

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

**TOMOGRFÍA SÍSMICA DEL BATOLITO DE ABITAGUA EN LA
ZONA SUB ANDINA DEL ECUADOR**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR: DENNYS LEANDRO CHALCO ORTEGA

TUTOR: PhD. JOSÉ SEBASTIÁN ARAUJO SORIA

Napo – Ecuador

2023

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Dennys Leandro Chalco Ortega con documento de identidad N°1718510348, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

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

Tena, 12 de mayo de 2023



Dennys Leandro Chalco Ortega

C.I: 1718510348

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, DENNYS LEANDRO CHALCO ORTEGA, con documento de identidad N° 0803587922, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: TOMOGRAFÍA SÍSMICA DEL BATOLITO DE ABITAGUA EN LA ZONA SUB ANDINA DEL 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, 12 de mayo de 2023



Dennys Leandro Chalco Ortega

C.I: 1718510348

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: "Tomografía sísmica del Batolito de Abitagua en la Zona Sub Andina del Ecuador", en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: Dennys Leandro Chalco Ortega, 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, 12 de mayo de 2023



José Sebastián Araujo Soria

C.I: 1802672871

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis agradecimientos a mis padres Edgar y Dalin, quienes junto a mis hermanos Adriana y Mathias han sido mi mayor motivación, brindándome su apoyo y motivación mientras me encontraba en formación.

Adicionalmente, a los profesores de la carrera de Geociencias que fueron parte de mi preparación profesional y desarrollaron mi gusto por las Ciencias de la Tierra. En especial a mi tutor, el PhD. Sebastián Araujo que fue mi mayor guía en la elaboración del presente trabajo y estuvo presente en el transcurso de mi carrera.

De igual manera a mis amigos, por haber hecho que mi estancia en la universidad fuera diferente, acompañado de su apoyo incondicional, y por todos los momentos que hemos compartido.

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado para mis padres y hermanos que han estado presente en mi formación. A mis profesores que fueron los pilares fundamentales en este camino y también para los amantes de las Ciencias de la Tierra que lean el presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD.....	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CONTEXTO GEOLÓGICO.....	3
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Modelo matemático del algoritmo del software INSIGHT	5
Obtención de cortes tomográficos	6
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	7
CONCLUSIONES	15
REFERENCIAS	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de elevación del área de estudio en el cual se superpone el mapa geológico modificado a partir de Eguéz et al., (2017).....	3
Figura 2. Modelos ΔVp (a,d,g) con valores porcentuales, Vp (b,e,h) con valores en km/s, $VpVs$ (c,f,i) con valores adimensionales de las secciones AA', BB', CC'.....	8
Figura 3. Modelos ΔVp (a,d,g) con valores porcentuales, Vp (b,e,h) con valores en km/s, $VpVs$ (c,f,i) con valores adimensionales de las secciones DD', EE', FF'.....	9
Figura 4. Modelos ΔVp (a) con valores porcentuales, Vp (b) con valores en km/s, $VpVs$ (c) con valores adimensionales de la sección GG'.....	10

RESUMEN

El Batolito de Abitagua es un cuerpo intrusivo de edad Jurásica media a tardía localizado en la Zona Sub Andina, al este de la falla de Cosanga. Se cree que las intrusiones más jóvenes del batolito estarían relacionadas a la presencia de oro aluvial en ríos que drenan del mismo. Por lo cual, el objetivo del presente estudio es estudiar el Batolito de Abitagua usando la inversión de datos sísmicos para desarrollar modelos de velocidades V_p , ΔV_p , V_p/V_s con el software INSIGHT, basado en los datos del RENSIG. Mediante los modelos V_p y ΔV_p se pudo describir detalles tanto verticales como horizontales del batolito, mientras que con el modelo V_p/V_s se pudo inferir anomalías relacionadas a reservorios magmáticos. Adicionalmente, se graficaron los eventos sísmicos dentro de 12 km paralelos a los cortes tomográficos para analizar patrones relacionados al ascenso de magma vinculado a intrusiones. Los resultados principales muestran una buena correlación con la geología del sitio. Además, permiten identificar dos reservorios magmáticos bajo el batolito que posiblemente tengan relación con las intrusiones relacionadas a los depósitos de oro aluvial, los cuales parecen aflorar cerca de la zona de transición entre anomalías ΔV_p negativas y positivas ubicada a 5km al norte del río Jatunyaku.

Palabras clave: tomografía sísmica, batolito de Abitagua, intrusiones, reservorio magmático, pórfido aurífero.

ABSTRACT

The Abitagua Batholith is an intrusive body of medium to late Jurassic age located in the Sub Andean Zone, east of the Cosanga fault. It is theorized that the younger intrusions of the batholith are related to the presence of alluvial gold in rivers that drain from it. Therefore, the objective of this paper is to study the Abitagua Batholith using seismic data inversion to develop velocity models of V_p , ΔV_p , V_p/V_s with INSIGHT software, based on data from RENSIG. Using the V_p and ΔV_p models, both vertical and horizontal details of the batholith could be described, while the V_p/V_s model could infer anomalies related to magmatic reservoirs. Additionally, seismic events within 12 km parallel to the tomographic sections were plotted to analyze patterns related to the ascent of magma linked to intrusions. The main results show a good correlation with the geology of the site. Moreover, they allow for the identification of two magmatic reservoirs beneath the batholith that may be related to the intrusions associated with alluvial gold deposits, which seem to outcrop near the transition zone between negative and positive ΔV_p anomalies located 5 km north of the Jatunyaku river.

Keywords: seismic tomography, Abitagua Batholith, intrusions, magmatic reservoir, auriferous porphyry.

Para ser enviado a: Revista de la Asociación Geológica Argentina

Tomografía sísmica del Batolito de Abitagua en la Zona Sub Andina del Ecuador

Dennys Chalco¹, Sebastián Araujo¹

- ^{1.} Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua, Universidad Regional Amazónica Ikiám, Tena, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país que se encuentra en una zona de convergencia entre la placa oceánica Nazca y la placa continental Sudamericana, dicha subducción empezó en el Jurásico Inferior. Esto resultó en deformaciones a nivel continental, además de un aumento en la sismicidad y vulcanismo (Bilek, 2010) a través de reservorios de magma que se encuentran ubicados cerca del MOHO, producidos por la fusión parcial relacionada a la subducción (Michaud et al., 2009). Posteriormente, se dio el extenso arco continental calco – alcalino de Misahuallí en el Jurásico Medio, en donde se destaca la intrusión de los batolitos tipo I.

