

Desentrañando la tectónica del paisaje de la Formación Cayo en Puerto Cayo, Ecuador

Unraveling the tectonics of the scenery from the Cayo Formation, Puerto Cayo, Ecuador

Hernán Lara - Saavedra¹, Tania Jama²

¹ Universidad Técnica Particular de Loja. Loja – Ecuador. E-mail: hjlara@utpl.edu.ec

² Universidad de Guayaquil. Guayaquil – Ecuador. E-mail: tania_jama95@hotmail.com

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 07-11-2022

Fecha de aceptación: 11-04-2023

Resumen

El objetivo del estudio fue analizar la estructura geológica de los afloramientos de la Formación Cayo (Cretácico superior) en la zona de Puerto Cayo, en la superficie de discordancia con la Formación San Mateo (Eoceno Tardío), para entender la tectónica regional. Debido a la falta de una red de sismógrafos distribuidos a lo largo de la parte central del margen activo ecuatoriano, se ha investigado la cinemática de las fallas del sector de Puerto Cayo para entender la tectónica regional. Se describió la litología de los afloramientos que se dividieron en tres secciones. Según el análisis de la composición modal, se clasificaron como Litoarenita y Litoarenita feldespática y Basalto Olivínico. El análisis estadístico mediante el diagrama de contornos en la Sección Uno con 39 muestras determinó una máxima densidad de rumbo 161° y buzamiento 40° en fallas normales (Nx) y fallas inversas (Ix). La orientación principal dio como resultado: rumbo 84° para la Sección Uno y 231° para la Sección Dos con buzamiento moderado entre 40° y 32° con cabeceo entre 51° y 58° , respectivamente. Se realizó la medición de planos de fallas con sus respectivos indicadores cinemáticos: 26 fallas normales, seis fallas normales sinestrales y siete fallas inversas. En el norte del área de estudio nombrado como Sección Uno, se detecta una combinación de campos de esfuerzos compresionales y extensionales con mayor incidencia de esfuerzos extensionales.

Palabras clave: Litoarenita, basalto olivínico, diagramas de contornos, análisis estadístico, cinemática.

Abstract

The aim of the study was to conduct a structural analysis of outcrops from Upper Cretaceous Cayo Formation, south of Puerto Cayo, Manabi Province at the unconformity boundary with the San Mateo Formation (Late Eocene). Due to the lack of a seismometer network spread along the central part of the Ecuadorian active margin, the kinematic analysis of fault planes around Puerto Cayo has been undertaken to understand regional tectonics. The lithology of the outcrops was described and split into three sections. On the basis of the modal composition, samples were classified as Litharenite and Feldspathic Litharenite and Olivine Basalt. Statistical analysis by contour plot in Section One with 39 samples determined a maximum density of strike 161° and dip 40° on normal faults (Nx) and reverse faults (Ix). The main orientation resulted in: strike 84° for Section One and 231° for Section Two with moderate dip between 40° and 32° with rake between 51° and 58° , respectively. Fault planes with their respective kinematic indicators were measured: 26 normal faults, six sinistral normal faults and seven reverse faults. In the north of the study area named as Section One, a combination of compressional and extensional stress fields with a higher incidence of extensional stresses has been observed.

Keywords: Litharenite, olivine basalt, density contour plots, statistical analysis, kinematics.

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se llevó a cabo en afloramientos en la parroquia Puerto Cayo a 28 km desde el cantón Jipijapa hacia la parte Sur Occidental de la provincia de Manabí. El área de estudio se localiza en la cordillera a lo largo del margen costero del Ecuador que se encuentra frecuentemente en actividad sísmica producto de la convergencia entre la subducción de la placa de Nazca, la placa Caribeña (Bloque Norandino) y la placa Sudamericana separados por la Mega-Falla Guayaquil Caracas (Fig. 1). Existe una colisión entre la Cordillera de Carnegie que se formó hace 20 a 23 Ma [1] y el margen tectónico donde se forma el Arco de Talara. Las litologías corresponden a la Formación Cayo (Cretáceo Superior) de procedencia volcanoclástica [2], Complejo ígneo volcánico J- K (Jurásico Superior - Cretáceo) de composición muy variada como: doleritas, basaltos en forma de colada, diques y pillow lavas [3].

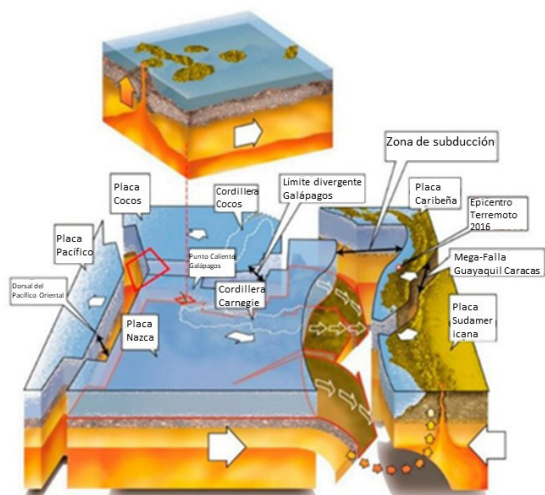


Figura 1. Esquema tectónico regional simplificado donde se muestra la Placa Caribeña o Bloque Norandino, la Mega-Falla Guayaquil Caracas y la placa Sudamericana. Modificado de Chunga et al. [1]

Existe un modelo de evolución del fragmento sur occidental de la costa ecuatoriana durante el Cretácico tardío al Eoceno temprano que se demuestra por su estratigrafía y sedimentología dentro de la cuenca Manabí [4, 5]. La cuenca Manabí y Borbón parecen haber estado conectadas especialmente en el Mioceno Temprano y Medio por la evidencia de foraminíferos bentónicos [5].

La presente investigación tiene como objetivo reconocer la superficie de discordancia entre la

Formación Cayo y San Mateo. Debido a la falta de una red de sismógrafos distribuidas a lo largo de la parte central del margen activo ecuatoriano, se ha investigado la cinemática de las fallas del sector de Puerto Cayo para entender la tectónica regional. Además, se analiza la geología estructural para evaluar datos estadísticos de las unidades geológicas del área de estudio.

1. 1. Estratigrafía de la Cuenca Manabí

Según estudios, la placa Nazca converge a una velocidad aproximada de 55 a 58 mm/año en sentido NE a 83° [6, 7, 8]. Este movimiento de la placa Nazca es responsable del desplazamiento inclinado del bloque Nor-andino, que se encuentra en la costa oeste de Sudamérica, y que se mueve en dirección noroeste a una velocidad que varía según la ubicación, pero en promedio es de alrededor de 20 mm/año [8, 9].

La región Costa se conforma por la cordillera Costanera y hacia la parte oriental la cuenca Manabí misma que llega hasta el límite de la Cuenca Progreso. La cuenca de antearco Borbón se localiza al norte del Ecuador (Fig. 2). El Eoceno Medio es representado por una alta actividad tectónica debido al cambio del promedio de convergencia, que permitió que la cuenca Manabí fuera depositada.

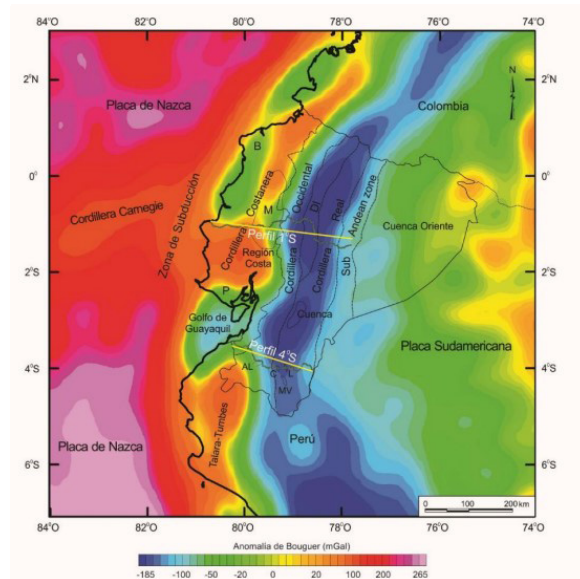


Figura 2. Mapa gravimétrico donde se muestra la cuenca Borbón (B), la cuenca Progreso (P), la cuenca Manabí (M) con anomalías de Bouguer negativas mientras la Cordillera Costanera muestra anomalías de Bouguer positivas. Tomado de Tamay [10]

La cuenca Manabí al NO de la costa ecuatoriana tiene una extensión aproximada de 250 km de largo y 62 km de ancho en sentido NNE [10, 11]. Esta cuenca alcanza una anomalía de Bouguer negativa de -50 mGal [10]. Esta cuenca limita al norte con el cantón Jama y Cojimies además de la falla Esmeraldas, al sur con la

Cordillera Chongón Colonche, al este con la Cordillera de los Andes y al oeste con el Océano Pacífico.

En la cuenca de antearco Manabí, se encuentran rocas sedimentarias de edad Cretácico, Terciario y Cuaternario [10]. En el área de estudio se encuentran rocas del Cretácico Temprano de la Formación Piñón, del Cretácico Tardío de la Formación Cayo, del Eoceno de la Formación San Mateo. El basamento comprende rocas básicas de afinidad oceánica del Cretácico [12, 13].

La Formación San Mateo del Eoceno Tardío está compuesta por areniscas de grano fino con vetillas de lignito y conglomerado basal con una potencia de 800 metros (Fig. 3). La Fm. Angostura del Mioceno consiste de sedimentos clásticos y secuencias turbidíticas. La Fm. Onzole del Plioceno contiene sedimentos de grano fino. Por último, la Fm. Borbón del Cuaternario representa una secuencia de rocas clásticas con fragmentos gruesos a medios [14].

