



TABAJO DE FIN DE MÁSTER

CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE DETALLE Y
NEOTECTÓNICA DE LA ZONA DE PARAÍSO
(VALLE CENTRAL DE COSTA RICA)

*Detailed geological mapping and neotectonics of
Paraíso zone (Costa Rica Central Valley)*

Autor

Dennis Sojo Rivera

Director

José Luis Simón Gómez

Facultad de Ciencias, Departamento de Geología

2017

Resumen

Este trabajo presenta los datos derivados del cartografiado geológico de la hoja Paraíso (3445-IV-23), escala 1:10.000, ubicada dentro del Valle Central de Costa, junto con los aspectos estructurales e hidrogeológicos de mayor relevancia. En general se determinó la existencia de un basamento rocoso asociado a la Formación Pacacua del Mioceno Superior, sobreyacido discordantemente por materiales provenientes del paleovolcán Irazú, relacionados a la Formación Paraíso del Pleistoceno Medio y a la Formación Reventado del Pleistoceno Superior. Debido a las condiciones climáticas y a la composición de los materiales volcánicos se ha desarrollado la unidad Capa de Laterita el Rincón, la cual aflora en la mayor parte de la hoja. Los materiales anteriores son sobreyacidos discordantemente por los Depósitos Aluviales del Pleistoceno Superior y por los Depósitos Lacustres, mientras que los Depósitos Aluviales Actuales sobreyacen discordantemente a los materiales anteriores debido a cambios en el nivel base de los ríos producto de la tectónica activa en la región. Según observaciones morfológicas se plantea un modelo estructural con un eje de esfuerzos de orientación N-S, compuesto por fallas inversas de orientación E-W, con fallas de desgarre asociadas con orientación NE-SW y NW-SE. El modelo hidrogeológico está conformado por dos acuíferos asociados a coladas de lava, con capacidad intermedia y afectado por los efectos de la actividad tectónica en el sector E de la hoja.

Abstract

This paper presents the data derived from the geological mapping of the Paraíso sheet (3445-IV-23), 1:10.000 scale, located within the Central Valley of Costa Rica, together with the most relevant structural and hydrogeological aspects. In general, the existence of a rocky basement associated with the Pacacua Formation of the Upper Miocene, discordantly overlain by materials from the Irazú paleovolcano, related to the Paraíso Formation of the Middle Pleistocene and to the Reventado Formation of the Upper Pleistocene was determined. Due to the climatic conditions and to the composition of the volcanic materials the unit El Rincón Laterite Bed has been developed, which appears in the greater part of the sheet. The above materials are overlaid discordantly by the Upper Pleistocene Alluvial Deposits and by the Lacustrine Deposits, whereas the Current Alluvial Deposits overlap discordantly to the previous materials due to changes in the base level of the rivers produced by the active tectonics in the region. According to morphological observations, a structural model with an axis of N-S orientation stresses, consisting of E-W orientation inverse faults, with shear faults associated with NE-SW and NW-SE orientation is proposed. The hydrogeological model is formed by two aquifers associated with lava flows, with intermediate capacity and affected by the effects of tectonic activity in the sector E of the leaf.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Planteamiento del trabajo y objetivos.....	1
Trabajo interdisciplinar.....	1
Marco tectónico global.....	2
Marco geológico regional.....	3
Antecedentes de estudios geológicos en la hoja Paraíso.....	6
ESTUDIO DE LOS MATERIALES.....	7
Metodología.....	7
Descripción de las unidades geológicas y sus materiales.....	8
Síntesis y evolución.....	23
ESTUDIO MORFOTECTÓNICO Y ESTRUCTURAL.....	24
Metodología.....	24
Antecedentes.....	25
Descripción morfológica.....	26
Descripción de estructuras.....	29
Síntesis e interpretación.....	31
ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO.....	33
Metodología.....	34
Antecedentes.....	34
Descripción de elementos hidrogeológicos.....	34
Interpretación hidrogeológica.....	37
DISCUSIÓN.....	37
CONCLUSIONES.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	38
ANEXOS.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	3
Figura 2.....	5
Figura 3.....	6
Figura 4.....	9
Figura 5.....	10
Figura 6.....	13
Figura 7.....	14
Figura 8.....	16
Figura 9.....	18
Figura 10.....	20
Figura 11.....	22
Figura 12.....	29
Figura 13.....	30
Figura 14.....	32
Figura 15.....	33
Figura 16.....	36

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del trabajo y objetivos

El presente trabajo pretende plasmar las observaciones e interpretaciones de índole geológica, tectónica e hidrogeológica de la zona de Paraíso, por medio de un mapa detallado de escala 1:10.000 (Anexo 1), correspondiente a la hoja Paraíso (3445-IV-23) del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (IGNCR). Con lo anterior se pretende aportar una base científica y técnica para ulteriores investigaciones en la zona, así como facilitar una base cartográfica geológica para su correspondiente aplicación en la planificación territorial del cantón de Paraíso. Los objetivos planteados son los siguientes:

-Elaborar el modelo geológico para el sector estudiado por medio de la implementación de métodos de campo, geofísica y teledetección, para ser empleado en la planificación territorial del cantón de Paraíso.

-Determinar las principales características estructurales de la región por medio de observaciones directas de campo, geofísica, fotografía aérea y análisis morfométrico, y reflejar dichos resultados en el mapa geológico.

-Describir las principales características de las unidades hidrogeológicas en el subsuelo de la hoja Paraíso por medio de observaciones de campo, análisis de bases de datos de fuentes de agua y aplicación del modelo geológico y Estructural.