El Batolito de Abitagua (Figura. 1) fue descrito por primera vez por Colony y Sinclair (1932) mientras se estudiaban las rocas ígneas y metamórficas del este del Ecuador. Representa una zona poca estudiada ya que es catalogada como una zona de difícil acceso. Adicionando que, se encuentra a lo largo de las zonas protegidas Reserva Colonso-Chalupas y Parque Nacional Llanganates. En consecuencia, algunas investigaciones realizadas del batolito provienen de muestras tomadas en las orillas de los ríos y zonas donde el acceso es relativamente más fácil (Litherland et al., 1994). Adicionalmente, en un reporte de J. Aspden et al. (1990) donde se describe la geología y el potencial mineral de la Cordillera Real en Ecuador, se descubrió oro en muestras tomadas de ríos que drenan exclusivamente al Batolito de Abitagua, catalogando su origen como “desconocido” por falta de evidencias. Sin embargo, una hipótesis mencionada en el mismo estudio asocia como fuente de dicho oro aluvial a algunas intrusiones más jóvenes que forman parte del Batolito de Abitagua. Razón por la cual, para estudiar el Batolito de Abitagua se propone el uso de un método indirecto que permita realizar un estudio a gran escala como es la tomografía sísmica.

La tomografía sísmica pasiva es la principal técnica geofísica, ampliamente utilizada y considerada como un potente método para investigar la estructura interna de la Tierra, esto se logra analizando diferentes modelos de velocidades en áreas con elevada sismicidad (Thurber & Ritsema, 2015). Tiene como inicio el registro de ondas sísmicas provenientes de terremotos en estaciones cercanas a la superficie, por consiguiente, la efectividad de esta técnica depende de la distribución de los terremotos y la cantidad de estaciones sísmicas disponibles (Romanowicz, 2021).

El objetivo del presente trabajo es estudiar el Batolito de Abitagua a través de modelos sísmicos de velocidades (V_p , ΔV_p , V_p/V_s) a partir de la inversión de los datos de tiempo de viaje proporcionados por la RENSIG (Red Nacional de Sismógrafos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador). Los modelos ΔV_p permiten diferenciar al Batolito de Abitagua de las litologías aledañas. Así mismo, los modelos V_p posibilitan delimitar al batolito en profundidad y señalar el MOHO en los diferentes cortes tomográficos. Además, el análisis de los modelos V_p/V_s permite encontrar anomalías sísmicas, las cuales, en conjunto con la sismicidad, permitan interpretar mecanismos que sugieran vías de escape de fluidos provenientes de reservorios de magma que se encuentren formando intrusiones dentro del batolito.

Para elaborar los modelos de velocidades de este estudio, se usaron los datos pre procesados de Araujo (2016). Los mismos que fueron recopilados por la RENSIG. Los datos constan de 45,941 eventos sísmicos con una magnitud mayor que 2.5, lo cuales, se registraron desde 1988 hasta el 2016 mediante 256 estaciones sísmicas ubicadas a lo largo del territorio ecuatoriano.

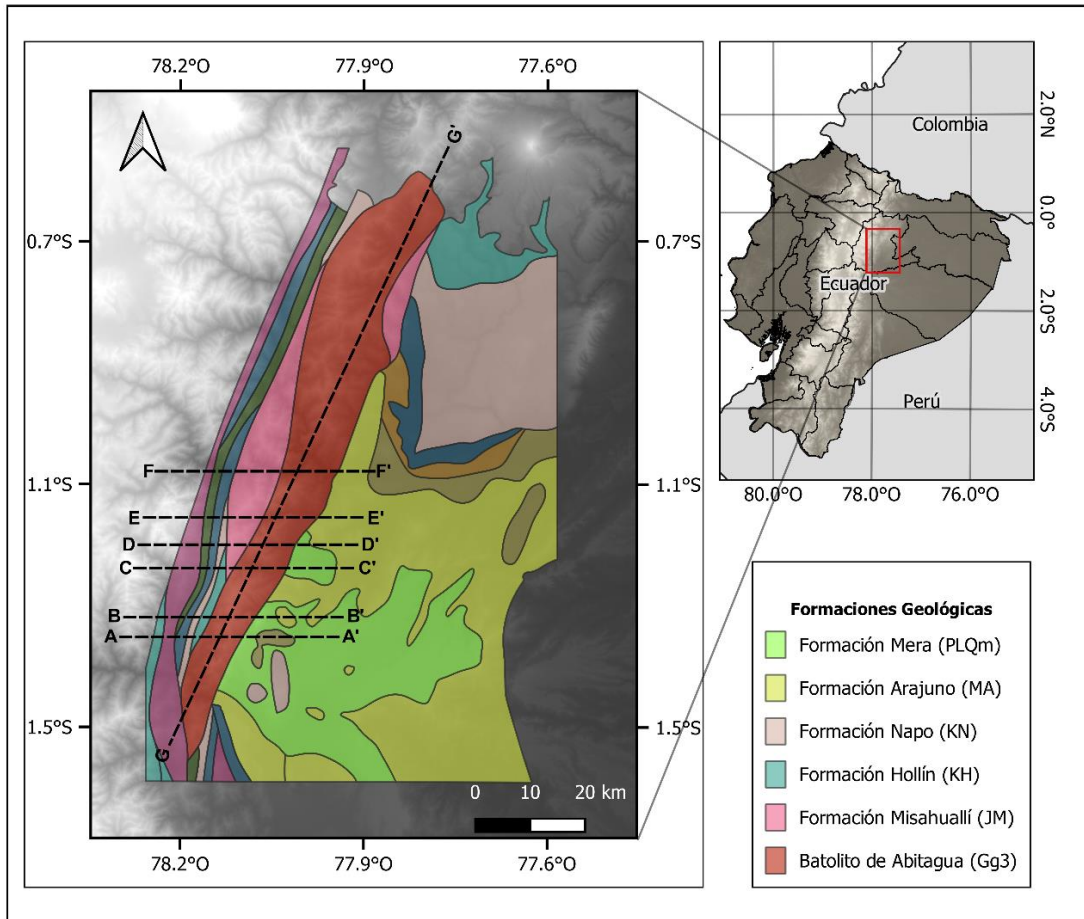


Figura 1. Modelo de elevación del área de estudio en el cual se superpone el mapa geológico modificado a partir de Eguéz et al., (2017).

Se muestran las principales formaciones geológicas: Formación Mera (PLQm), Formación Arajuno (MA), Formación Napo (KN), Formación Hollín (KH), Formación Misahuallí (JM), Batolito de Abitagua (Gg3). Además, con líneas entrecortadas se marcan los cortes tomográficos realizados. Los cortes AA', BB', CC', DD', EE', FF' tienen un acimut de 90° y el corte GG de 25°.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La Cuenca Amazónica, ubicada en la región del Amazonas ecuatoriano, se subdivide en dos zonas geomorfológicamente distintas: hacia el oeste se encuentra una zona montañosa conocida como Zona Sub Andina o zona de tras arco, mientras que hacia el este se encuentra una región llana comúnmente conocida como la región Oriente (Ruiz, 2002).

La Zona Sub Andina ha sido sometida a deformación como consecuencia de la inversión tectónica relacionada al sistema de "rift" Tetiano Triásico Superior-Jurásico inferior

(Baby et al., 2004). Por consecuente, se estructura por fallas inversas con orientación N-S a NNE- NNW (Bès de Berc et al., 2016). Se encuentra conformado por tres unidades morfo-tectónicas enlistadas de norte a sur (Bès de Berc et al., 2016): Levantamiento de Napo, la Depresión de Pastaza y la Cordillera de Cutucú.