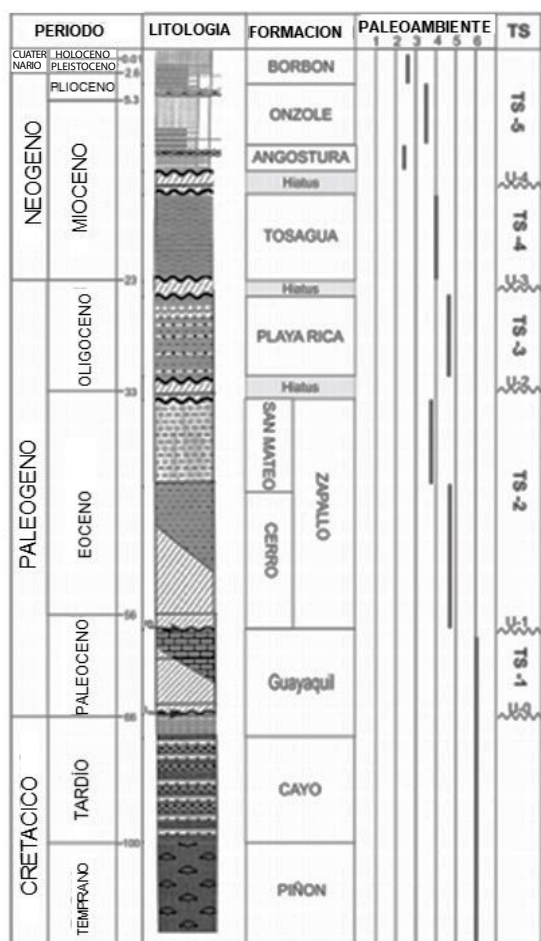


Figura 3. Columna cronoestratigráfica de la cuenca Manabí donde se muestra a San Mateo como miembro de la Formación Zapallo, la formación Cayo del Cretácico Superior y la formación Piñón del Cretácico Inferior. Las líneas resaltadas muestran los paleoambientes: 1 continental, 2) transicional. 3) plataforma continental, 4) talud continental, 5) zona batial, 6) zona abisal. Modificado de Villitanga et al. [15]

1. 2. Litología de la Formación Cayo

La formación Cayo originalmente se dividió en tres miembros: Calentura, Cayo s.s., y Guayaquil [16]. Esta formación está constituida por rocas vulcano-sedimentarias que descansan sobre la formación Piñón. Contiene rocas de origen vulcano-sedimentarias y sedimentos silíceos como areniscas tobáceas, grauvacas, conglomerados y brechas volcánicas con una potencia de 3 000 metros.

Los sedimentos de la Fm. Cayo están compuestos por argilitas tobáceas color verde oscuro a gris y potentes capas de areniscas con alternancia de lutitas, areniscas y limolitas [17]. La parte basal consiste en brecha volcánica de composición intermedia a básica, tobas y grauvacas [18]. La parte superior de esta formación está constituida por argilitas y pedernal [2].

La litología corresponde a limolitas de color verde, areniscas de color amarillento, grauvacas cloritizadas, y tobas. Se presenta como una secuencia sedimentaria de origen volcánico con presencia de finas a gruesas capas estratificadas que buzan hacia el sur.

Los sedimentos fueron depositados en la cuenca oceánica, ubicada al pie de un arco de islas en curso de erosión [4]. Las primeras investigaciones indicaron que la edad de la formación es Campaniano medio infrayaciendo a formaciones paleógenas de las cuencas Progreso y Manabí, sobreyaciendo de forma discordante sobre la Formación Piñón [18].

1.3. Estudios Sísmicos de la Cuenca Manabí

El lineamiento de la falla Jipijapa se encuentra en la costa oeste de Ecuador y se divide en dos segmentos distintos, llamados 14a y 14b (Fig. 4). Esta falla marca el contacto litológico entre rocas de edad cretácica y sedimentos de la Cuenca Manabí, lo que indica que se trata de una falla de contacto. La falla Jipijapa tiene una orientación NNE-SSO y se considera una falla de cinemática inversa con componente dextral (Dx) [19]. La cinemática inversa es común en las fallas que se encuentran en zonas de compresión, donde la fuerza tectónica aplicada a las rocas es mayor en la dirección horizontal que en la vertical.

Los mecanismos focales de la falla Jipijapa-Portoviejo proyectan planos de ruptura paralelos en la superficie de la placa superior con una orientación N10° - N25°. La actividad sísmica en la costa asociada a esta falla del Cuaternario ha sido registrada por medio de sismómetros y estaciones sísmicas, lo que permite su monitoreo continuo (Fig. 4) [20]. En el 2005 se detectó un enjambre sísmico en la ciudad de Manta, en la costa ecuatoriana, con cuatro eventos sísmicos con magnitud de momento (Mw) mayor a 6, 11 eventos sísmicos con

Mw entre 5-6, y 470 eventos sísmicos con Mw entre 4-5 [20]. Este enjambre sísmico indica una actividad significativa en la falla Jipijapa-Portoviejo y es un recordatorio de la importancia de la vigilancia continua para la seguridad de la población. La reactivación de esta falla del Cuaternario puede tener implicaciones importantes en términos de la actividad sísmica en la región costera del Ecuador.

La cuenca Manabí es una cuenca de tipo pull-apart lo que significa que se forma como resultado del movimiento lateral en dirección con una extensión.

Los bordes Norte y Oeste de la cuenca comprenden fallas normales escalonadas, lo que indica que las rocas se han movido hacia abajo en la dirección perpendicular a la dirección del movimiento lateral de la falla. En contraste, los bordes Este y Sur de la cuenca constituyen homoclinales continuos, lo que indica que las rocas están plegadas y no han experimentado un movimiento significativo a lo largo de la dirección perpendicular a la falla.

La zona del depocentro de la cuenca Manabí se localiza en la parte norte de la cuenca, lo que indica que las rocas han sido desplazadas hacia el norte como resultado de la actividad tectónica en la zona de falla. La estructura en flor negativa se refiere a una forma geométrica en la que la falla principal de la cuenca tiene una curvatura hacia el interior, lo que produce una zona de depresión en la parte central de la cuenca. En el caso de la cuenca Manabí, la curvatura de la falla principal es hacia el sur, lo que produce una depresión en la parte norte de la cuenca.

El estudio de la geología de la cuenca Manabí es importante para comprender la actividad tectónica en la región. Además, la comprensión de la estructura y evolución de la cuenca es fundamental para el análisis del riesgo sísmico y la prevención de desastres naturales en la zona costera del Ecuador.

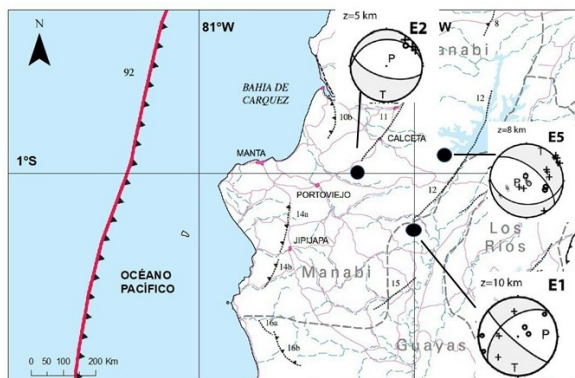


Figura 4. Fallas del Cuaternario del Ecuador donde se observa la Península de Manta o Cabo de San Lorenzo con dos tramos costaneros de dirección NNE-SSO de Bahía de Caráquez a Jaramijó al Norte con respecto a Manta y de Puerto Cayo a Puerto López al Sur. Además, los eventos sísmicos E1, E2 y E5 con sus respectivos

hipocentros muestran mecanismos focales compatibles con un campo de esfuerzo homogéneo con una dirección de compresión E-O a ESE-ONO y una extensión NNE-SSO [19].

1.4. Área de Estudio

Se levantaron datos estructurales en tres secciones que representan un segmento del lineamiento NNE-SSO desde el sur de la ciudad de Puerto Cayo hasta Punta Cerro Viejo. De norte a sur, la Sección Uno consta de siete puntos de afloramientos con 450 m de largo, la Sección Dos con 735 m (x:528452 y: 9848330) tiene cinco puntos y Sección Tres (x: 526711 y: 9846199) tiene cuatro puntos 800 m (Fig. A1).

1.4.1 Sección Uno

En el primer punto de la Sección Uno (coordenadas UTM x:528994 y:9848833) el afloramiento tiene 20 metros de altura (Fig. 5a). Existen intercalaciones de areniscas de grano grueso a medio y estratos centimétricos de lutitas silicificadas de color gris verdoso. En el segundo punto (x: 528985 y: 9848873), se observa un afloramiento de 7 metros de altura (Fig. 5b). El afloramiento se encuentra fuertemente fallado con alternancia de estratos de areniscas masivas y lutitas silicificadas.

En el tercer punto (x:528981 y:9848865), el afloramiento tiene 20 metros de altura (Fig. 5c). El afloramiento se encuentra moderadamente meteorizado. En el cuarto punto (x: 528945 y: 9848820), se observa una fuerte meteorización en las rocas aflorantes, la litología se comprende de rocas vulcano sedimentarias en secuencia de areniscas masivas fracturadas de grano medio y estratos centimétricos de lutitas tobáceas con texturas laminadas (Fig. 5d).

En el quinto punto (x:528914 y:9848776), el afloramiento tiene 25 metros de altura (Fig. 5e). Se presentan rocas vulcano sedimentarias de la Formación Cayo, estratos con intercalación de areniscas de grano medio en forma masiva, color marrón amarillento pálido con espesores centimétricos y lutitas silicificadas de color gris verdoso claro con espesores centimétricos a decimétricos. En el sexto punto (x: 528891 y: 9848751), el afloramiento tiene 30 metros de altura con moderada meteorización. Ahí se puede apreciar de manera más precisa el cambio de litología. En la parte alta del afloramiento se observa una discordancia angular que indica cambio litológico hacia finos estratos de tobas finas y margas tobáceas pertenecientes a la Formación San Mateo.

En el séptimo y último punto (x: 528778 y: 9848550), se observa un afloramiento de 20 metros, material fuertemente meteorizado. Se registran deslizamientos

y caída de rocas por acción de la erosión eólica y de las olas del mar. En la parte superior se evidencia caída de material coluvial con parte de la vegetación característica, también suprayace la caída de rocas de la formación San Mateo.