-Caracterizar los materiales geológicos aflorantes en el área de estudio mediante su descripción de campo, cartografía geológica, análisis petrográfico y registros de perforación de sondeos (pozos).

-Obtener datos del grado de actividad de las fallas mediante la cartografía de los materiales, fotointerpretación y análisis morfotectónico.

Trabajo interdisciplinar

Este tipo de trabajo implica la implementación de varias técnicas y métodos asociados a las diferentes ramas de la geología, en este caso correspondiendo a los diferentes

capítulos que contiene el presente documento: Estudio de materiales, Estudio morfotectónico y estructural y Estudio hidrogeológico.

A fin de facilitar el seguimiento del trabajo, los métodos y técnicas empleados en cada uno de esos campos de investigación se detallarán al inicio de los correspondientes capítulos, mientras que las interpretaciones se presentarán al final de cada capítulo. Junto a lo anterior se presentará el mapa geológico de la hoja Paraíso de escala 1:10 000 en el Anexo 1, el cual será el elemento fundamental a la hora de analizar el presente documento.

Marco tectónico global

Costa Rica (CR en la Figura 1) forma parte del istmo centroamericano; limita al norte con Nicaragua (Nic), al sureste con Panamá (Pan), al este con el mar Caribe y al suroeste con el Océano Pacífico. La zona de Paraíso (cuadrado de color rojo en Figura 1) se encuentra en el Valle Central de Costa Rica, en la provincia de Cartago, al este de la capital, San José, sobre los 9°50' de latitud y 83°50' de longitud. Posee un clima tropical con temperatura media anual de 21°C y precipitación promedio anual de 1200 mm (IMN, 2017).

Desde el punto de vista geotectónico, Costa Rica forma parte de la placa Caribe (CA) y frente a su costa pacífica se encuentra la zona de subducción donde la placa de Cocos (CO) se desliza bajo la placa Caribe. La región presenta un alto grado de actividad debido a la interacción de los centros de expansión del Pacífico Este, que limitan la placa Pacífica (PA) con la de Cocos y Nazca (NZ), y el centro de expansión de Nazca, donde limitan la placa de Cocos y Nazca. Este último centro de expansión ha coincidido con el punto caliente de las Islas Galápagos (IG), por lo que esta interacción ha propiciado que se generen estructuras como la Zona de Fractura de Panamá (ZFP), la Microplaca de Panamá (MPP) y varias cordilleras submarinas como la Cordillera de Cocos (CC). Esta última tiene características de corteza oceánica anómala, moviéndose junto con parte de la placa de Cocos bajo el territorio costarricense, donde Gazel *et al.* (2015) indican que parte del magmatismo corresponde a procesos de generación de corteza continental.

Montero (2001) determina que hacia el este de Costa Rica y norte de Panamá se encuentran una serie de estructuras compresivas denominadas Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), mientras que hacia el centro de Costa Rica (donde se encuentra la región de Paraíso) se observan una serie de estructuras de desgarre, a las que denomina Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). Este autor asocia la formación de estas estructuras con la llegada de la cordillera de Cocos a la zona de subducción, hace menos de 2 Ma.

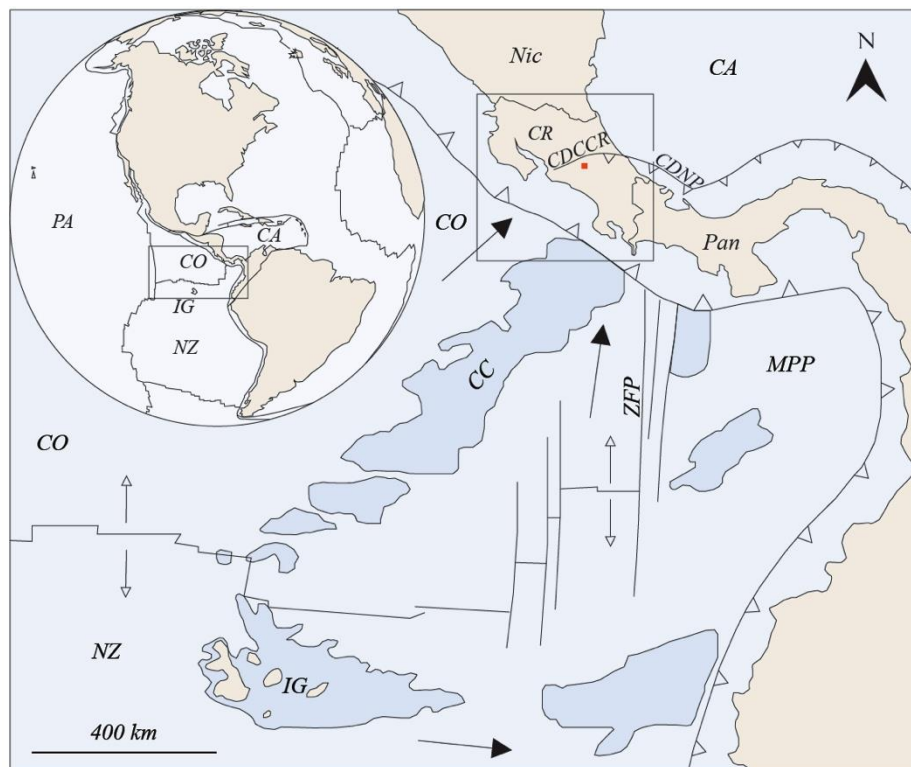


Figura 1. Ubicación tectónica global de Costa Rica. Los tonos marrones corresponden a las tierras emergidas y los azules corresponden al fondo oceánico, donde destacan las cordilleras submarinas asociadas a las islas Galápagos con color azul oscuro. El globo terráqueo muestra el contexto tectónico global, mientras que el recuadro muestra el contexto regional de la interacción entre las placas del Pacífico, Nazca, Cocos, suramericana y Caribe. Modificado de Gazel *et al.* (2009) y Morel (2015). Las siglas usadas se explican a lo largo del texto.