El Batolito de Abitagua se ubica en la Zona Sub Andina, específicamente, al este de la falla de Cosanga (Litherland et al., 1994) y su composición se describe como monzogranito de biotita rosa, de grano medio o grueso a granito de biotita megacrística de feldespato K (Litherland et al., 1994). Asimismo, constituye parte del basamento de la Zona Sub Andina y representa el relieve no volcánico más alto del norte de la Zona Sub Andina con una elevación de 2700 msnm aproximadamente, alrededor de 120 km de largo y entre 12 a 15 km de ancho (Litherland et al., 1992).

Algunos estudios geoquímicos como dataciones, reportan la edad del batolito de 173 ± 5 Ma Rb/Sr (Hall & Calle, 1982) y 178 ± 7 Ma K/Ar (Herbert & Pichler, 1983), es decir, se encuentra relacionado con los periodos magmáticos del Jurásico medio a tardío. Por otra parte, estudios de su composición geoquímica clasificaron al Batolito de Abitagua como granito de tipo-I relacionándose con otros cuerpos intrusivos como el batolito de Zamora y Rosa Florida. Esto es explicado por Jaillard & Soler (1990) y Litherland et al. (1994) donde mencionan el cambio en la geodinámica de la Cuenca Oriente ocurrido desde el Jurásico Medio, debido al inicio de la subducción que tuvo una dirección Sureste. Como consecuencia, se produjo el emplazamiento de batolitos de composición similar (granitos tipo I): Batolito de Zamora, Batolito de Abitagua, Batolito de Rosa Florida (J. A. Aspdén et al., 1992; Hall & Calle, 1982; Litherland et al., 1994), cuyos orígenes están vinculados al arco volcánico Misahuallí de una composición calco-alkalina (Romeuf et al., 1995).

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo matemático del algoritmo del software INSIGHT

En el presente estudio, se utilizó un enfoque de mínimos cuadrados no lineal basado en una inversión estocástica de los datos y los modelos, con el fin de invertir los tiempos de llegada de las ondas P y S (Araujo et al., 2021; Tarantola & Valette, 1982). La relación del problema directo tiene la forma: $d = g(m)$. La expresión define un modelo teórico con bloques, en los que m son los parámetros y d los datos.

El vector d contiene información de los tiempos de llegada de las ondas P ($d^P = t_p$) y la variación entre los tiempos de viaje de las ondas S y P ($d^{S-P} = t_s - t_p$). Por otro lado, el vector modelo m está compuesto por los parámetros que se obtendrán después del algoritmo de inversión, es decir: la velocidad de la onda P (v_p), la relación entre las velocidades de la onda P y S (v_p/v_s), los hipocentros de la sismicidad (x), los tiempos de origen (t_0) de los terremotos y el tiempo de retardo de las estaciones sísmicas (Δ^P, Δ^{S-P}). Cabe mencionar que, el operador lineal g describe una relación teórica funcional entre los datos y los parámetros.

Por otro lado, el problema de Tikhonov se resuelve mediante la inversión estocástica (Tarantola & Valette, 1982), el cual, se resume como la búsqueda del mínimo de una función de costo en un espacio de regularización. Dicha función de costo se expresa como:

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

Para resolver la ecuación (1) de forma numérica Monteiller et al. (2005) recurre al uso del algoritmo de quasi-Newton, donde se re escribe de la siguiente forma:

$$(2). \quad \mathbf{m}_{k+1} - \mathbf{m}_k = -(\mathbf{C}_m^{-1} + \mathbf{G}_k \mathbf{G}_d^{-1} \mathbf{G}_k)^{-1}$$

Sin embargo, el software de tomografía sísmica INSIGHT usa la ecuación (2) reescrita en forma matricial y mediante una simple implementación del algoritmo LSQR (Paige &

Saunders, 1982) con el objetivo de resolver el sistema lineal en cada iteración. Cada iteración se reescribe de acuerdo a:

$$(3). \quad \mathbf{m}_{k-1} - \mathbf{m}_k = (\mathbf{A}_k \mathbf{A}_k)^{-1} (\mathbf{A}_k \mathbf{V}_k)$$

Donde

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_d^{-1/2} \mathbf{G}_k \\ \mathbf{C}_{or}^{-1/2} \Sigma^{-1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_d^{-1/2} (\mathbf{g}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{obs}) \\ \mathbf{C}_{or}^{-1/2} \Sigma^{-1} (\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_{prior}) \end{bmatrix}$$

Obtención de cortes tomográficos

Los diferentes cortes transversales se realizaron usando el software Matlab, seleccionando puntos a lo largo de la geometría del Batolito de Abitagua, tomando como referencia las cabeceras de los ríos (enlistados de norte a sur): río Mulatos - río Jatunyaku (FF'), río Llocullón (EE'), río Piatúa Blanco (DD'), río Piatúa (CC'), río Chontayacu (BB') y el río Yurak Yaku Grande (AA'). Además de la ubicación, es necesario definir otros cuatro parámetros de entrada, tales como: longitud de la caja de la tomografía y dirección del corte, se eligieron de acuerdo a las dimensiones del batolito de Abitagua representadas en el Mapa geológico de la República del Ecuador elaborado por Eguéz et al., (2017); tamaño de la celda, que representa la resolución de los cortes; profundidad del corte, para todas las secciones tomográficas se escogió 70 km; y la selección de eventos sísmicos que se encuentran registrados dentro de los límites de una caja sísmica, que se elaboró proporcionando una distancia paralela a los cortes de 12 kilómetros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las tomografías se presentan en las Figuras 2, 3, 4 mediante secciones transversales verticales producto de tres modelos de velocidades: modelo de onda P relativa (ΔV_p) (Figuras 2a, 2d, 2g, 3a, 3d, 3g, 4a), modelo de onda P absoluta (V_p) (Figuras 2b, 2e, 2h, 3b, 3e, 3h, 4b), y el modelo que representa la proporción entre velocidades de onda P sobre onda S (V_p/V_s) (Figuras 2c, 2f, 2i, 3c, 3f, 3i, 4c). Los acimuts y la ubicación de los cortes tomográficos usados para el presente trabajo se presentan en la Figura 1. Adicionalmente, las tomografías marcan con puntos azules los eventos sísmicos ocurridos dentro de 12 km en paralelo a los cortes tomográficos. Los cortes AA', BB', CC', DD', EE', FF' poseen una longitud de 40 Km y una profundidad de 70 km con acimut de N90°E, para distinguir al Batolito de Abitagua de las litologías aledañas. De igual manera, el corte GG' se realizó con 120 km de longitud y 70 km de profundidad con acimut de N25°E con el fin de observar cambios a lo largo de la estructura interna del batolito.