1.4.2 Sección Dos

En el primer punto de la Sección Dos (x: 528452 y: 9848330), el afloramiento tiene 20 metros de altura con una dirección NE – SO. Se muestra un depósito coluvial en los primeros metros (líneas rojas discontinuas), un cambio litológico en la parte alta que evidencia rocas de la Fm. Cayo y Fm. San Mateo (líneas rojas discontinuas). En el segundo punto (x: 528409 y: 9848209), se observa un afloramiento de 20 metros. La base del afloramiento se encuentra cubierto por abundante vegetación herbácea.

En el tercer punto (x:528249 y:9848061), se encuentra un afloramiento de 35 metros de altura (Fig. 6a). En esta sección se encuentran rocas de la formación Cayo constituido por estratos horizontales de areniscas masivas fuertemente fracturadas. En este punto se evidencia un sistema de fallas normales de la Fm. Cayo (líneas blancas). En el cuarto punto (x: 528174 y: 9847945), el afloramiento tiene 15 metros de altura (Fig. 6b). En la base aflora un pequeño bloque de areniscas masivas de grano grueso a medio, color naranja amarillento oscuro.

En el quinto punto (x:528033 y:9847636), se observa un afloramiento de 10 metros de altura con orientación NE – SO. En la base se describen intercalaciones de estratos centimétricos de arcillolita, coloración amarillo grisáceo muy pálido y lutitas tobáceas de color verde azulado muy pálido que corresponden a la formación San Mateo. En la parte alta del afloramiento se registra material coluvial compuesto por material mal clasificado de gravas con fragmentos angulosos soportados en una matriz limo arcillosa cubierto por abundante vegetación arbustiva.

1.4.3. Sección Tres

En el primer punto de la Sección Tres (x: 526711 y: 9846199), se evidencia un afloramiento de 30 metros de altura con orientación SO – NE. Se observa un afloramiento de rocas volcánicas, en su base se evidencian estructuras de lavas almohadilladas con vesículas rellenas de cuarzo, además de relleno de sedimento color gris amarillento. Debido al alto grado de meteorización se exhibe una coloración oscura en su superficie. En la parte alta del afloramiento se registran depósitos de lavas basálticas masivas con menor grado de alteración, fracturamiento y poca silicificación,

cubiertos por una moderada vegetación. El segundo punto (x: 527320 y: 9846890) tiene un afloramiento de 30 metros de altura con orientación NO – SE. En este punto puede constatarse que afloran estratos subhorizontales de la formación Cayo en subyacencia con material cuaternario cubierto por abundante vegetación.

El tercer punto (x:527274 y:9846796), se observa un afloramiento de 40 metros de altura (Fig. 7a). Se aprecia un contacto fallado entre depósitos coluviales y rocas de la Formación San Mateo. Las rocas volcánicas corresponden a lavas almohadilladas masivas fuertemente meteorizadas. Por otro lado, el material coluvial está compuesto por cantos subangulares cubiertos de una matriz areno guijarrosa. Se presentan estratos de areniscas tobáceas con intercalaciones de lutitas con presencia de moderada vegetación. En el cuarto punto (x:527432 y:9846466), se observa un afloramiento de 4 metros de altura (Fig. 7b), de la Fm. San Mateo que se compone de arcillolitas de estructura primaria laminada con espesores decimétricos, color beige claro con presencia de dendritas de pirolusita con alternancia de areniscas tobáceas de grano medio, color beige claro con presencia de oxidación en espesores decimétricos.

2. METODOLOGÍA

Las muestras fueron enviadas al Departamento de Geología de la Universidad Central del Ecuador donde se elaboraron tres láminas delgadas, una por cada sección. La elaboración de láminas delgadas es una técnica utilizada para analizar la composición mineralógica y textural de las rocas en el laboratorio. Esta técnica implica la preparación de una muestra en una lámina delgada, que se coloca bajo un microscopio para su examen detallado.

El procesamiento de los datos estructurales en cada afloramiento fue realizado con el software Dips V6.0. Este software se utiliza para analizar la orientación y geometría de las estructuras geológicas, como fallas y pliegues, a partir de datos recopilados en el campo. Los resultados de este análisis se presentaron en estereogramas para cada una de las secciones de los análisis de los datos estructurales y los resultados cinemáticos.

Además, se utilizó el software ioGAS para procesar los datos estructurales obtenidos de las muestras recopiladas en el campo. El software ioGAS permite la visualización, interpretación y modelización de los datos geológicos en un entorno de análisis integrado.

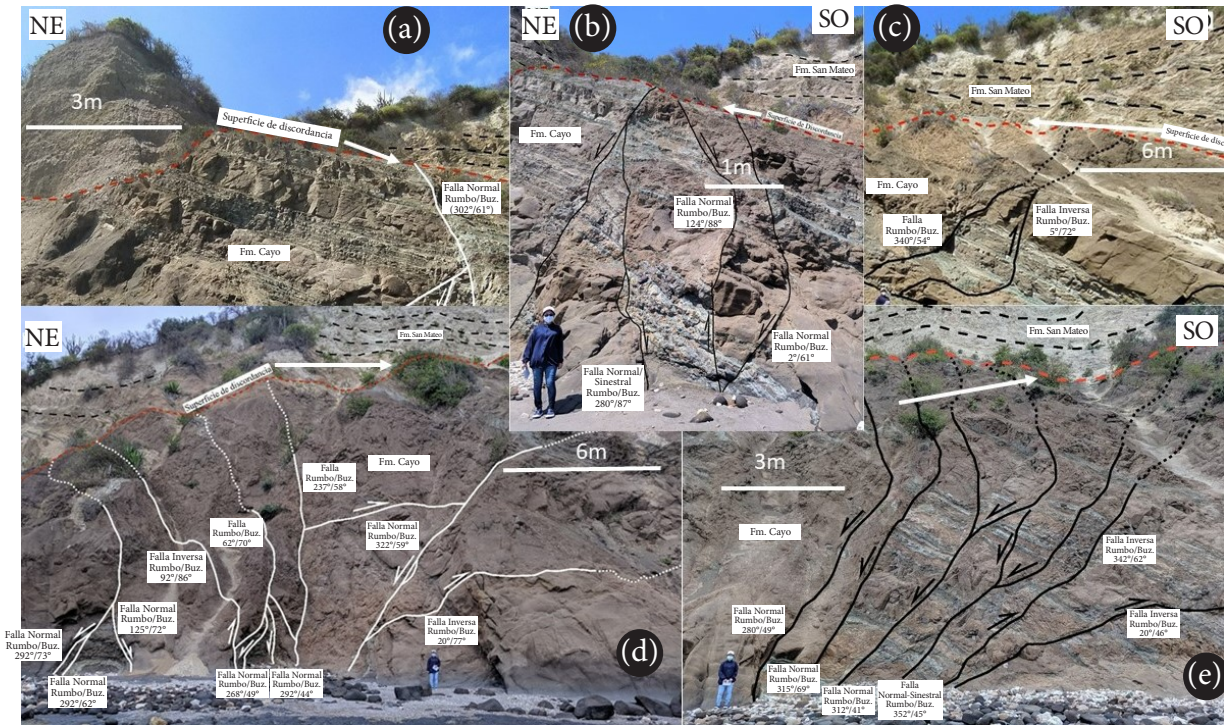


Figura 5. Afloramientos de la Sección Uno puntos 1, 3, 4, 5 donde se observan fallas normales e inversas (líneas continuas blancas o negras), superficie de discordancia (línea roja discontinua) y estratos de formación San Mateo (líneas discontinuas negras)

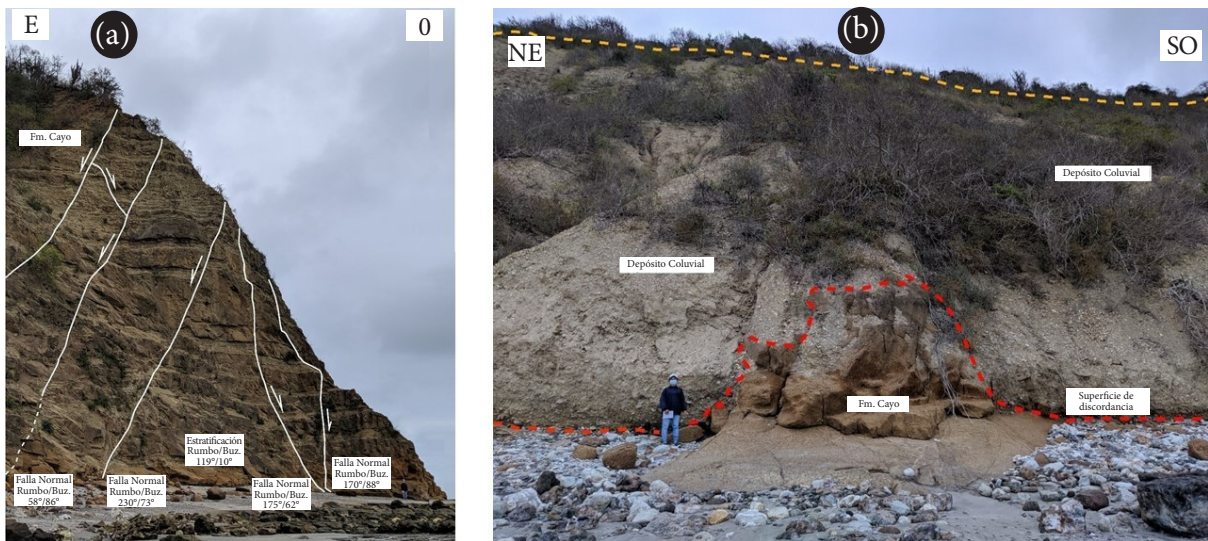


Figura 6. Afloramientos de la Sección Dos donde se observa en el (a) punto 1 un depósito coluvial y en el punto 4 (b) exhibe una cubierta vegetal en el depósito coluvial (línea amarilla entrecortada) y superficie de discordancia (línea roja entrecortada)