Marco geológico regional

Los aspectos geológicos regionales han sido definidos para el sector central de Costa Rica por varios autores, que en general señalan la coexistencia de rocas sedimentarias asociadas a la Cuenca de Candelaria, rocas asociadas a volcanismo antiguo y actual, y

sedimentos continentales de edad reciente (Figura 2). Los primeros en correlacionar dichos datos (en la región de estudio) fueron Dóndoli y Chávez (1968), distinguiendo las rocas de la Cuenca de Candelaria y las rocas volcánicas recientes; posteriormente, Denyer y Alvarado (2007) determinan que en la región coexisten además rocas volcánicas del Mioceno Superior.

Sin embargo, los trabajos de mayor relevancia son los presentados por Gazel *et al.* (2011), Alvarado y Gans (2012) y Sojo (2015), ya que es donde se presenta el mayor grupo de datos cartográficos, geoquímicos y radiométricos para la región. Gazel *et al.* (2011) señalan que las rocas volcánicas aflorantes al este de la región (Figura 2) forman parte de un arco volcánico de afinidad toleítica, situado temporalmente en el Mioceno Superior, mientras que las rocas volcánicas al norte, situadas temporalmente en el Pleistoceno Medio-Holoceno (Alvarado y Gans, 2012) presentan afinidad calcoalcalina. Por su parte, Sojo (2015) aporta una serie de datos geoquímicos (Figura 3) de los materiales ígneos aflorantes en la región, con los que respalda lo señalado por los autores anteriores y además determina que las rocas aflorantes al oeste son Adakitas (Defant *et al.*, 1991), las cuales corresponden a un ciclo de volcanismo adakítico situado temporalmente en el Plioceno.

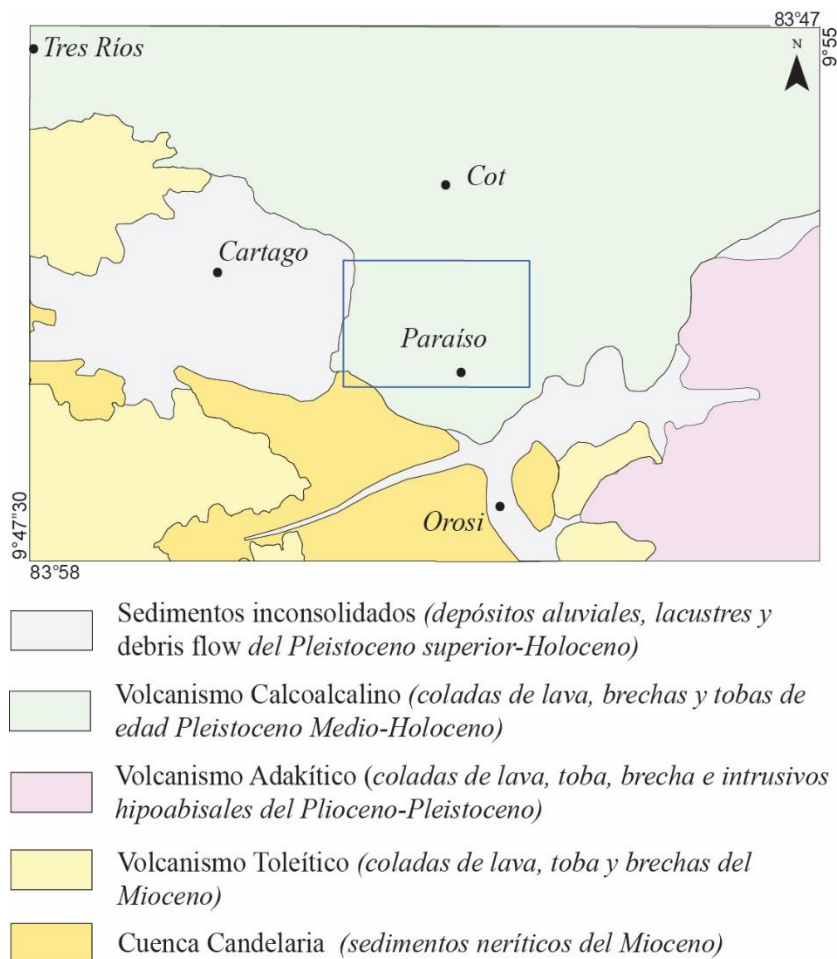


Figura 2. Esquema geológico regional.