Los modelos ΔV_p (Figuras 2a, 2d, 2g, 3a, 3d, 3g, 4a) grafican variaciones porcentuales de la velocidad de onda P de los cortes tomográficos. Las anomalías (positivas o negativas) de este modelo se presentan en porcentajes y representan estructuras en la corteza como cambios de litología o delimitaciones de formaciones (Koulakov, 2013). De igual manera, Pavez et al., (2016) relaciona dichas anomalías a fracturas vinculadas a fallas geológicas, o a la presencia de mecanismos que modifiquen las propiedades físicas de las rocas. Por esta razón, los modelos ΔV_p de todos los cortes, fueron superpuestos con el Mapa Geológico de la República del Ecuador elaborado por Eguéz et al., (2017) con el objetivo de correlacionar las anomalías con los contactos entre las formaciones y el batolito.

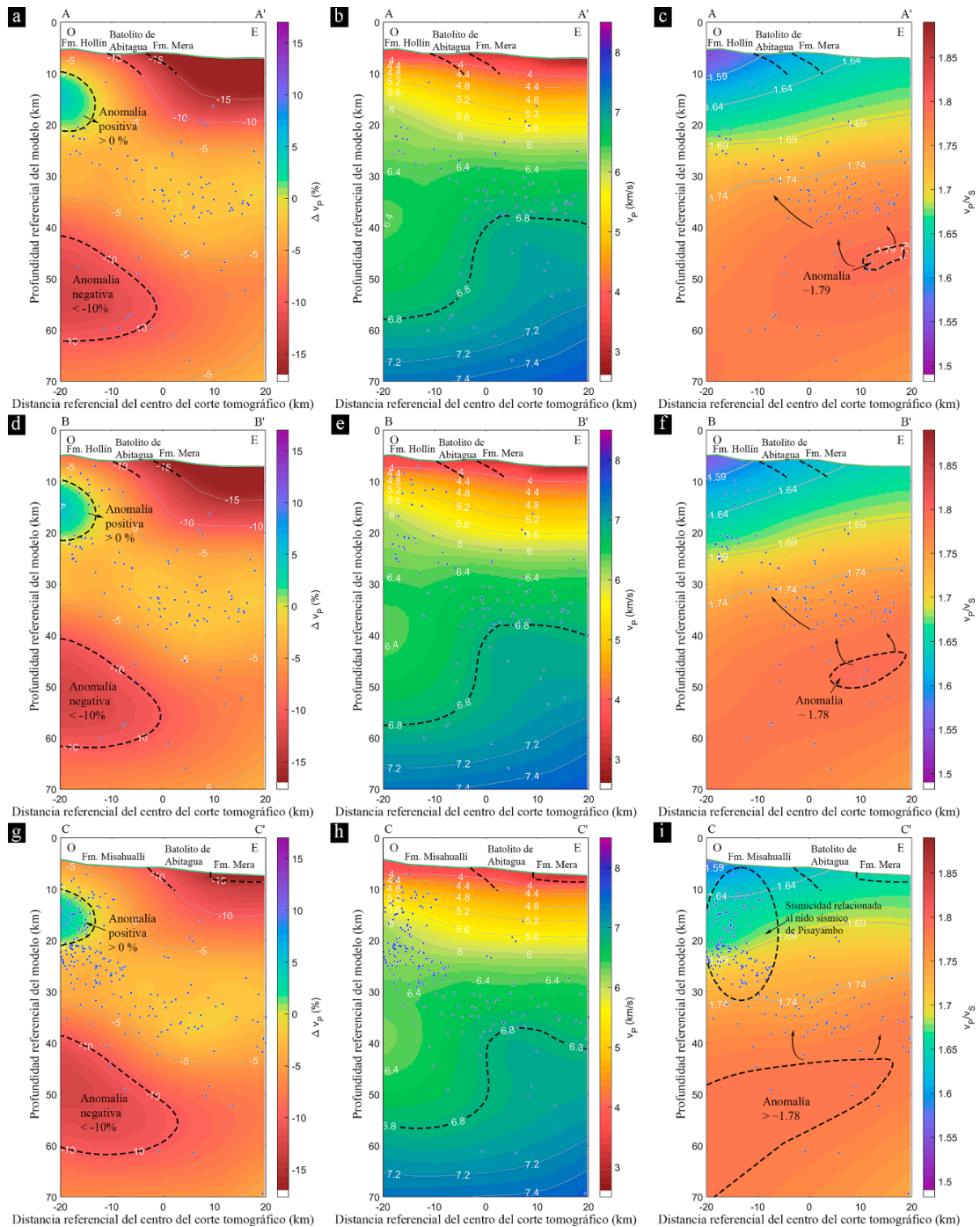


Figura 2. Modelos ΔV_p (a,d,g) con valores porcentuales, V_p (b,e,h) con valores en km/s, V_p/V_s (c,f,i) con valores adimensionales de las secciones AA', BB', CC'.

Las unidades de los ejes están en km. Se denotan las principales contactos entre formaciones geológicas y las diferentes anomalías sísmicas. Los hipocentros de los eventos sísmicos se indican como puntos azules.