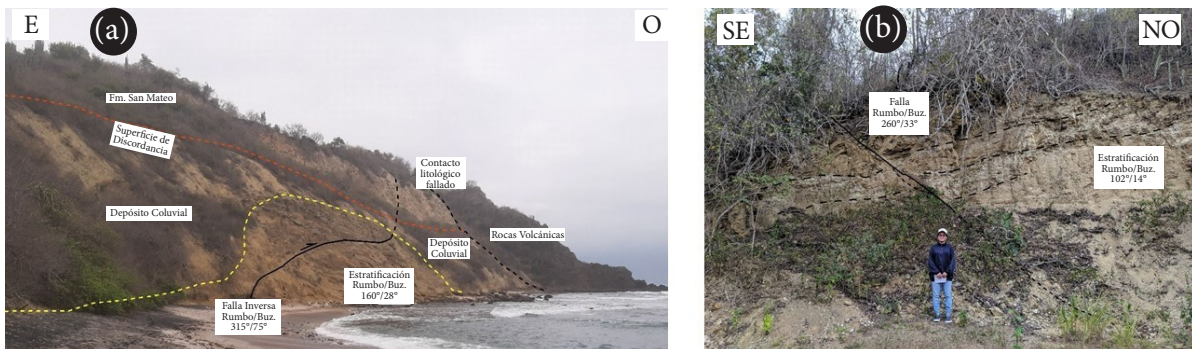


Figura 7. El afloramiento del (a) punto 3 de la Sección 3 donde se observa la presencia de una superficie de discordancia (líneas rojas), depósito coluvial (líneas amarillas) y falla inversa (líneas negras), en el (b) punto 4 donde se observa la presencia de estratos con intercalaciones de arcillolitas y areniscas tobáceas (líneas negras entrecortadas) y falla inversa (línea negra)

3. RESULTADOS

3.1. Mapeo Geológico

La sección estudiada contiene las Formaciones Cayo (Cretácico Superior), Fm. San Mateo (Eoceno medio-Eoceno superior), Fm. Piñón (Jurásico – Cretácico Inferior) además de depósitos coluviales y aluviales (Cuaternario).

La columna estratigráfica muestra el contacto erosional entre la Formación Cayo y la Formación San Mateo en el punto 1 de la Sección Uno (Fig. 8). La Formación Cayo es una secuencia de rocas sedimentarias compuestas principalmente de arenisca de grano fino y lutitas. Esta formación tiene un espesor total de 16.5 metros y presenta intercalaciones de arenisca de grano fino y lutitas con un espesor de 1 metro. La Formación San Mateo, por otro lado, consiste en una secuencia de limolitas con un espesor de 3.5 metros. El contacto erosional entre estas dos formaciones sugiere que hubo cambios en las condiciones ambientales y sedimentarias durante la deposición de estas formaciones en la zona de estudio.

El depósito coluvial sobryace a la Formación San Mateo en el punto 5 de la Sección Dos (Fig. 9). La Formación San Mateo representa una secuencia de 3.5 metros y el depósito coluvial muestra un espesor de 6.5 metros.

En el punto 5 de la Sección Dos, se observa que el depósito coluvial sobryace a la Formación San Mateo. El depósito coluvial es una acumulación de sedimentos que se han desplazado por gravedad. Estos sedimentos suelen ser mezclas de diferentes tamaños de fragmentos rocosos y de suelo. Es posible que los sedimentos que formaron el depósito coluvial se hayan acumulado en la base de la ladera después de un movimiento de masa, como un deslizamiento de tierra.

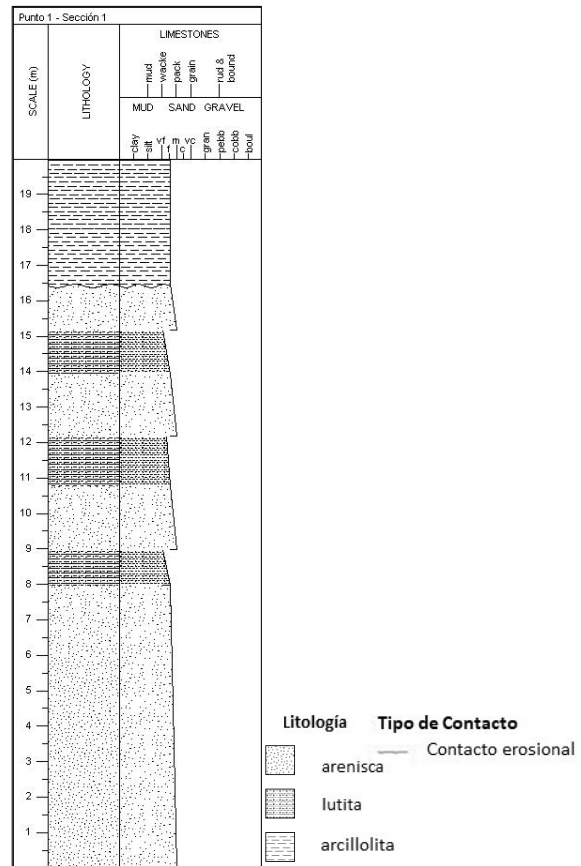


Figura 8. El afloramiento P1S1 de 20 metros de altura comprende de areniscas de grano grueso a medio con intercalaciones de estratos de lutitas silicificadas. Clasificación Udden- Wentworth: clay (arcilla), silt (limo), vf (muy fino), f (fino), m (medio), c (coarse), vc (muy grueso), granule (grano), pebble (guijarro), cobble (grava), boulder (bloque)

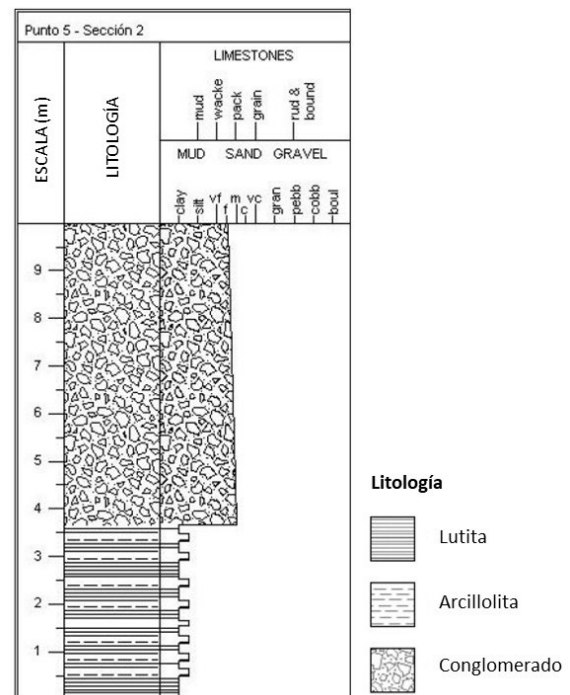


Figura 9. El afloramiento P5S2 de 10 metros de altura está compuesto por una secuencia de estratos de lutitas tobáceas silicificadas y arcillolitas seguido de espesores centimétricos. Clasificación Udden- Wentworth: clay (arcilla), silt (limo), vf (muy fino), f (fino), m (medio), c (coarse), vc (muy grueso), granule (grano), pebble (guijarro), cobble (grava), boulder (bloque).

El depósito coluvial sobreyace a la Formación San Mateo y en el punto 4 de la Sección Tres. La Formación San Mateo representa una secuencia de 3.5 metros y el depósito coluvial muestra un espesor de 0.5 metros.

En el punto 4 de la Sección Tres, también se observa que el depósito coluvial sobreyace a la Formación San Mateo (Fig. 10). En este caso, el espesor del depósito coluvial es de 0.5 metros, lo que indica que la acumulación de sedimentos en esta zona fue relativamente menor en comparación con otros puntos de la sección.

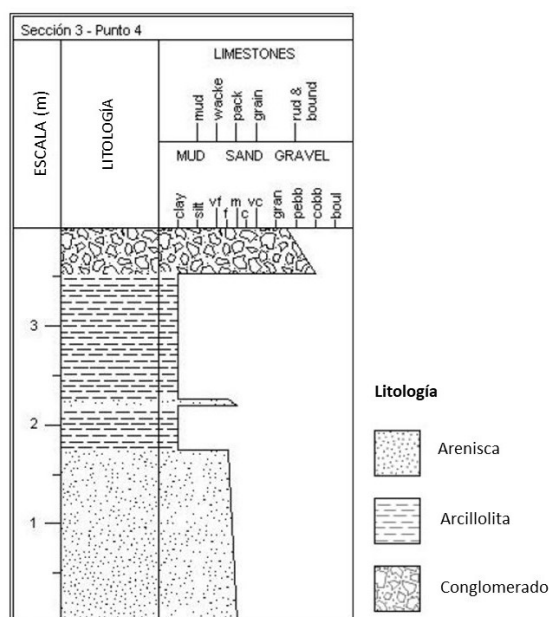


Figura 10: El afloramiento P4S3 de 4 metros de altura compuesto por areniscas tobáceas de grano medio en espesores decimétricos, arcillolitas laminadas de espesores decimétricos y conglomerados. Clasificación Udden- Wentworth: clay (arcilla), silt (limo), vf (muy fino), f (fino), m (medio), c (coarse), vc (muy grueso), granule (grano), pebble (guijarro), cobble (grava), boulder (bloque).

El mapa geológico a escala 1: 15.000 se elaboró tomando en consideración los datos estructurales y el cambio litológico entre formaciones (Fig. A2). Las litologías de la Fm. Piñón del Cretácico y la Fm. Cayo del Cretácico Superior que constan en el área de estudio también se evidencian en la hoja geológica Jipijapa 1: 100 000. Sin embargo, la Fm. San Mateo y parte de los depósitos cuaternarios no se identifican en dicha hoja geológica.