Según lo anterior, se tiene que los materiales ígneos presentados en la región de estudio han evolucionado desde magmas toleíticos (arcos de islas normales) a magmas con afinidad adakítica y/o calco-alcalina, los cuales sobreyacen discordantemente a las rocas de la Cuenca de Candelaria. Estas diferencias son notorias al observar la forma de las curvas de los tres grupos de rocas en el diagrama en “araña” normalizado a condritos, donde las rocas del arco volcánico del Mioceno presenta forma semiplana, lo cual se interpreta como empobrecimiento de la fuente magmática, mientras que las rocas del arco volcánico adakítico y actual presentan curvas con pendiente pronunciada, interpretada como rejuvenecimiento de la fuente magmática en ambos casos y con mayores concentraciones en el arco volcánico actual. Los diagramas de la Figura 3B y 3C muestran otras diferencias entre los tres grupos de rocas, destacando las altas

concentraciones de la relación Sr/Y en las rocas adakíticas y las concentraciones de FeO⁺³ para el caso de las rocas toleíticas.

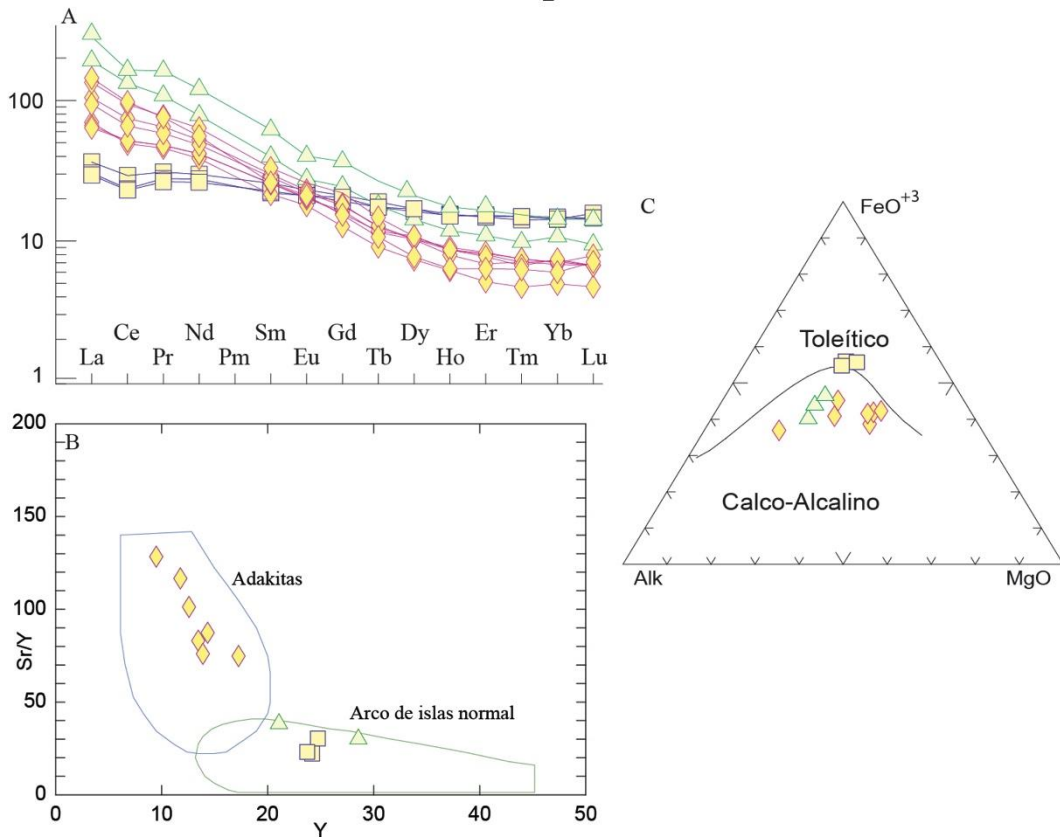


Figura 3. Esquemas de diferenciación geoquímica para las rocas ígneas aflorantes en la región. A. Diagrama en “araña” normalizado a condritos (Sun y McDonout, 1989), donde se muestran las principales diferencias entre concentraciones de elementos traza de los tres grupos de rocas ígneas tratadas. B. Diagrama de la relación Sr/Y vs Y (Defant *et al.*, 1991), mostrando la tendencia “adakítica” de las rocas asociadas al “Volcanismo Adakítico”. C. Diagrama basado en Irvine y Baragar (1971), usado para mostrar la diferencia entre rocas con afinidad toleítica y calco-alcalina (incluyendo adakítica); basado en los datos presentados por Sojo (2015).

Antecedentes de estudios geológicos en la hoja Paraíso.

Las primeras descripciones formales de los materiales aflorantes en las cercanías del área de estudio fueron realizadas por Dengo (1962), quien señala que la región de Cartago forma parte del flanco sur del volcán Irazú. Posteriormente, Dóndoli y Chávez

(1968) definen la Formación Paraíso e indican que aflora en las ciudades de Cartago, Paraíso, Juan Viñas y Turrialba. Por su parte, Castillo (1969) atribuye la edad de estos materiales al Pleistoceno, e indica que se encuentran superpuestos a las rocas sedimentarias de la Cuenca de Candelaria.

A principios de la década de los 70, Kruschensky (1972) realiza la cartografía geológica de la hoja Istarú (1:50 000), e indica que en el sector de Paraíso afloran materiales del Miembro Capa de Ceniza Roja, sin considerar las observaciones de autores anteriores. En contraposición, Alvarado *et al.* (2006) aporta varias dataciones radiométricas de las unidades asociadas al volcán Irazú, y determina que la Unidad Paraíso (Formación Paraíso de Dóndoli y Chávez, 1968) presenta una edad de 594-569 ka.