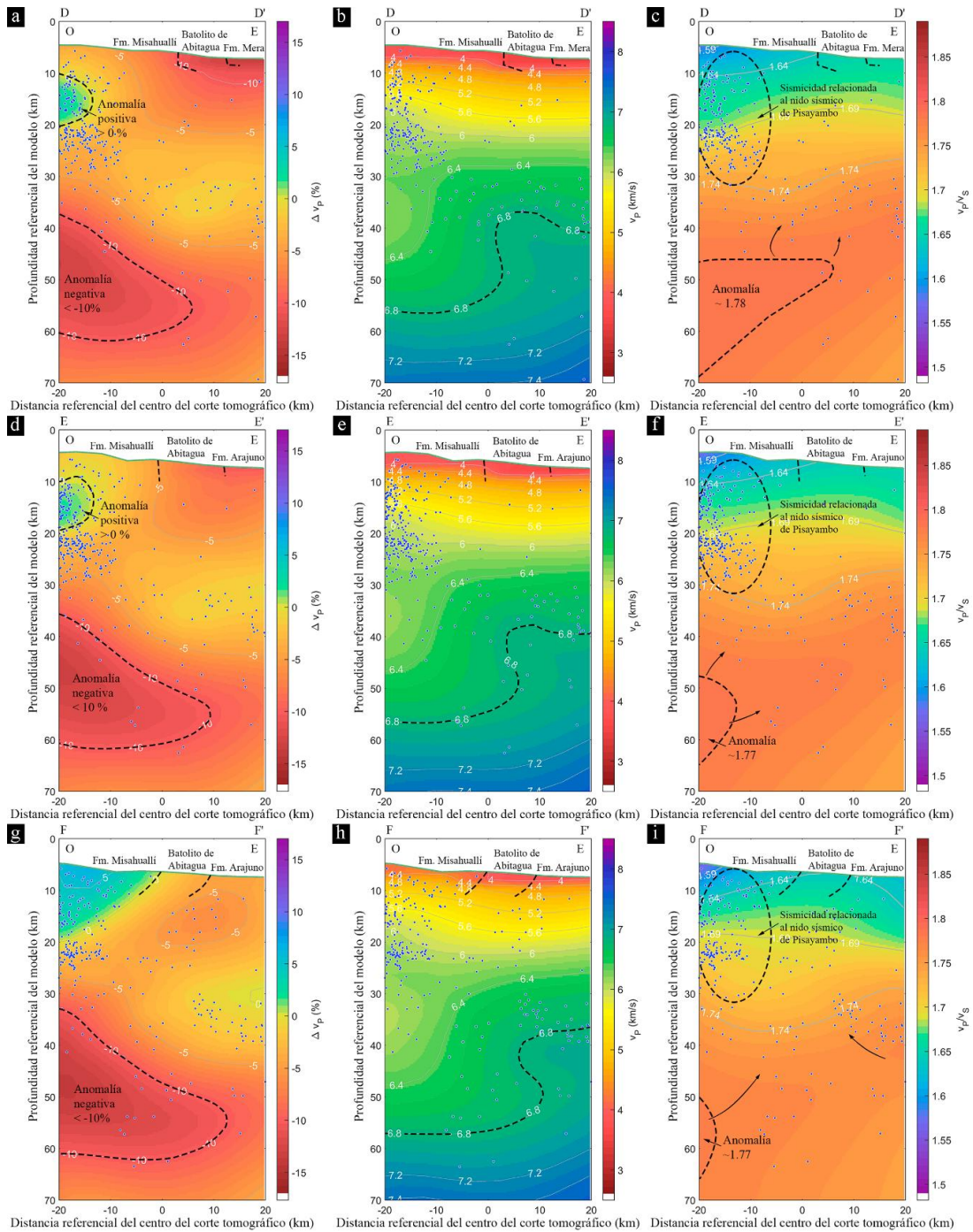


Figura 3. Modelos ΔV_p (a,d,g) con valores porcentuales, V_p (b,e,h) con valores en km/s, V_p/V_s (c,f,i) con valores adimensionales de las secciones DD', EE', FF'.

Las unidades de los ejes están en km. Se denotan las principales contactos entre formaciones geológicas y las diferentes anomalías sísmicas. Los hipocentros de los eventos sísmicos se indican como puntos azules.

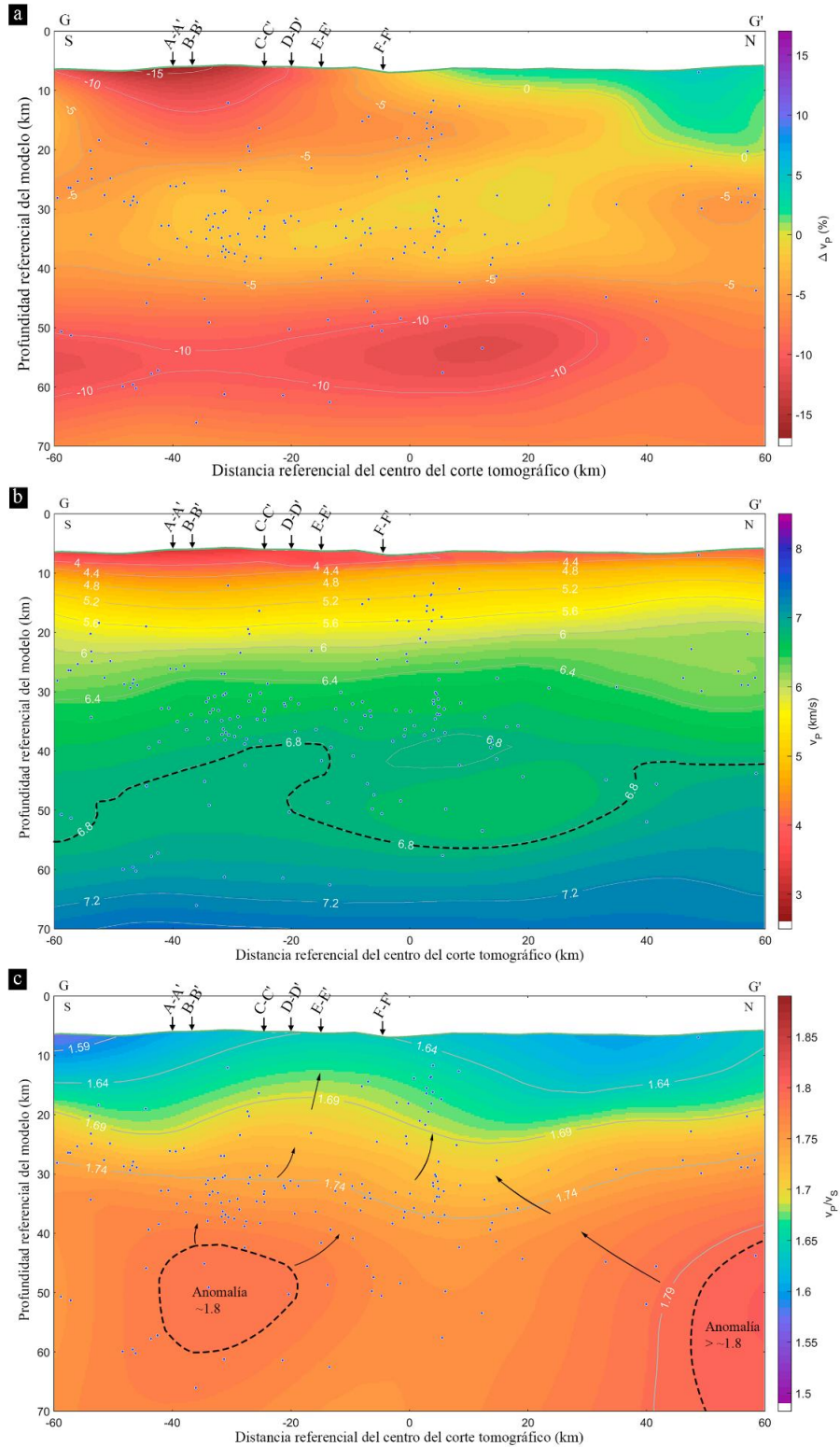


Figura 4. Modelos ΔV_p (a) con valores porcentuales, V_p (b) con valores en km/s, V_p/V_s (c) con valores adimensionales de la sección GG'.

Las unidades de los ejes están en km. La intersección con los cortes AA', BB', CC', DD', EE', FF' se encuentra marcada con flechas. En el modelo V_p/V_s se marcan dos anomalías sísmicas de valor ~ 1.8 . Los hipocentros de los eventos sísmicos se indican como puntos azules.

Los modelos ΔV_p de los cortes AA' y BB' (Figura 2a, 2d) presentan una variación superficial de valores $\Delta V_p \geq -5\%$ hasta $\Delta V_p \geq -15\%$. La región encerrada entre los valores $-10\% \geq \Delta V_p \geq -15\%$ delimitan el Batolito de Abitagua con un espesor de alrededor de 12 km que es el tamaño promedio reportado en Litherland et al., (1994). La isolínea con valor de -10% marca el contacto con la Formación Hollín (KH), mientras que la isolínea de valor -15% , muestra el contacto con la Formación Mera (PLQM). Sin embargo, para el corte CC' (Figura 2g), a pesar de presentar la misma variación de valores en la superficie, la isolínea con valores de -10% representaría el contacto entre la Formación Misahuallí (JM) con el Batolito de Abitagua, y la isolínea -15% marcaría el contacto con Formación Mera (PLQM).