3.2 Análisis Petrográfico

3.2.1. Sección Uno

En la muestra MTJ-01 de la Formación Cayo se observa una arenisca de granos gruesos angulares y subredondeados contenidos en una matriz arenosa en tonalidades marrón amarillento pálido a naranja

amarillento oscuro (Fig. 11). Macroscópicamente la roca presenta pequeños cristales de cuarzo y fragmentos líticos de carbonato de otras rocas trazas.

Petrográficamente se ha identificado cuarzo, feldespatos, fragmentos líticos, minerales de alteración y minerales opacos. Presenta textura clástica con clastos fino-granulares, finas concentraciones de clastos de feldespato y de otras rocas volcánicas y aproximadamente 15 % de matriz microcristalina. En cuanto a feldespatos se observan en gran porcentaje en formas angulosas de hasta 2mm de tamaño, su extinción es oblicua.

Consta un mayor porcentaje de fragmentos líticos redondeados que sugiere que estos han sido transportados por un agente externo. Estos corresponden a rocas ígneas de composición andesítica a basáltica y en menor proporción a rocas intrusivas como dioritas y gabros, y pocos clastos rojizos de tamaños menores a 4mm. El diámetro de estos líticos se puede estimar entre 1 a 2mm (20 %), 0.5 a 1mm (60 %) y líticos menores a 0.5 mm de diámetro (20 %). Por último, se observan minerales de alteración moderadamente cloritizados y silicificados que indican que estos fragmentos han sufrido procesos de alteración química en algún momento. La presencia de trazas de carbón y minerales opacos como la magnetita sugiere que estos fragmentos provienen de una zona con actividad volcánica reciente.

La roca presenta un alto porcentaje de líticos, principalmente volcánicos andesíticos y basálticos alterados o cloritizados. La composición modal estimada de esta roca es: 5 % Cuarzo, 10 % Feldespatos, 65 % Fragmentos líticos, 15 % Minerales de alteración, 5 % Opacos. Esta composición corresponde a una Litoarenita.

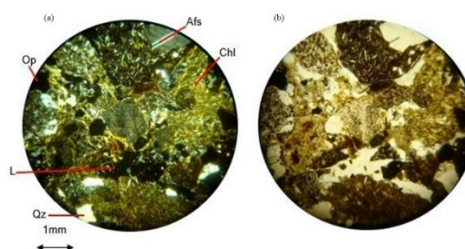


Figura 11. Microfotografía de la muestra MTJ-01 en (a) nicolo cruzados donde se observan minerales opacos (Op), feldespatos alcalinos (Afs), clorita (Chl), cuarzo (Qz), fragmentos líticos (L) y en (b) nicolo paralelos (escala de 1mm).

3.2.2 Sección Dos

La muestra MTJ-02 de la Formación Cayo corresponde macroscópicamente a una arenisca masiva de grano fino a medio, color amarillo grisáceo con detritos de rocas verdes cloritizadas y poco cuarzo (Fig. 12). La

roca presenta una matriz parcialmente silícea y cloritizada, además de gránulos milimétricos de magnetita por su bajo magnetismo presentado con el lápiz rayador magnético.

Se identificaron cuarzos, feldespatos, fragmentos de rocas, minerales de alteración y minerales opacos. Su textura es clástica de grano fino en una matriz de 10 % sílice y detritos en secciones con limonita. Se ha identificado cuarzo de menos de 1mm de diámetro, de forma redondeada a sub-redondeada, con extinción paralela. Se presenta mayor contenido de feldespatos en formas angulosas a subredondeadas y su extinción es inclinada.

Los fragmentos de roca poseen formas redondeadas a subredondeadas de composición andesítica a basáltica y unas pocas de color rojizo menores a 2mm. En la muestra se visualizan clastos entre 1 a 2mm (5 %), entre 0.5 a 1.0mm (70 %) y menores a 0.5mm (25 %). En cuanto a minerales de alteración, se observan minerales alterados cloritizados y silicificados. Los minerales opacos son metálicos magnéticos (magnetita).

La composición modal estimada de minerales se representa en: 10 % Cuarzo, 25 % Feldespatos, 45 % Fragmentos de líticos, 15 % Minerales de alteración y 5 % Opacos. Esta composición corresponde a una Litoarenita Feldespática.

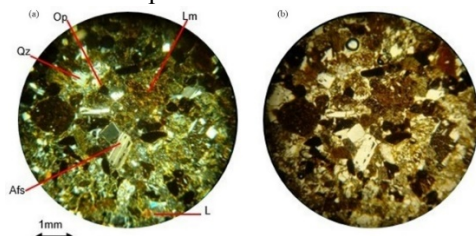


Figura 12. Microfotografía de la muestra MTJ-02 en (a) nicols cruzados donde se observa la presencia de minerales opacos (Op), cuarzo (Qz), feldespatos alcalinos (Afs), fragmentos líticos (L) y fragmentos líticos metamórficos (Lm) y en nicols paralelos (escala 1mm)

3.2.3. Sección Tres

En muestra MTJ-03 de la Formación Piñón se observa macroscópicamente una roca volcánica compacta en tonalidades gris oscuro verdoso, en secciones porosa y vesicular (Fig. 13). La muestra presenta una textura cristalina porfídica. Se observan plagioclasas, minerales ferromagnesianos, minerales de alteración y otros minerales contenidos. Existe aproximadamente un 15 % de matriz microcristalina de piroxenos y plagioclasas.

Las plagioclasas presentan forma euhedrales a subhedrales. Por su extinción inclinada se identifican entre andesinas a bitownitas. Los minerales

ferromagnesianos corresponden a piroxenos (augitas), pocos cristales desarrollados de olivino, se ha identificado por su relieve y fuerte birrefringencia de segundo orden. Los bordes están alterados mediante cloritización.

Se observan minerales de alteración como: clorita y epidota, finas vetillas y en pequeñas concentraciones de carbonato, roca alterada cloritizada, en sus bordes con características de zonas serpentinizadas, la roca contiene minerales magnéticos y sulfuros diseminados. Se presentan finas vetillas discontinuas rellenas por minerales secundarios principalmente calcita. Además, se presenta el cuarzo como producto de la influencia hidrotermal.

Se observan otros minerales como: olivino, clorita y serpentina producto de alteración de minerales ferromagnesianos. La composición modal estimada de minerales se representa en: 50 % Plagioclasas, 25 % Piroxenos, 5 % Olivino, 15 % Minerales de alteración, 5 % Opacos. Esta composición corresponde a un Basalto Olivínico.

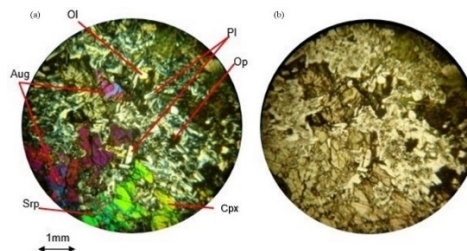


Figura 13. Microfotografía de la muestra MTJ-03 en (a) nicols cruzados donde se observa la presencia de olivino (Ol), augita (Aug), plagioclasa (Pl), minerales opacos (Op), serpentina (Srp), clinopiroxeno (Cpx) y en (b) nicols paralelos (escala de 1mm).

3.3. Análisis Estructural

Se tomaron 39 datos estructurales en la Sección Uno, en los cuales en 26 se observa una cinemática normal, en 6 una cinemática normal-sinistral, 7 una cinemática inversa. El cabeceo fue medido en cinco datos estructurales de la Sección Uno con una media de 44°, un valor mínimo de 32° y un valor máximo de 59° (Tabla 1).

Tabla 1. Cinemática de los Datos Estructurales de todas las secciones.

Sección 1	
Punto	Cinemática de los Datos Estructurales
PTJ-01	cuatro fallas normales
PTJ-02	dos fallas normales y una falla normal- sinistral
PTJ-03	dos fallas normales y una falla inversa
PTJ-04	ocho fallas normales y dos fallas inversas
PTJ-05	tres fallas normales, una falla normal-sinistral y una falla inversa
PTJ-06	cuatro fallas normales y dos fallas normales sinestrales
PTJ-07	tres fallas normales, dos fallas inversas, dos fallas normales-sinestrales

Sección Dos	
PTJ-03	cuatro fallas normales
PTJ-05	dos fallas normales
Sección Tres	
PTJ-03	una falla inversa
PTJ-04	una falla normal

3.3.1. Sección Uno

En el diagrama de contorno, se evidencia una mayor concentración de polos, representando su máxima densidad con una orientación de rumbo 161° , buzamiento 40° y azimut 251° en los planos de fallas (Fig. 14).

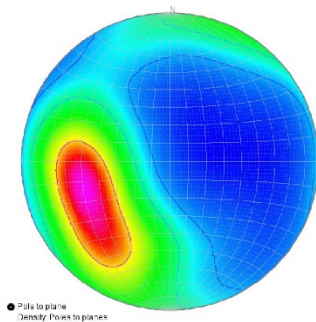


Figura 14. Diagrama de contornos de densidades para la Sección Uno con 39 puntos.

La orientación principal corresponde a rumbo 84.4° (usando la regla de la mano derecha) y buzamiento 40° (Fig. 15). El cabeceo y el azimut del polo al plano de mejor ajuste (eje Beta) equivalen a 51° y 84° , respectivamente.

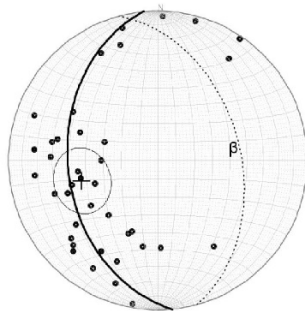


Figura 15. Diagrama estereográfico Bingham de la Sección Uno usando 39 puntos.

El diagrama de rosetas representa mayor tendencia con dirección preferencial de fracturamiento 130° (NO-SE). La tendencia secundaria muestra una dirección 170° (NO-SE). Por último, la menor tendencia presenta una dirección 70° (NE-SO) (Fig. 16).