Sojo (2015) realiza la cartografía geológica de la Formación Paraíso en la hoja Tapantí (1:50 000), al sur de la ciudad de Paraíso, y determina que este conjunto de materiales se encuentra deformado, ligeramente basculado hacia el noreste. Finalmente, Montero (2001), Montero *et al.* (2013) y Montero *et al.* (2016) estudian algunas de las estructuras que afectan a la región y determinan que están asociadas al Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica.

ESTUDIO DE LOS MATERIALES

Metodología

El estudio de los materiales se basó en la toma de datos en el campo, observación de fotografías aéreas, modelo de elevación digital del terreno, análisis petrográfico, revisión bibliográfica y análisis de información de sondeos.

Previamente al inicio del proyecto se contó con algunos datos de campo, los cuales, junto con la información bibliográfica, sirvieron para formular la hipótesis inicial y ayudar a planificar el trabajo de campo. Durante la ejecución del proyecto se realizaron 3 campañas de campo, equivalentes a aproximadamente 10 días de trabajo. En general se trabajó mediante técnicas convencionales, por medio de un Sistema de Posicionamiento Global GPS, realizando levantamientos detallados en afloramientos,

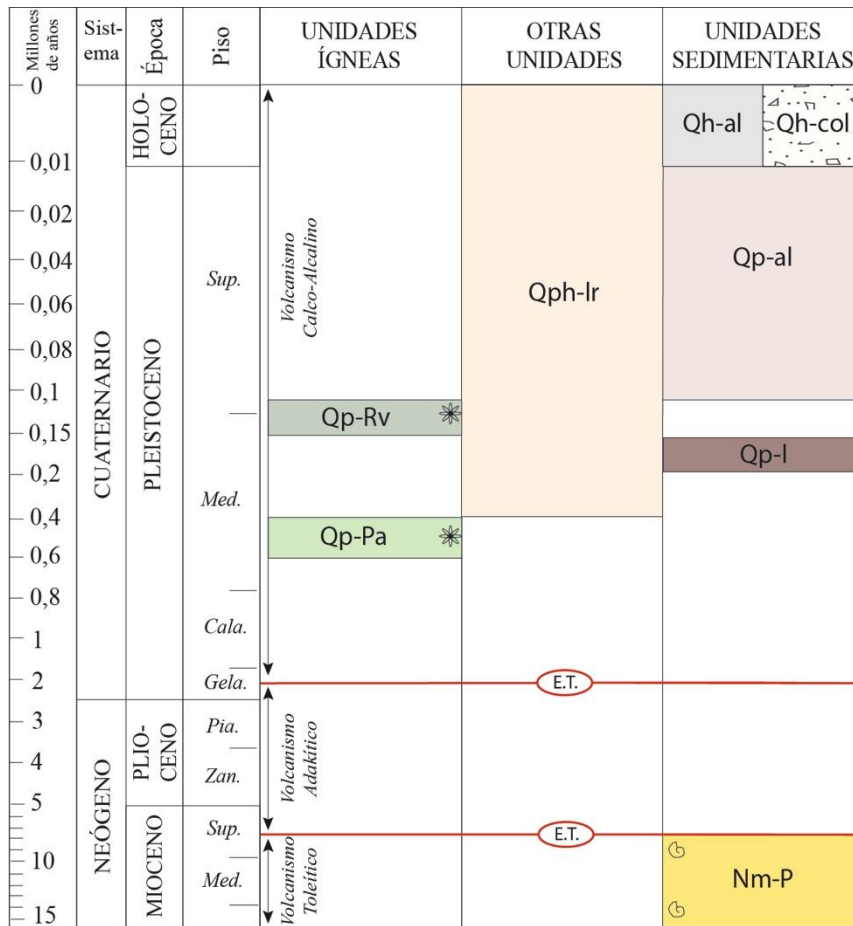
observando y describiendo las características de los materiales, realizando mediciones cuando fue posible y tomando muestras de mano para el análisis petrográfico.

Se utilizó un modelo digital de elevación del terreno realizado a partir de los datos topográficos de escala 1:5000 del proyecto BID-CATASTRO (2005), y junto con 12 fotografías aéreas del año 1996 del IGNCR (Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica), a escala 1:40.000, sirvió para analizar la geomorfología del terreno y para priorizar lugares a visitar.

Finalmente, la información litológica derivada de la base de datos de SENARA (2015), que contiene los registros de perforación de 52 sondeos de pozos (cuya ubicación se muestra en el mapa geológico y en la tabla del Anexo 2), ayudó principalmente en la descripción de los materiales, su distribución y sus características geométricas.

Descripción de las unidades geológicas y sus materiales

La Figura 4 muestra un esquema cronoestratigráfico sintético para el área de estudio; los materiales mencionados están referidos en el mapa geológico y serán ampliamente detallados en el presente capítulo. Dicha descripción se hace de la unidad más antigua a la más joven, respetando las normas estratigráficas oficiales de la *International Union of Geological Sciences* (Salvador, 1994). Por lo tanto, de cada unidad se exponen sus características fundamentales: estratotipo, descripción, aspectos regionales, edad, correlación con otras unidades y otras áreas, génesis y antecedentes.



* ☉ Datación radiométrica y datación paleontológica (E.T.) Evento tectónico

Unidades sedimentarias

- Qh-al** Depósitos Aluviales recientes
Bloques, grava y arena
- Q-col** Coluvios
Bloques y arcilla
- Qp-al** Depósitos Aluviales del Pleistoceno
Bloques, grava, arena y arcilla
- Qp-l** Depósitos Lacustres
Arcilla y limo
- Nm-P** Formación Pacacua
Arenisca, brecha y lutita

Unidades ígneas

- Qp-Rv** Formación Reventado
Andesita y brecha
- Qp-Pa** Formación Paraíso
Andesita y brecha

Otras unidades

- Qph-lr** Capa de Laterita El Rincón
Arcilla rojiza

Figura 4. Esquema cronoestratigráfico de los materiales de la hoja Paraíso.