En los cortes DD', EE' y FF' (Figura 3a, 3d, 3g) se puede destacar que los valores dentro del área en el que se encuentra el Batolito de Abitagua varían en relación con los mostrados en los cortes AA', BB' y CC' (Figura 2a, 2d, 2g). Para el modelo ΔV_p del corte DD' (Figura 3a), el Batolito de Abitagua estaría representado por valores entre $-10\% \geq \Delta V_p \geq -13\%$. La curva de -10% dibujaría el contacto con la Formación Misahuallí (JM), mientras que la curva de -13% marcaría el contacto con la Formación Mera (PLQM). A partir del corte EE' (Figura 3d) los valores superficiales se ven modificados. La región comprendida entre $-5\% \geq \Delta V_p \geq -8\%$ delimitaría el Batolito de Abitagua. La isolínea con valor -5% marcaría el contacto con la Formación Misahuallí y la curva con valor de aproximadamente -8% marcaría el contacto con la Formación Arajuno (MA). En el corte FF' (Figura 3f) el Batolito de Abitagua estaría localizado entre las curvas de valores $0\% \geq \Delta V_p \geq -3\%$. Por el oeste es evidente una anomalía positiva que encierra valores $>0\%$ indica el contacto con Formación Misahuallí, mientras que al este la curva de -3% marcaría el contacto con la Formación Arajuno (MA).

Partiendo del corte CC' con latitud -1.2383 hacia el norte, se puede observar un incremento de eventos sísmicos, denotado por una elipse entrecortada al oeste de las imágenes tomográficas (Figuras 2c, 2f, 2i, 3c, 3f, 3i, 4c). Este aumento de sismicidad estaría relacionado con el nido sísmico de Pisayambo descrito en Araujo et al., (2009) ubicado en el cuadrante de latitud $-0,9$ y $-1,3$ con longitud -78 y $-78,5$, siendo clasificado como el más activo de los cuatro nidos sísmicos detectados en el Ecuador. Además, se encuentra asociado a un segmento de falla desconocido del sistema de fallas Chingual – Cosanga – Puná - Pallatanga (CCPP), que posteriormente fue denominada como Falla Laguna de Pisayambo (FLP) (Champenois et al., 2017).

De acuerdo a las delimitaciones marcadas por los modelos ΔV_p de todos los cortes, es posible observar que el Batolito de Abitagua presenta un cambio de buzamiento, tomando como referencia el corte FF' con latitud -1.0789. A partir de dicha latitud hacia el norte, el Batolito de Abitagua buza hacia el oeste (Figuras 3a, 3d, 3g) mientras que con dirección al sur es posible constatar un cambio de buzamiento hacia el este (Figuras 2a, 2d, 2g), al contrario del modelo presentado en el Mapa geológico del Ecuador (Eguëz et al., 2017) sin un buzamiento definido, pero es graficado con un buzamiento en dirección oeste.

Algo importante a remarcar es que, a pesar de que los cortes DD', EE' y FF' se encuentran dentro de la misma estructura geológica y próximos entre ellos, es posible constatar un incremento en el porcentaje de la variación de la velocidad de onda p a lo largo de la geometría del Batolito. Esta variación longitudinal de velocidades se puede verificar mediante el modelo ΔV_p del corte GG' (Figura 4a), el cual, evidencia una zona de variaciones negativas altas entre los cortes AA', BB', CC', DD' ($\Delta V_p < -10\%$); una zona con variaciones negativas bajas entre los cortes EE' y FF' (alrededor del 5%) y una zona con variaciones positivas ($\Delta V_p > 0\%$) que empieza aproximadamente a 10 km hacia la derecha del punto FF' (ver figura 4a). Las anomalías negativas en el corte GG' representan zonas donde la estructura del batolito es menos compacta, es decir, indica una zona donde la roca está fracturada o alterada químicamente (Martí et al., 2002). En contraparte, las anomalías positivas del mismo corte (GG') se debe a la presencia de roca más consolidada, lo cual, causa un incremento en los valores absolutos y relativos de la velocidad de onda P.

De acuerdo a los cortes tomográficos V_p (Figuras 2b, 2e, 2h, 3b, 3e, 3h, 4b) es posible mostrar detalles verticales en la distribución de los valores de las velocidades absolutas de onda p, los cuales, incrementan en función de la profundidad. Superponiendo las delimitaciones dibujadas en los modelos ΔV_p sobre los modelos V_p , se puede observar que la profundidad del Batolito de Abitagua puede ser estimada por la isolínea de valor $V_p = 4.4$ km/s. En los modelos V_p de los cortes AA', BB', CC', DD', EE' (Figuras 2b, 2e, 2h, 3b) la profundidad promedio del batolito es de alrededor de 5 km, mientras que en el corte F-F' (Figura 3h) se puede notar un ligero adelgazamiento de casi 2 km. El corte G-G' (Figura 4b), muestra un corte a lo largo del batolito donde se evidencian las zonas de bajo valor V_p (alrededor de 4 km/s) descritas anteriormente al sur del batolito en el modelo ΔV_p . Además, si se observa la isolínea de 4.4 km/s este adelgazamiento se

hace evidente hacia el norte tomando como referencia el punto FF' donde se muestra una profundidad entre 2 a 3 km.

Las anomalías más profundas de los modelos de velocidades V_p (Figuras 2b, 2e, 2h, 3b, 3e, 3h, 4b) y V_p/V_s (Figuras 2c, 2f, 2i, 3c, 3f, 3i, 4c) fueron delimitadas con líneas entrecortadas. Analizando los modelos V_p es posible identificar el MOHO, el cual marca la división entre la corteza y el manto (Araujo, 2013; Carbonell et al., 2013). Para esto, Araujo (2013) considera la isolínea con valor de 6.8 km/s para la Cuenca Amazónica. De acuerdo a los modelos V_p de los cortes AA', BB', CC', DD', EE', FF' (Figuras 2b, 2e, 2h, 3b, 3e, 3h, 4b) se puede observar que la profundidad del MOHO bajo el Batolito de Abitagua se encuentra distribuido entre los 35 - 50 km de profundidad. Esto se pudo determinar mediante los cortes con orientación N 90° E, los cuales indican que el MOHO es más profundo (~50 km) al oeste del Batolito mientras que, al este la corteza se adelgaza hasta los ~35 km de profundidad.