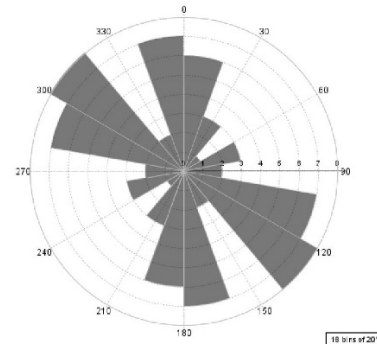


Figura 16. Diagrama de Roseta para la Sección Uno.

3.3.2. Sección Dos

La orientación principal corresponde a rumbo 231° (usando la regla de la mano derecha) y buzamiento 32° (Fig. 17). El cabeceo y el azimut del polo al plano de mejor ajuste (eje Beta) equivalen a 58° y 231° , respectivamente.

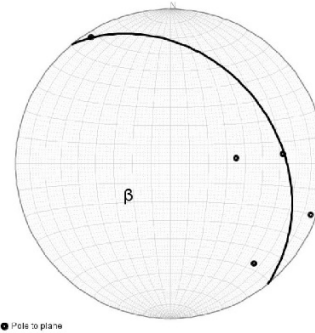


Figura 17. Diagrama estereográfico Bingham de la Sección Dos usando seis puntos.

3.3.3. Sección Tres

La orientación principal corresponde a rumbo 324° (usando la regla de la mano derecha) y buzamiento 60° (Fig. 18). El cabeceo y el azimut del polo al plano de mejor ajuste (eje Beta) equivalen a 30° y 324° , respectivamente.

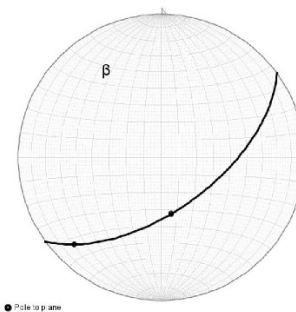


Figura 18. Diagrama estereográfico Bingham para la Sección Tres con dos puntos.

El análisis estructural detectó una gran cantidad de puntos en afloramientos de la Sección Uno ya sea para fallas normales o inversas con la composición de litoarenitas. En la Sección Dos, se muestra una menor cantidad de puntos para fallas geológicas de

litoarenitas feldespáticas. En la Sección Tres, se representa la menor cantidad de datos estructurales para el basamento (Fig. A3).

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se pudo identificar y clasificar areniscas tipo Litoarenita y Litoarenita Feldespática. La presencia de feldespatos en las areniscas indica una procedencia cercana de las rocas fuente, ya que los feldespatos son minerales relativamente inestables en condiciones de meteorización y transporte a largas distancias. Los minerales predominantes son el cuarzo (Qz), feldespatos (F) y fragmentos líticos (L) en rocas de la Fm. Cayo y San Mateo. Por otro lado, la presencia de fragmentos líticos redondeados sugiere una historia de transporte y retrabajo de los sedimentos. Esto concuerda con la interpretación de que la Formación San Mateo fue formada por la acumulación marina de aguas someras en la cuenca Manabí [21]. La identificación y clasificación de las areniscas es importante para inferir la procedencia de los sedimentos y su historia deposicional.

El basamento corresponde a un Basalto Olivínico donde los minerales predominantes son piroxenos (Px) y plagioclasas (Plg) en rocas de la Fm. Piñón. El magmatismo del arco de islas, relacionado con el proceso de subducción, tiene una composición desde basáltica hasta riolítica [21]. Pizarro [22] reconoció Litoarenitas según el contenido de cuarzo, feldespato y fragmentos líticos en la Fm. San Mateo hacia el sur del área de estudio.

La parte central del margen activo ecuatoriano que se localiza donde colisiona la Cordillera de Carnegie está sujeta a una actividad sísmica regular con eventos sísmicos de magnitud mayor a 6 [20]. Los epicentros se detectan a una profundidad de 5 km, 8 km, 10 km para los eventos sísmicos E2, E5 y E1, respectivamente. El área de estudio cerca del Parque Nacional Machalilla se localiza a una distancia de 55 km en línea recta del hipocentro E2, unos 83 km del E1 y unos 104 km del E5. La cercanía del área de estudio a estos epicentros sugiere la posibilidad de que eventos sísmicos de menor magnitud puedan afectar la zona de estudio.

La distribución de los rasgos estructurales no es uniforme a lo largo de las tres secciones, siendo la Sección Uno la que presenta mayor cantidad de ellos donde se registraron un total de siete puntos, mientras que en la sección dos se registraron cinco puntos y finalmente, en la Sección Tres se tomaron dos puntos, con evidencia estructural en campo. Esto puede deberse a diferencias en las características de las formaciones geológicas expuestas en cada sección, así

como a variaciones en los procesos geológicos y tectónicos que han afectado la zona. Existen diversos procesos geológicos: erosión, meteorización y desprendimiento de rocas. Las fallas normales e inversas en las areniscas y las areniscas tobáceas se relacionan estructuralmente con el complejo plegado del arco de islas de la formación Macuchi y la formación Cayo. Entre ambas formaciones se alcanza una gran potencia de 10 kilómetros debido a su flexión.

El área de estudio está experimentando procesos tectónicos complejos que involucran tanto esfuerzos extensionales como compresionales, lo que se refleja en la presencia de fallas normales e inversas y en los deslizamientos que cortan las estratificaciones con buzamientos entre medio y alto hacia el Oeste [23]. El análisis estructural demostró que el área de estudio se encuentra influenciada por tendencias con orientación NE-SO para las areniscas. La orientación principal dio como resultado: rumbo 84.4° para la Sección Uno y 230.8° para la Sección Dos con buzamiento moderado entre 40° y 32° con cabeceo entre 51° y 58°, respectivamente. Por consiguiente, esto se podría relacionar con lo que establecen Enríquez y Espinosa [24] que determinaron que la formación Cayo se encuentra en deformación por esfuerzos extensionales y compresionales en orientación E-O.

En este estudio, se realizó la medición de planos de fallas con sus respectivos indicadores cinemáticos: 26 fallas normales, seis fallas normales sinestrales y siete fallas inversas. Debido a que ciertos datos estructurales fueron tomados del basalto de la Formación Piñón, existen pocos datos para realizar la estadística de la geología estructural en la Sección Tres.

Los esfuerzos extensionales pueden generar fallas normales, las cuales afectan a las formaciones geológicas de la zona, como la Formación Cayo y Piñón. En contraste, los esfuerzos compresionales son resultado de la acreción de las formaciones cretácicas. Además, se han identificado dos fallas importantes, la S1 y S2, que se extienden por 22 km y 43 km respectivamente y que son sub-paralelas a la fosa de subducción de orientación NNE-SSO de cinemática inversa (Ix) con componente dextral (Dx) [25, 26]. Estas fallas tienen cinemática inversa (Ix) con componente dextral (Dx). En la Sección Uno, se observa una cinemática preferencialmente normal, lo que concuerda con los registros de esfuerzos extensionales en la zona, que han sido reportados en estudios previos como la campaña SISTEUR, en la que se utilizaron sismómetros marinos.

La combinación de campos de esfuerzos compresionales y extensionales puede generar complejas estructuras geológicas, como pliegues y

fallas, que dan lugar a la formación de cuencas y montañas. En el caso de la zona de estudio, la combinación de estos campos de esfuerzos parece estar relacionada con la presencia de fallas principales en dirección 330° y 315° NO, paralelas a la cuenca del talud [27]. Además, la mayor incidencia de esfuerzos extensionales en la Sección Uno puede explicar la predominancia de fallas normales en esta zona.

Las cuencas de antearco son depresiones submarinas que se forman en la parte frontal de la zona de subducción. Durante los periodos de convergencia rápida entre 48 y 37 Ma, estas cuencas se rellenaron con sedimentos marinos, mientras que durante los periodos de convergencia lenta se registró una mayor erosión [28]. Se estableció que la fuente del material terrígeno de la Formación Cayo pudo ser la zona volcánica del arco de islas. Las cuencas de antearco se localizan a lo largo de estructuras del sistema transcurrente dextral con orientación NE-SO y NNE-SSO con fallas en relevo por la deformación del bloque Nor-andino [28].

Es posible que la Formación Cayo se haya formado a partir de sedimentos transportados desde la zona volcánica del arco de islas. Además, las cuencas de antearco que se registran en la zona de estudio están relacionadas con estructuras del sistema transcurrente dextral, con orientaciones NE-SO y NNE-SSO, y con fallas en relevo debido a la deformación del bloque Nor-andino. Estos procesos geológicos pueden estar relacionados con la formación y evolución de la geología estructural de la zona de estudio.

En el sector de Puerto Cayo, se describe a la geomorfología con un macizo imponente con relieves disectados y disimetría marcada [23]. El análisis estructural a través de iGAS determinó que el área de estudio estuvo sujeta a movimientos de régimen extensional y compresional en dirección NE-SO y E-O.

Los estudios locales de la cinemática de fallas y de los datos estructurales permiten comprender mejor el mecanismo tectónico responsable de la deformación en la zona de estudio mediante la cinemática de fallas y la toma de datos estructurales en una extensión de 3 km en total. Estos estudios se complementan con otros a escala regional, como los realizados en el Arco de Talara y la morfología del margen continental del Ecuador a escala regional [29, 30, 31]. Se ha encontrado que las fallas normales sinestrales están controladas por la interacción de la placa Nazca y la placa Caribeña, como se ha observado al norte de la latitud 5°N [32].

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En la descripción petrográfica, se clasificó que la muestra MTJ-01 corresponde a Litoarenita, por su contenido de Qz- F- L dentro de la Sección Uno. La muestra MTJ-02 se clasificó como Litoarenita feldespática dentro de la Sección Dos. La muestra MTJ-03 corresponde a basalto olivínico, por su contenido de Plg-Px-Ol dentro de la Sección Tres utilizando el diagrama para rocas volcánicas.