Formación Pacacua

Estratotipo

Castillo (1969) define por primera vez esta formación y menciona como localidad tipo al flanco norte del cerro Pacacua (al suroeste de la hoja Abra 1:50 000). En la hoja

Paraíso (1:10 000) aflora en la esquina suroeste, cerca de la localidad de Barro Morado, a lo largo del cauce del río Agua Caliente.

Descripción

Numerosos autores describen los materiales de esta formación, tales como Romanes (1912), Dengo y Chaverri (1944), Dóndoli y Chávez (1968). Castillo (1969) la define formalmente como Formación Pacacua, y señala que consiste principalmente en intercalaciones de areniscas y brechas. En las cercanías del área de estudio, Kruschensky (1972), Berrangé y Wittaker (1977), Denyer y Arias (1991) y Sojo (2015) realizan descripciones detalladas de estos materiales determinando que se trata de alternancias de lutitas, areniscas y brechas con espesor variable, con tonalidades marrón a verde, presencia de clastos volcánicos, cristales idiomórficos de plagioclasa, fragmentos de moluscos, y presencia de coladas de lava e intrusivos hipoabisales.

Esta formación ha sido identificada en la hoja Paraíso, donde se observó una secuencia estratigráfica de tonalidad gris a morada, con estratos decimétricos compuestos por alternancias de lutitas, areniscas y brechas, con fragmentos volcánicos angulosos de hasta 2 cm (Figura 5). Se observó que estos materiales se encuentran deformados, con una inclinación de N035°E/30°E. Esta deformación se describirá con más detalle en el capítulo de Estudio Morfotectónico y Estructural.



Figura 5. A. Afloramiento de la Formación Pacacua en la localidad de Barro Morado (511480-1087175), mostrando el aspecto general de los estratos. B. Detalle donde se muestra la intercalación de materiales de granulometría fina y media.

En la región central de Costa Rica se estima un espesor máximo de 1300 m (Denyer y Arias, 1991), mientras que en el área de estudio se logró estimar un espesor mínimo cercano a los 200 m según lo observado en las laderas del cauce del río Agua Caliente.

Edad

Mioceno Inferior a Mioceno Superior, a partir de sus relaciones de campo y dataciones relativas (Denyer y Arias, 1991).

Paleontología-icnología

Sojo (2015) determina la presencia de trazas fósiles de tipo *zoophycus*, fragmentos de moluscos y abundancia de materia orgánica.

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Denyer y Arias (1991) indican que la Formación Pacacua forma parte de la secuencia sedimentaria de la Cuenca Candelaria. Fischer y Franco (1979), Alvarado (1982) y Rivier (1982) consideran que su contacto con el resto de formaciones de la cuenca es lateral, mientras que su contacto con las rocas volcánicas es discordante.

En la hoja Paraíso se presenta como la unidad más antigua, y se encuentra en contacto con la Formación Paraíso por medio de una discordancia angular, evidenciando ausencia de materiales desde en Mioceno Superior hasta el Pleistoceno Medio.

Génesis

Alvarado (1982) interpreta que el ambiente de depósito de esta formación es sublitoral, somero, y la sedimentación se dio en un delta o *fan-delta*. Sojo (2015) señala que la propuesta anterior se ve reforzada por las evidencias de que la sedimentación fue cercana a la línea de costa, lo que se refleja en la granulometría de las volcarenitas, la abundancia de materia orgánica, la presencia de cristales idiomórficos de plagioclasa y coladas de lava intercaladas con los sedimentos, además de la presencia de peperitas reportadas por Soto y Alvarado (2012). Sojo (2015) interpreta que la presencia de clastos volcánicos y coladas de lava con características geoquímicas de volcanismo toleítico indican que la sedimentación se dio simultáneamente a la actividad del arco volcánico toleítico.

Formación Paraíso

Estratotipo

Dóndoli y Torres (1954) describen por primera vez los materiales asociados con esta formación, definiendo como estratotipo la serie que aflora en el camino que comunica la ciudad de Paraíso con el poblado de Orosi y la catarata Los Novios, mientras que Dóndoli y Chavez (1968) son los primeros en denominarla Formación Paraíso, aflorante en las cercanías de las ciudades de Paraíso, Turrialba y Cartago. Los mejores afloramientos dentro de la hoja Paraíso están en las cercanías del poblado de Páez, en el sector norte del área de estudio, y en el poblado de Alto Birrisito, al este de la misma.

Descripción

Es descrita como una colada de lava andesítica cubierta por tobas y depósitos lacustres por Dóndoli y Torres (1954). Umaña (1966), Escalante (1966) y Kruschensky (1972) la definen como una colada de lava andesítica a basáltica con estructuras columnares, mientras que Berrangé y Wittaker (1977) indica que se trata de al menos dos flujos o coladas de lava que, debido a su contenido mineralógico (presencia de titanogaugita y olivino), se clasifican como basaltos andesíticos.

