el miembro Hollín Principal.
- Unidad 3 - Fm. Misahuallí (Jurásica al cretácico temprano): En el área de estudio, se evidencia un levantamiento NNE-SSO de la Fm. Misahuallí, que moldea la cordillera Napo – Galeras. El vulcanismo presente en la Fm. Misahuallí es calcoalcalino (Barragán & Baby, 2004).
- Unidad 4 - Fm. Tena (del Maastrichtiano al Paleógeno): Vallejo y otros (2021) indican que sus litologías llenan canales (abanicos aluviales con ríos asociados y a planicies de inundación) y son depósitos de desbordamiento.
- Unidad 5 - Fm. Tiyuyacu (Eoceno): Su base corresponde a una superficie de erosión regional, el afloramiento de la Fm. Tiyuyacu se encuentran principalmente en el hundimiento del Levantamiento Napo observado en la (figura 5).
- Unidad 6 – Fm. Chalcana (Oligoceno superior a mioceno): Está formada por sedimentos continentales y asociada a ambientes de llanura de inundación. Se sobrepone a la Fm. Tena y es la base de depositación de formaciones neógenas (Baby, Rivadeneira & Barragán, 2004).

4.3. Interpretación de modelo de velocidad sísmica de v_P absoluto

Este modelo se interpreta como un adelgazamiento litosférico que es más pronunciado en el norte del área de estudio, parte central y norte de la cordillera Napo - Galeras. Este adelgazamiento o estiramiento es producto del levantamiento tectónico Napo (Bés de Berc et al., 2004), identificado como un horst. El horst es una estructura

correspondiente a un levantamiento, la unidad sismo-estratigráfica mayormente involucrada en este proceso es la 3 que corresponde a la Fm. Misahuallí y que, posiblemente involucre también a la Fm. Hollín principal. Ambas se encuentran en el levantamiento favorecido por las fallas que las atraviesan desde el Mio-Plioceno (Vallejo et al, 2022), y se asume que tiene el mismo comportamiento hacia el norte donde culmina la cordillera. Por otro lado, el graben es una estructura que se refiere a la parte “hundida”, en la zona de estudio corresponde a las unidades sismo-estratigráficas 1 y 2 interpretadas como la Fm. Napo y Fm. Hollín Superior. Estas unidades forman parte del periclinal del levantamiento/cordillera Napo - Galeras, donde se desarrolla la Cantera de Pungarayacu (Rivareneira & Baby, 2004).

La velocidad menor a 4.5 km/s que se encuentra al norte del corte de la cordillera Napo - Galeras, con espesor alrededor de 10 km, tiene la velocidad más baja con respecto a otras estructuras encontradas en este modelo. En este mismo sitio, en el modelo de velocidades vP/vS se graficó un isovalor intermedio (1). Si nos basamos a lo que sugiere (Kurashimo & Hirata, 2004), al tener ambos valores negativos y situado en ese espesor, se infiere que en la estructura se presencia rocas ígneas de la Fm. Misahuallí.

4.4. Interpretación sísmica en el área de estudio

Según el artículo publicado por Beauval y otros (2013), muestra el catálogo sismológico del Ecuador que representa al área de estudio con sismos de baja magnitud y profundidad. El catálogo describe magnitudes que varían desde 3.0 a 4.6 que son clasificados como leves movimientos. Por otro lado, según los estudios obtenidos por Parra (2016), el área de estudio se encuentra registrado con un peligro sísmico en términos de aceleración pico (PGA) con magnitud aproximada de 0.35 a 0.3 en un $T_r= 475$ años, 0.4 a 0.35 en un $T_r= 975$ años y 0.5 a 0.4 en un $T_r=2475$ años , es considerada como amenaza sísmica leve.

Según la bibliografía de Ferrari & Tibaldi (1992) y lo observado en la (figura 1) la mayoría de las fallas rectilíneas NNE-SSW son inmaduras, no se conectan entre sí, y ejercen un pequeño control sobre la red de drenaje. En la parte alta de cordillera Napo - Galeras, ubicada en el área de estudio, se pueden observar fallas normales e inversas con dirección NNE-SSW de mayor longitud a comparación de las demás. En consecuencia, las formaciones presentes: Fm. Hollín y Fm. Misahuallí sufrieron una

inversión tectónica producto de los esfuerzos extensivos generados por las fallas normales, donde luego existió una reactivación de la falla por esfuerzos compresivos que originó el anticlinal que se constata en la cordillera Napo – Galeras.