La distribución de las rocas aflorantes consiste en una superficie de discordancia por el contacto erosional entre la Formación Cayo y la Formación San Mateo para todos los siete puntos en la Sección Uno. Por otro lado, existe un contacto depósitos coluviales y la Formación San Mateo para la gran mayoría de puntos en la Sección Dos. Por último, al llegar al extremo sur del área de estudio nos encontramos con las rocas del basamento de la Formación Piñón.

El análisis estadístico mediante el diagrama de contornos en la Sección Uno resultó en una máxima densidad de rumbo 161° y buzamiento 40° en fallas normales (Nx) y fallas inversas (Ix). Mientras que en la Sección Dos se encontró máxima densidad de rumbo 17° con buzamiento 17° para fallas Nx. Por último, en la Sección Tres se determinó la máxima densidad de rumbo 117° y buzamiento 40° para fallas normales (Nx) e inversas (Ix).

En el análisis de rosetas en la Sección Uno se observó una mayor distribución preferencial en dirección NO-SE en fallas con cinemática normal (Nx), cinemática (Ix) y tendencias secundarias en NO-SE y menor en NE-SO. El diagrama de rosetas en la Sección Dos, se representó mayor tendencia preferencial en dirección NE-SO, tendencia secundaria en NE-SO y menor en NE-SO para fallas normales (Nx). Por último, en la Sección Tres el diagrama de rosetas demostró una tendencia preferencial O-E y NO- SE.

En este estudio, se realizó la medición de planos de fallas con sus respectivos indicadores cinemáticos: 26 fallas normales, 6 fallas normales sinestrales y 7 fallas inversas. En el norte del área de estudio nombrado como Sección Uno, se detecta una combinación de campos de esfuerzos compresionales y extensionales con mayor incidencia de esfuerzos extensionales.

5.2 Recomendaciones

Realizar estudios petrográficos y geoquímicos para determinar el origen y procedencia tectónica de los afloramientos rocosos de las Formaciones Cayo y Piñón a lo largo de la cordillera costanera.

Establecer un análisis de estabilidad de taludes en rocas y suelos para determinar los elementos de soporte de suelos.

Implementar estudios sísmicos a lo largo de la costa ecuatoriana.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chunga, K., Livio, F. A., Martillo, C., Lara-Saavedra, H., Ferrario, M. F., Zevallos, I., & Michetti, A. M., "Landslides triggered by the 2016 Mw 7.8 Pedernales, Ecuador earthquake: Correlations with ESI-07 intensity, lithology, slope and PGA-h". *Geosciences*, 9(9), 371, 2019.
- [2] T. Feininger, and C. Bristow, "Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador," *Geologische Rundschau*, vol. 69, no. 3, pp. 849-874, doi:10.1007/BF02104650, 1980.
- [3] H. Tschopp, "Geologische skizze on Ecuador," *Bulletin de l'Association Suisse de Géologie*, vol. 15, pp. 14 – 15, 1948.
- [4] E. Jaillard, M. Ordoñez, S. Benítez, G. Berrones, Jimenez, N., G. Montenegro, and I. Zambrano, "Basin development in an accretionary, oceanic floored fore-arc setting: Southern Coastal Ecuador during late Cretaceous-Late Eocene Time," *Petroleum basins of South America, American Association of Petroleum Geologists*, pp. 615-631, 1995.
- [5] E. Jaillard, H. Lapierre, M. Ordonez, J. T. Alava, A. Amortegui, & J. Vanmelle, "Accreted oceanic terranes in Ecuador: southern edge of the Caribbean Plate?," *Geological Society, London, Special Publications*, 328(1), 469-485, 2009.
- [6] J.-M. Nocquet, & P. Mothes, "Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador, en síntesis de los resultados de investigación geológica y geofísica sobre el Margen Ecuatoriano la costa la cordillera submarina de Carnegie y de la plataforma volcánica de Galápagos," *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador*, pp. 83-95, 2009.
- [7] J. Y. Collot, F. Michaud, A. Alvarado, B. Marcaillou, M. Sosson, G. Ratzov, A. Pazmiño, "Visión general de la Morfología Submarina del margen convergente de Ecuador - Sur de Colombia: Implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la cordillera de Carnegie," *Geología y Geofísica Marina Y Terrestre Del Ecuador, Publicación CNDM-INOCAR-IRD, PSE001-09*, Guayaquil, Ecuador, pp. 47-74, 2009.
- [8] R. Trenkamp, J. Kellogg, J. Freymueller, and P. Mora, "Wide plate margin deformation, southern Central America and Northwestern South America", *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 157 - 171, 2002.
- [9] C. Witt, J. Bourgois, F. Michaud, M. Ordoñez, N. Jiménez and M. Sosson, "Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the North Andean block tectonic escape," *Tectonics*, vol. 25, no. 3, pp. 22, doi:10.1029/2004TC001723, 2006.
- [10] J. Tamay, J. Galindo-Zaldívar, Y. M. Martos & J. Soto, "Gravity and magnetic anomalies of ecuadorian margin: Implications in the deep structure of the subduction of Nazca Plate and Andes Cordillera". *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 68-80, 2018.
- [11] E. Boltovskoy, "Benthic Cenozoic Foraminifera from Ecuador," *Marine Micropaleontology*, vol. 17, no. 1-2, pp. 171-172, 1991.
- [12] C. Reynaud, É. Jaillard, H. Lapierre, M. Mamberti, & G. H. Mascle, "Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: their place in the geodynamic evolution of northwestern South America," *Tectonophysics*, vol. 307, no. 3-4, pp. 235-254, 1999.
- [13] L. Luzieux, "Origin and late Cretaceous-Tertiary evolution of the Ecuadorian forearc," Doctoral Thesis, Institute of Geology, ETH Zürich, Switzerland, doi:10.3929/ethz-a-005348206, 2006.
- [14] G. Cantalamessa, D. Celma, and L. Ragaini, "Sequence stratigraphy of the Punta Ballena Member of the Jama Formation (Early Pleistocene, Ecuador): insights from integrated sedimentologic, taphonomic and paleoecologic analysis of molluscan shell concentrations," *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 216 no. 1-2, pp. 1-25, doi:10.1016/j.palaeo.2004.09.012, 2005.
- [15] Villitanga, C., & Rubén, M., "Tectonosequence Analysis Of The Manabi Basin, Ecuador" Tesis de Grado, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay, 2020.
- [16] H. Thalmann, Micropaleontology of Upper Cretaceous and Paleocene in Western Ecuador. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*, vol. 30, no. 3, pp. 337 – 347, 1946.
- [17] M. Aguirre, "Susceptibilidad al deslizamiento de los suelos y rocas de la Provincia de Manabí," Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2005.
- [18] P. Reyes and F. Michaud, "Mapa Geológico de la Margen Costanera Ecuatoriana (1:500000)," Quito-Ecuador: *EP Petroecuador-IRD*, 2012.

- [19] L. Félix, "Geocronología de la Formación Cayo (K2) en Cerro Guayabal Provincia de Manabí," Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [20] N. Bethoux, M. Segovia, V. Alvarez, J.-Y. Collot, F. Charvis, A. Gailler, & T. Monfret, "Seismological study of the central Ecuadorian margin: Evidence of upper plate deformation," *Journal of South American Earth Science*, vol. 31, no. 1, pp. 139-152, doi:10.1016/j.jsames.2010.08.001, 2011.
- [21] A. Paladines & J. Soto, "Geología y yacimientos minerales del Ecuador". Universidad Técnica Particular de Loja, 2010.
- [22] H. Pizarro, "Estratigrafía y Petrografía de las Areniscas pertenecientes a la Formación San Mateo de la Parroquia Rural Machalilla del Cantón Puerto López, provincia de Manabí," Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2021.
- [23] A. Winckel, "Los Paisajes Naturales del Ecuador. The regions and landscapes of Ecuador. Basic Geography of Ecuador", Volume IV, vol 2. *Geographic Institute of Ecuador-IGM-ORSTOM-IPGH*. 1997.
- [24] J. Enríquez and M. Espinosa, "Análisis Tectono-Estratigráfico de la Cordillera Costera entre las poblaciones de Jipijapa y la Rinconada," Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018.
- [25] A. Egüez, A. Alvarado, H. Yepes, M. N. Machette, C. Costa, R. L. Dart, & L. A. Bradley, "Database and map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions". *US Geological Survey Open-File Report*, 3, 289, 2003.
- [26] DGGM, "Mapa Geológico Detallado del Ecuador, hoja Montecristi". *Ministerio de Recursos Naturales y Turismo*, Quito, 1970.
- [27] H. Egüez, "Sedimentología y Estratigrafía de la Formación San Mateo Provincia de Manabí – Ecuador," Tesis de grado, FICT, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 1985.
- [28] J. F. Dumont, E. Santana, M. A. Bonnardot, N. Pazmiño, K. Pedoja, & B. Scalabrino, "Geometry of the coastline and morphology of the convergent continental margin of Ecuador". *Geological Society*, London, *Memoirs*, 41(1), 327-338, 2014.
- [29] M.C. Daly, "Correlations between Nazca/Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador". *Tectonics* 8 (4), 769–790, 1989.
- [30] K. Pedoja, J. F. Dumont, M. Lamothe, L. Ortlieb, J. Y. Collot, B. Ghaleb & B. Labrousse. "Plio-Quaternary uplift of the Manta Peninsula and La Plata Island and the subduction of the Carnegie Ridge, central coast of Ecuador". *Journal of South American Earth Sciences*, 22(1-2), 1-21, 2006.
- [31] K. Pedoja, L. Ortlieb, J. F. Dumont, M. Lamothe, B. Ghaleb, M. Auclair, & B. Labrousse. "Quaternary coastal uplift along the Talara Arc (Ecuador, Northern Peru) from new marine terrace data". *Marine Geology*, 228(1-4), 73-91, 2006.
- [32] F. Ego, M. Sebrier, A. Lavenu, H. Yepes, A. Egüez, "Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes". *Tectonophysics* 259, 101–116, 1996.