Kruschensky (1972) considera esta formación como Miembro Paraíso dentro de la que denomina Formación Reventado, del Grupo Irazú. Sin embargo, Sojo (2015) señala que la nomenclatura correcta debe de ser la de Formación Paraíso debido a que: a) Dóndoli y Chavez (1968) son los primeros en describir formalmente estos materiales, definiéndolos como Formación Paraíso, y b) según los datos geocronológicos aportados por Alvarado y Gans (2012), existe una diferencia de edad de alrededor de 350 ka entre los materiales de lo que Kruschensky (1972) agrupó como Miembro Paraíso y el Miembro Superior de la Formación Reventado.

En la hoja Paraíso se presenta como una colada de lava con brechas subordinadas, con espesor mínimo de 100 m, donde sobresale la presencia de fenocristales de plagioclasa como rasgo principal (Figura 6 B). En el afloramiento de la localidad tipo (Catarata Los Novios, 3 km al sureste de la ciudad de Paraíso) se observa el desarrollo de la colada de lava, donde los basaltos de la parte central de la misma presentan disyunción columnar

y espesor cercano a los 80 m (Figura 6 A). Hacia el muro y el techo de dicho flujo basáltico se presentan brechas de tonalidades oscuras, compuestas por clastos basálticos angulosos de hasta 30 cm de diámetro, envueltos en una matriz arenosa de grano fino a medio.



Figura 6. A. Afloramiento en la localidad tipo de la Formación (Catarata Los Novios, 3 km al sureste de la ciudad de Paraíso, coordenada 515590-1086800). B. Aspecto macroscópico de una muestra de mano de la Formación Paraíso.

Petrográficamente se clasifica como basaltos andesíticos, sobresaliendo la presencia de fenocristales de plagioclasa, titanaugita y olivino (Figura 7). La matriz está compuesta por cristalitos de plagioclasa, vidrio y olivino. Uno de los rasgos petrográficos más sobresalientes es la resorción que presentan los fenocristales de plagioclasa, lo cual podría estar relacionado a la interacción de dos reservorios magmáticos.

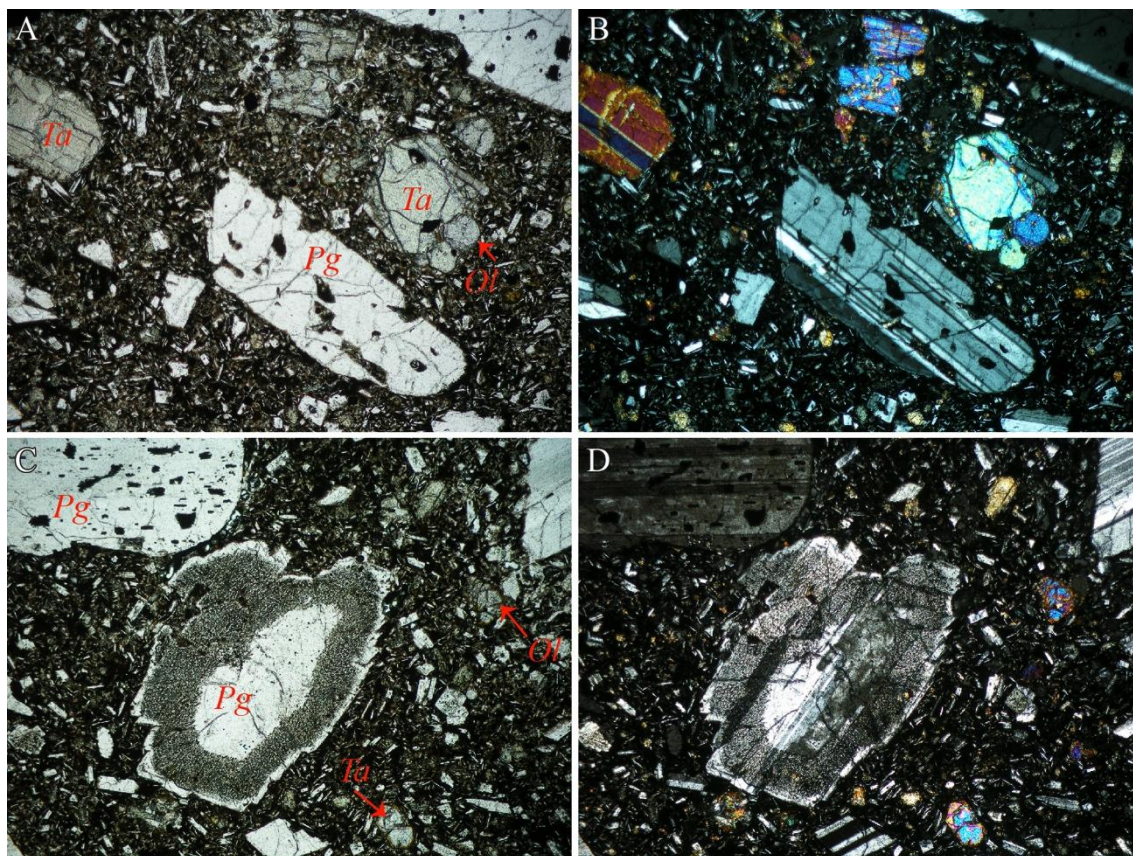


Figura 7. Láminas delgadas de los basaltos andesíticos de la Formación Paraíso. A-B. Lámina delgada donde se muestran los fenocristales de olivino (Ol), plagioclasa (Pg) y titanioaugita (Ta). C-D. Detalle donde se muestra el borde de resorción de uno de los cristales de plagioclasa.

Edad

Alvarado *et al.* (2006) realizan una datación radiométrica Ar/Ar de esta unidad, que revela una edad de 590 ka (Pleistoceno Medio).