5. CONCLUSIONES

La tomografía sísmica permitió conocer la orogénesis de la cordillera Napo-Galeras. Se ha evidenciado que la Fm. Misahuallí y parte de la Fm. Hollín sufrieron una inversión tectónica producto de los esfuerzos extensivos generados por las fallas normales con dirección NNE-SSW, donde luego existió una reactivación de la falla por esfuerzos compresivos que originó el anticlinal que se constata en la cordillera Napo – Galeras. El levantamiento tectónico Napo del área de estudio es evidenciado por el modelo de velocidades v_P y v_P/v_S , el horst corresponde principalmente a la formación Misahuallí y los grabens corresponden a las formaciones Napo y Hollín, de los cuales forman parte del periclinal de la Cantera de Pungarayacu.

Los modelos de velocidades v_P/v_S y v_P relativo han sido útiles para demostrar que la cordillera Napo - Galeras comparte la cámara magmática que se encuentra en el volcán Sumaco y para la interpretación de las 6 unidades sismo-estratigráficas: Fm. Napo, Fm. Hollín, Fm. Misahuallí, Fm. Tena, Fm. Tiyuyacu y Fm. Chalcana.

La sismicidad en el área de estudio es leve y, aparentemente no representa una amenaza. Es apresurado concluir de esta forma ya que no existen los suficientes sismógrafos localizados dónde se adquieran datos de las velocidades sísmicas que nos ayuden a tener una visión amplia sobre la amenaza sísmica. Sin embargo, el área de estudio está atravesada en su mayoría por fallas rectilíneas discontinuas que son inmaduras.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, T. (1992). Estudio regional de la formación Tiyuyacu. *Tesis de grado*, Universidad Central del Ecuador. Obtenido de Estudio regional de la Formación Tiyuyacu.
- Araujo, S. (2013). EL MOHO EN ECUADOR. *La Granja*, 43-47.
- Araujo, S., Valette, B., Potin, B., & Ruiz, M. (2021). A preliminary seismic travel time tomography beneath Ecuador from data of the national network. *South American Earth Sciences*, Volumen111, 103486.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo*. Lima: "Travaux de 'Institut Français d'Études Andines".
- Baby, P., Rivadeneira, M., Christophoul & Barragán, R. (1999). Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador. *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo*. Lima: "Travaux de 'Institut Français d'Études Andines", 68-72.
- Barragán, R., & Baby, P. (2004). EVOLUCIÓN MAGMÁTICA ACTUAL DE LA ZONA SUBANDINA: VOLCANES EL REVENTADOR Y SUMACO, MODELOS GEODINÁMICOS PRELIMINARES. *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo*, 183-201.
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., . . . Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 2A, pp. 773– 786.
- Bés de Berc, S., Baby, P., Soula, J.-C., Rosero, J., Souris, M., Vega, J., & Christophoul, F. (2004). La superficie Mera-Upano: marcador geomorfológico de la incisión fluvial y del levantamiento tectónico de la Zona Subandina ecuatoriana. En P. BABY, M. RIVADENEIRA, & R. BARRAGÁN, *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (págs. 153-167). Lima: Institut français d'étude.
- Brito, S. (1985). *Geología del cuadrangulo 77° 45' 78°00' de longitud oeste y 01°10' -01°10' de latitud sur, escala 1:50.000 (área aproximada: 500 km², localizada en Puerto Napo, provincia de Napo*. Obtenido de DSpace ESPOL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/3442>
- Christophoul, F., Burgos, J., Baby, P., Soula, J.-C., Bes de Berc, S., Dávila, C., . . . Rivadeneira, M. (2003). DINÁMICA DE LA CUENCA DE ANTE-PAÍS ORIENTE DESDE EL PALEÓGENO. *Cuenca Oriente: Geología y petróleo*, 93-113.
- Doi, I., Noda, S., Iio, Y., & Shigeki, S. (2013). Relationship between hypocentral distributions and Vp/Vs ratio structures inferred from dense seismic array data: a case study of the 1984 western Nagano Prefecture earthquake, central Japan. *Geophysical Journal International*, Vol195; 1323 –1336.
- Don, A., & Dziewonski, A. (1984). Seismic Tomography. *Scientific American*, 251(4), 60–71.
- Ferrari, L., & Tibaldi, A. (1992). Recent and active tectonics of the north-eastern Ecuadorian Andes. *J. Geodynamics*, Vol. 15, No. 1/2, pp. 39-58.
- Geoportal de IGME (online). Descarga temática. Obtenido de: <https://www.geoportaligm.gob.ec/geoinformacion/index.html>.
- Guamán, A. (9 de Diciembre de 2020). *Estudio de la cámara magmática principal del volcán*. Obtenido de Repositorio Digital Ikiam: Trabajo de titulación: https://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/handle/RD_IKIAM/559
- Hernandez, G. (2011). *Métodos para obtener modelo de velocidades para la conversión tiempo-profundidad*. Obtenido de Instituto Politecnico Nacional de Ticoman: <https://tesis.ipn.mx/>
- Kurashimo, E., & Hirata, N. (2004). Low Vp and Vp/Vs zone beneath the northern Fossa Magna basin, central Japan, derived from a dense array observation. *Earth, Planets and Space*, Vol 56; 1301–1308.
- MAGAP. (2005). Obtenido de Archivos de información geográfica: <https://sni.gob.ec/coberturas>
- Nieto, A. (2000). Geología general del nororiente del Ecuador. En H. Minard, *Los terremotos del Ecuador*