Adicionalmente, tenemos los modelos V_p/V_s cuya interpretación se usa para determinar los contextos magmáticos asociados con volcanes e intrusiones magmáticas. Estos modelos son especialmente útiles en mayores profundidades, ya que su interpretación es más significativa que los modelos V_p y ΔV_p . La relación V_p/V_s está relacionada con el contenido de materiales fundidos y fluidos, por lo que las anomalías de valores altos de V_p/V_s más profundas se asocian comúnmente con reservorios magmáticos (Ferri et al., 2016; Koulakov, 2012, 2013; Vargas et al., 2017).

Mediante los modelos V_p/V_s de los cortes AA', BB', CC', DD', EE', FF' (Figuras 2c, 2f, 2i, 3c, 3f, 3i) es posible observar una anomalía que se encuentra próximo al MOHO de valores altos de 1.79 que decrecen hasta 1.76 en los cortes situados al norte, cerca de los ~45km de profundidad. Esto se vuelve más evidente en el corte G-G' (Figura 4c), en el cual se puede observar una segunda anomalía. La primera anomalía se encuentra bajo los cortes AA', BB', CC', DD', EE', FF' con $1.76 \geq V_p/V_s \geq 1.79$, mientras que al norte una segunda anomalía encierra valores $V_p/V_s > 1.79$.

Las anomalías altas de los modelos V_p/V_s , están correlacionadas a los derretimientos basálticos que se generan en el manto, los cuales pueden ascender y estancarse en el límite entre el manto y la corteza (MOHO) (Ferri et al., 2016; Koulakov, 2012, 2013) . En el mismo lugar, se producen una serie de eventos esenciales en la formación de depósitos tipos pórfidos como: la cristalización fraccionada, el derretimiento parcial de

rocas de la corteza y la mezcla extensa entre estos magmas (Bugueño et al., 2022). Tomando en cuenta la relación entre la sismicidad y un reservorio magmático Koulakov (2013) y Poli & Schmidt (1995), menciona que es posible asociarla con patrones que sugieren mecanismos de ascenso de magma y fluidos hidrotermales. El flujo de fluidos hidrotermales contienen metales arrastrados por aguas subterráneas circulantes, lo que origina la deposición de minerales a través de mecanismos efectivos de precipitación de metales (Bugueño et al., 2022). Esta interacción entre rocas y fluidos hidrotermales resultan en pórfidos cargados con metales como Au, Cu (Bugueño et al., 2022; Zhao et al., 2019). Tras procesos de erosión y meteorización, clastos provenientes de estas mineralizaciones se depositan en ríos aledaños generando depósitos de oro aluvial.

Conforme la sismicidad presentada entre los cortes AA' y BB' (Figura 2c, 2f) se puede evidenciar mediante flechas negras patrones que sugieren el ascenso de fluidos provenientes de la anomalía $Vp/Vs \sim 1.8$ que probablemente resulten en intrusiones cargadas de minerales que expliquen la presencia de oro en ríos y corrientes descrita en J. Aspden et al. (1990) que drenan desde el batolito como: el río Yurak Yaku Grande y el río Anzu. Patrones similares se pueden observar en los cortes CC' y DD', los cuáles en un reporte de Caicedo (2018) menciona la existencia de actividades de minería aluvial en la cuenca del río Piatúa.

Si se observa el modelo ΔVp del corte GG' (Figura 4a) es posible evidenciar que a 5km del norte del río Jatunyaku (punto FF') se presenta una zona transición entre variaciones porcentuales positivas y negativas. Mediante el modelo Vp/Vs del corte GG' (Figura 4c) se puede evidenciar que los patrones de sismicidad marcan una vía de ascenso de fluidos provenientes de los dos reservorios magmáticos ($Vp/Vs \sim 1.8$ y $Vp/Vs > 1.8$) descritos anteriormente, que parecen desembocar en la mencionada zona de transición. Razón por la cual, este punto presenta mayor evidencia de los posibles pórfidos. De igual modo, esta zona ha sido reportada con presencia de depósitos de oro aluvial en Barragan et al. (1991). Además, J. Aspden et al. (1990) menciona que su origen probablemente sean de las intrusiones tipo pórfidos más recientes que se encuentran a lo largo del batolito provenientes de magmatismos del Cenozoico, sin embargo, no han sido estudiadas.

CONCLUSIONES

Los modelos ΔV_p presentan una buena correlación entre la geología aledaña al batolito y el Mapa Geológico de Eguéz et al.(2017). También, se determinó una zona que representa una frontera entre anomalías ΔV_p negativas y positivas ubicado aproximadamente a 5 km al norte del Río Jatunyaku que se encuentra relacionada a la zona con más evidencia de contener intrusiones.

De acuerdo al modelo V_p/V_s del corte GG' (Figura 4c) se pudo determinar dos anomalías sísmicas $1.77 \geq V_p/V_s \geq 1.79$ y $V_p/V_s \geq 1.8$ bajo el Batolito de Abitagua, asociadas a reservorios magmáticos ubicados cerca del MOHO. La sismicidad de los modelos V_p/V_s forman patrones que sugieren vías de ascenso de magma. La primera anomalía ($1.77 \geq V_p/V_s \geq 1.79$) estaría relacionada con las intrusiones ubicadas a lo largo de los cortes AA', BB', CC', DD', EE', FF'. Mientras que la segunda anomalía con valores $V_p/V_s \geq 1.8$ en conjunto con la primera, estaría vinculada a intrusiones dentro de la zona de transición de anomalías positivas y negativas de ΔV_p . Estas intrusiones podrían estar directamente conectadas con el oro aluvial documentado en varios ríos que desembocan desde el batolito. Por lo cual, se necesita un aumento de estaciones sísmicas en la zona del batolito para realizar tomografías sísmicas con mayores detalles y a menor escala, con el objetivo de poder observar claramente dichas intrusiones.