ANEXOS

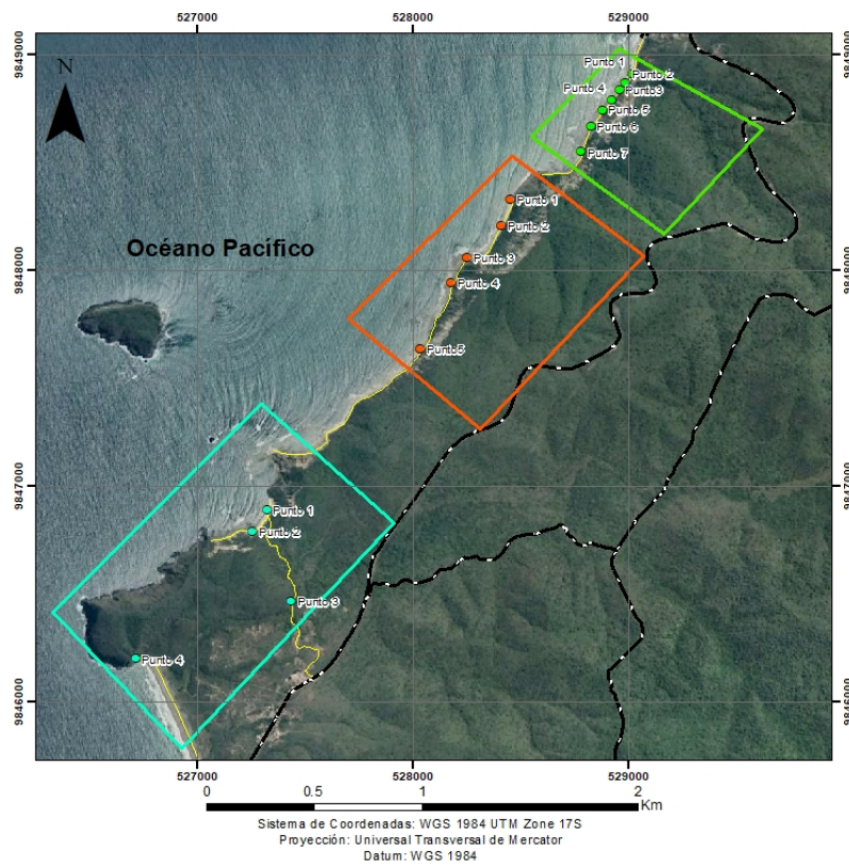


Figura A1. Mapa de ubicación de secciones y puntos de afloramientos al sur de Puerto Cayo, Manabí en dirección NE-SO.

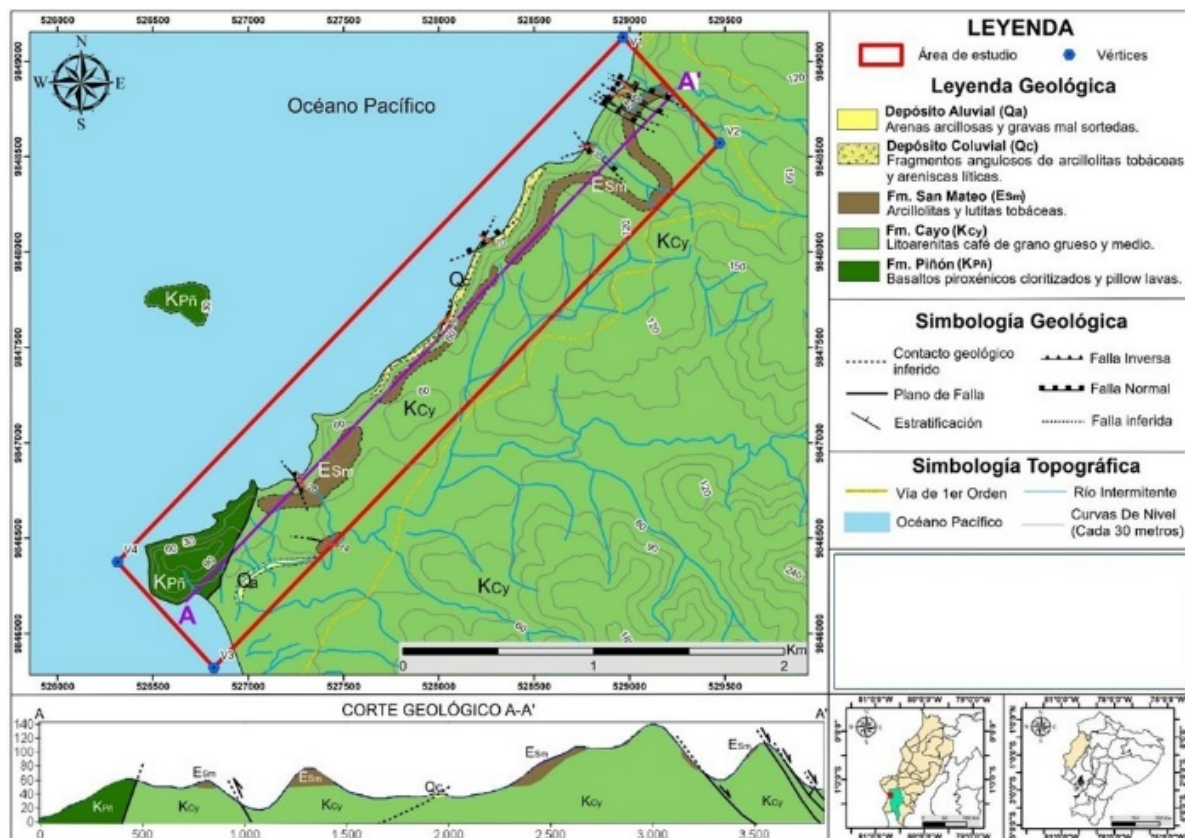


Figura A2. Mapa y corte geológico A-A' del área del estudio, desde la parroquia Puerto Cayo hasta la comuna Salaité. Se mapea a la formación Piñón en la Punta Cerro Viejo y en el Islote Pedernal. Al Nordeste del corte, se observa la predominancia de fallas normales mientras que al Suroeste se observa una falla inversa.

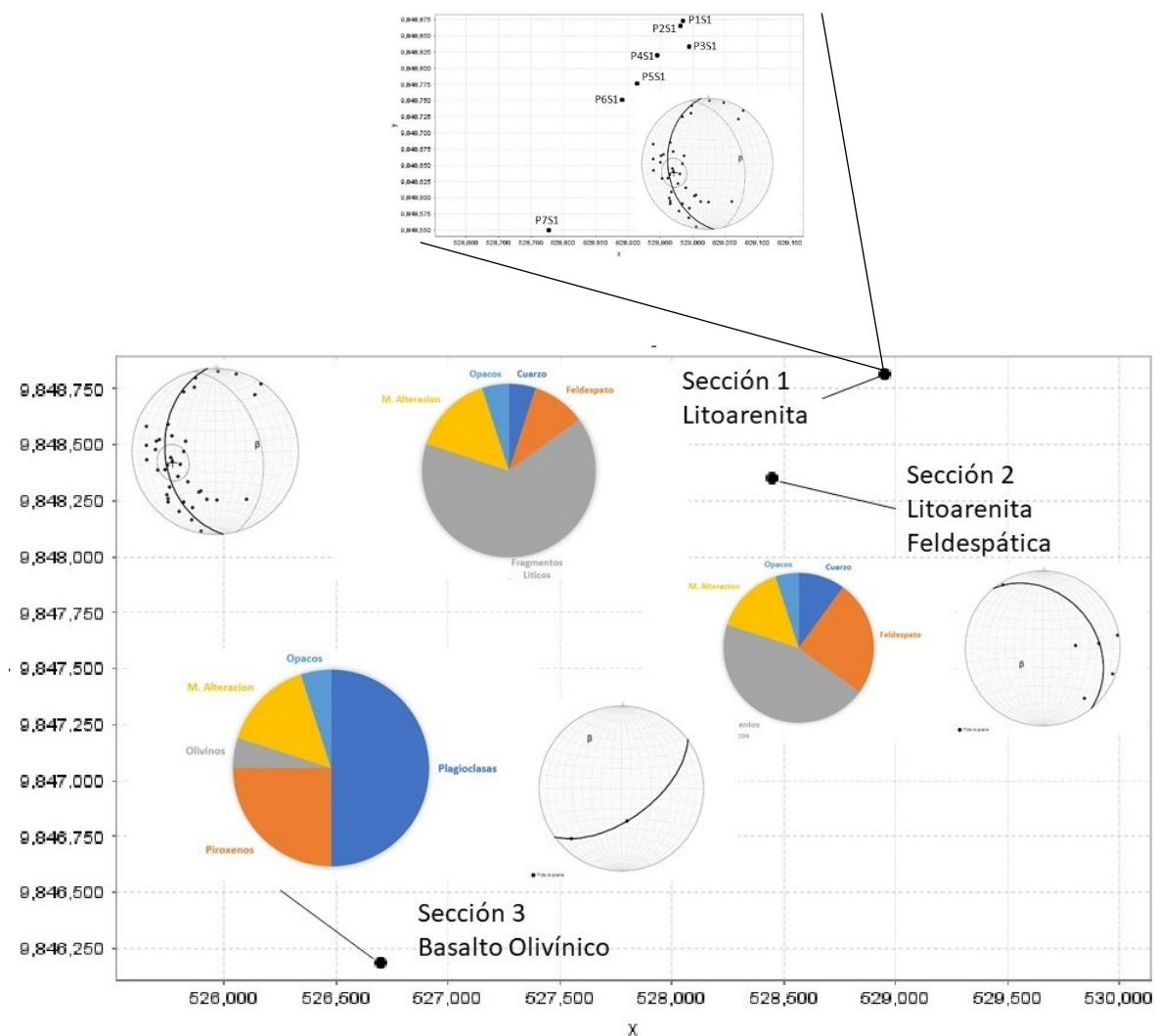


Figura A3. Ubicación del basamento y areniscas con sus respectivos diagramas de composición y geología estructural. Ubicación de puntos Sección Uno con predominancia de fragmento líticos.