de 5 de marzo de 1987 (págs. Volumen 9; 19-37). Quito: Cooperación Editora Nacional.

- Paredes, C., & Araujo, S. (2021). The use of seismic tomography to describe the upper crustal structure beneath the Chalupas Caldera, Ecuador. *REM - International Engineering Journal*, 74(2).
- Parra Cárdenas, H. (2016). *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito*. Obtenido de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/2465>
- Rinaldi, V., Ibarra, H., Viguera, R., & Harasimiuk, J. (2016). Aplicación de la tomografía sísmica para la detección de fallas estructurales en una formación terciaria. *FCEFYN*, Volumen 3; 45-51.
- Rivareneira, M., & Baby, P. (2004). CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS GENERALES DE LOS PRINCIPALES CAMPOS PETROLEROS DE PETROPRODUCCIÓN. En M. Rivareneira, P. Baby, & B. Roberto, *Cuenca Oriente: geología y petróleo* (págs. 229-297). Lima.
- Romero, C., Rivadeneira, M., Calderon, E., Naranjo, M., Meneses, M., Gramal, A., & Toainga, S. (2019). Reconstruyendo el pasado del planeta: El registro estratigráfico y sedimentológico de la Formación Tena en la carretera Tiwintza – Puerto Morona. *GEO Latitud*, ISSN: 2661-6998.
- Ruiz, G., Seward, D., & Winkler, W. (2007). Chapter 36 Evolution of the Amazon Basin in Ecuador with Special Reference to Hinterland Tectonics: Data from Zircon Fission-Track and Heavy Mineral Analysis. *Developments in Sedimentology*, Capítulo 36, pp 908 - 934.
- Sempere, T., Jacay, J., Pino, A., Bertrand, H., Carlotto, V., Fornari, M., . . . Soler, P. (2004). ESTIRAMIENTO LITOSFÉRICO DEL PALEOZOICO SUPERIOR AL CRETÁCEO MEDIO EN EL PERÚ Y BOLIVIA. *Publicación Especial SGP N°5*, 45-79.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Capítulo 4: Rocas ígneas. En *Ciencias de la Tierra* (págs. 122-124). Madrid: Pearson Educación S. A.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ondas sísmicas y estructura de la Tierra. En *Ciencias de la Tierra* (págs. 342-343). Madrid: Pearson Education.
- Tibaldi, A., & Ferrari, L. (1992). Latest Pleistocene-Holocene tectonics of the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, Vol: 205, pp 109-125.
- Vallejo, C., Romero, C., Horton, B., Spikings, R., Winkler, W., Esteban, J. J., . . . Mariño, E. (2021). Jurassic to Early Paleogene sedimentation in the Amazon region of. *Global and Planetary Change*, Volumen 204, 103555.
- Vargas Meleza, L., & Valle Molina, C. (2012). Avances y aplicaciones en física de rocas para exploración de hidrocarburos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIII (número 4):439-450.
- Venerdini, A., Sánchez, G., Alvarado, P., Bilbao, I., & Ammirati, J. B. (2016). Nuevas determinaciones de velocidades de ondas P y ondas S para la corteza sísmica del terreno Cuyania en el retroarco andino. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(1), 59-71.
- Zhao, B., Zhang, Z., Bai, Z., Badal, J., & Zhang, Z. (2013). Shear velocity and Vp/Vs ratio structure of the crust beneath the southern margin of South China continent. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol 62; 167 - 179.