REFERENCIAS

- Araujo, S. (2013). The ecuadorian MOHO. *La Granja*, 18(2), 43–47.
- Araujo, S. (2016). Travel time tomography of the crust and the mantle beneath Ecuador from data of the national seismic network. In *Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement*. UNIVERSITE GRENOBLE ALPES.
- Araujo, S., Troncoso, L., & Ruiz, M. (2009). Relocalización por dobles diferencias del cluster sísmico de Pisayambo. *La Granja*, 10(2), 27. <https://doi.org/10.17163/lgr.n10.2009.03>
- Araujo, S., Valette, B., Potin, B., & Ruiz, M. (2021). A preliminary seismic travel time tomography beneath Ecuador from data of the national network. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103486. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103486>
- Aspden, J. A., Fortey, N., Litherland, M., Viteri, F., & Harrison, S. M. (1992). Regional S-type granites in the Ecuadorian Andes: Possible remnants of the breakup of western Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*, 6(3), 123–132. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(92\)90002-G](https://doi.org/10.1016/0895-9811(92)90002-G)
- Aspden, J., Bermúdez A., R., Viteri S., F., & Pozo T., M. (1990). *LA GEOLOGÍA Y POTENCIAL MINERAL DE LA CORDILLERA REAL, ECUADOR*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/44376>
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). La Cuenca Oriente: Geología y petróleo. *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo*. <https://doi.org/10.4000/BOOKS.IFEA.2971>
- Barragan, J., Ortiz, C., & Michael, M. (1991). Placeres auríferos en el Ecuador. *Gisements Alluviax d'or*, 1–5.
- Bès de Berc, S., Baby, P., Soula, J.-C., Rosero, J., Souris, M., Christophoul, F., & Vega, J. (2016). La superficie mera-upano: marcador geomorfológico de la incisión fluvial y del levantamiento tectónico de la zona subandina ecuatoriana. *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo, June*, 153–167. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.3009>
- Bilek, S. L. (2010). Invited review paper: Seismicity along the South American subduction zone: Review of large earthquakes, tsunamis, and subduction zone complexity. *Tectonophysics*, 495(1–2), 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.037>
- Bugueño, F., Calle-Gardella, D., Comte, D., Reyes-Wagner, V., Ojeda, M., Rietbrock, A., & Roecker, S. (2022). Subsurface Insights of the Maricunga Gold Belt through Local Earthquake Tomography. *Minerals*, 12(11), 1437. <https://doi.org/10.3390/min12111437>
- Caicedo, D. (2018). *Propuesta de plan de manejo ambiental de la subcuenca del río Anzu*. Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Carbonell, R., Levander, A., & Kind, R. (2013). The Mohorovičić discontinuity beneath the continental crust: An overview of seismic constraints. *Tectonophysics*, 609(July), 353–376. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.037>
- Champenois, J., Baize, S., Vallee, M., Jomard, H., Alvarado, A., Espin, P., Ekstöm, G., & Audin, L. (2017). Evidences of Surface Rupture Associated With a Low-Magnitude (Mw5.0) Shallow Earthquake in the Ecuadorian Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(10), 8446–8458. <https://doi.org/10.1002/2017JB013928>
- Colony, R. J., & Sinclair, J. H. (1932). METAMORPHIC AND IGNEOUS ROCKS OF EASTERN ECUADOR. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 34(1), 1–53. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1932.tb56973.x>
- Eguéz, A., Gaona, M., & Albán, A. (2017). Mapa geológico de la República del Ecuador. *Instituto de Investigación Geológica y Energético*.
- Ferri, F., Burlini, L., & Cesare, B. (2016). Effect of partial melting on Vp and Vs in crustal enclaves from Mazarrón (SE Spain). *Tectonophysics*, 671, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.12.030>

- Hall, M. L., & Calle, J. (1982). Geochronological control for the main tectonic-magmatic events of Ecuador. *Earth Science Reviews*, 18(3–4), 215–239. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(82\)90038-1](https://doi.org/10.1016/0012-8252(82)90038-1)
- Herbert, H.-J., & Pichler, H. (1983). K-Ar Ages of Rocks from the Eastern Cordillera of Ecuador. *Zeitschrift Der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 134(2), 483–493. <https://doi.org/10.1127/ZDGG/134/1983/483>
- Jaillard, E., & Soler, P. (1990). Geodynamic evolution of the northern and central Andes during early to middle Mesozoic times: A Tethyan model. *Journal of the Geological Society*, 147(September 2018), 1009–1022. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.147.6.1009>
- Koulakov, I. (2012). Multiscale Seismic Tomography Imaging of Volcanic Complexes. In *Updates in Volcanology - A Comprehensive Approach to Volcanological Problems* (1st ed., pp. 207–242). InTech. <https://doi.org/10.5772/24653>
- Koulakov, I. (2013). Studying deep sources of volcanism using multiscale seismic tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257, 205–226. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.03.012>
- Litherland, M., Aspden, J. A., & Jamielita, R. A. (1994). The metamorphic belts of Ecuador. In *British Geological Survey, Overseas Memoir* (Vol. 11).
- Litherland, M., Fortey, N. J., & Beddoe-Stephens, B. (1992). Newly discovered Jurassic skarnfields in the Ecuadorian Andes. In *Journal of South American Earth Sciences* (Vol. 6, Issue 2).
- Martí, D., Carbonell, R., Tryggvason, A., Escuder, J., & Pérez-Estaún, A. (2002). Mapping brittle fracture zones in three dimensions: High resolution travelttime seismic tomography in a granitic pluton. *Geophysical Journal International*, 149(1), 95–105. <https://doi.org/10.1046/J.1365-246X.2002.01615.X/3/149-1-95-FIG008.JPEG>
- Michaud, F., Witt, C., & Royer, J. Y. (2009). Influence of the subduction of the Carnegie volcanic ridge on Ecuadorian geology: Reality and fiction. *Memoir of the Geological Society of America*, 204(December 2014), 217–228. [https://doi.org/10.1130/2009.1204\(10\)](https://doi.org/10.1130/2009.1204(10))
- Monteiller, V., Got, J. L., Virieux, J., & Okubo, P. (2005). An efficient algorithm for double-difference tomography and location in heterogeneous media, with an application to the Kilauea volcano. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B12), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2004JB003466>
- Paige, C. C., & Saunders, M. A. (1982). Algorithm 583: LSQR: Sparse Linear Equations and Least Squares Problems. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 8(2), 195–209. <https://doi.org/10.1145/355993.356000>
- Pavez, C., Tapia, F., Comte, D., Gutiérrez, F., Lira, E., Charrier, R., & Benavente, O. (2016). Characterization of the hydrothermal system of the Tinguiririca Volcanic Complex, Central Chile, using structural geology and passive seismic tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.018>
- Poli, S., & Schmidt, M. W. (1995). H₂O transport and release in subduction zones: experimental constraints on basaltic and andesitic systems. *Journal of Geophysical Research*, 100(B11). <https://doi.org/10.1029/95jb01570>
- Romanowicz, B. A. (2021). Seismic Tomography of the Earth's Mantle. *Encyclopedia of Geology*, 587–609. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00169-7>
- Romeuf, N., Aguirre, L., Féraud, G., & Marla, A. S. (1995). *Middle Jurassic volcanism in the Northern and Central Andes*.
- Ruiz, M. H. (2002). *Exhumation of the northern Sub-Andean Zone of Ecuador and its source regions* [Université de Montpellier]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004489528>
- Tarantola, A., & Valette, B. (1982). Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 20, Issue 2, pp. 219–232). <https://doi.org/10.1029/RG020i002p00219>
- Thurber, C., & Ritsema, J. (2015). Theory and Observations - Seismic Tomography and Inverse Methods. *Treatise on Geophysics: Second Edition*, 1, 307–337. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802->

4.00009-9

- Vargas, C. A., Koulakov, I., Jaupart, C., Gladkov, V., Gomez, E., El Khrepy, S., & Al-Arifi, N. (2017). Breathing of the Nevado del Ruiz volcano reservoir, Colombia, inferred from repeated seismic tomography. In *Scientific Reports* (Vol. 7, Issue April). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/srep46094>
- Zhao, Y., Liu, H., & Qin, K. (2019). Discussion on Au transportation mechanism in melt-magma-fluid in porphyry Cu deposit – A case study from Jinchang porphyry Au (Cu) deposit, Heilongjiang province, China. *Ore Geology Reviews*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102968>