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Sobreyace por medio de una discordancia angular a la Formación Pacacua. Su contacto superior se da de manera transicional con la unidad Capa de Laterita El Rincón.

Génesis

Dóndoli y Chavez (1968) la asocian con los primeros episodios volcánicos del Cuaternario de la región. Kruschensky (1972) identifica estos materiales como la parte basal del Grupo Irazú, asociado a la construcción del estratovolcán compuesto Irazú. Finalmente, Alvarado y Gans (2012) incorporan una serie de datos geocronológicos que

les permiten determinar los estadios evolutivos de dicho volcán; en este caso, los materiales de la Formación Paraíso con un rango de edad entre 594 a 450 ka son asociados al *Paleovolcán Irazú*.

Capa de Laterita El Rincón

Estratotipo

Los mejores afloramientos de esta unidad se encuentran en el poblado de El Rincón, al sureste de la hoja Paraíso, donde aflora una sección que muestra las principales características de la unidad y sus relaciones estratigráficas.

Descripción

Las primeras descripciones formales de estos materiales se realizan por parte de Kruschensky (1972), quien los asocia con depósitos de cenizas, denominándolos como Miembro Capa de Ceniza de la Formación Reventado, en el Grupo Istarú. No obstante, autores como Berrangé y Wittaker (1977) y Sojo (2015) señalan que dichos materiales más bien corresponden con un espesor considerable de desarrollo laterítico debido a la alteración de las rocas subyacentes (Formación Paraíso).

En la hoja Paraíso es la unidad de mayor extensión, ocupando más del 80 % de la superficie estudiada. Se presenta como una capa de laterita constituida por materiales de tonalidades rojizas, con la parte superior compuesta predominantemente por arcillas (Figura 8 A), mientras que hacia el muro se observa la presencia de bloques relictos de composición basáltica envueltos en una matriz de arcilla similar a la arcilla encontrada en el techo (Figura 8 B).

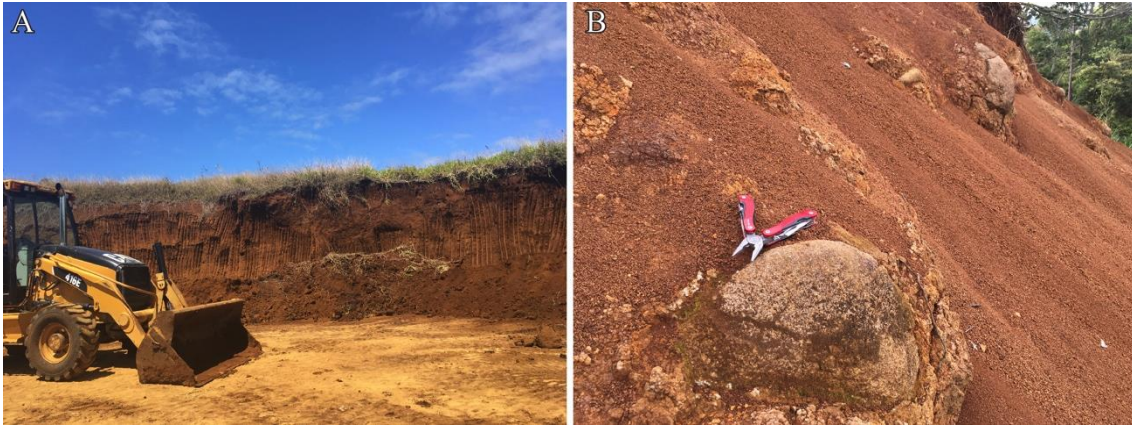


Figura 8. Afloramientos de la unidad Capa de Laterita El Rincón. A. Parte superior del perfil laterítico donde se observa la predominancia de materiales finos. B. Parte inferior donde se observa la presencia de bloques relictos en las cercanías del Liceo de Paraíso (514480-1087230).

Debido a lo indicado por Berrangé y Wittaker (1977) y Sojo (2015), y lo observado en la hoja Paraíso, se propone la nomenclatura de Capa de Laterita El Rincón, término que engloba la ubicación de la localidad tipo y material.

Según las observaciones de campo, los registros litológicos de los sondeos y la información geofísica, se estima que esta unidad presenta espesor variable, llegando a alcanzar los 15 m en algunos lugares.

Edad

Debido a que se trata de un material producto de la alteración de materiales con edad máxima de 590 Ka se infiere una edad desde ese periodo hasta la actualidad, es decir, Pleistoceno medio a Holoceno.

Correlación con otras unidades

Sobreyace por medio de un contacto transicional a la Formación Paraíso, se interdigita con las coladas de lava de la Formación Reventado y es sobreyacida discordantemente por los depósitos recientes.

Génesis

Berrangé y Wittaker (1977) y Sojo (2015) la asocian a la alteración de las rocas de la Formación Paraíso. En el presente trabajo se indica que también está asociada a la alteración de las rocas de la Formación Reventado.

Formación Reventado

Estratotipo

Kruschensky (1972) indica que la localidad tipo se encuentra en el cañón del río Reventado, entre la altura de 1660 m.s.n.m. y 2070 m.s.n.m., donde se observa el contacto inferior con la unidad Capa de Laterita El Rincón. Aflora al noroeste de la hoja Paraíso, en las cercanías de los poblados de Páez y Molina y en el camino que comunica a estos poblados con Paraíso, específicamente en torno a las coordenadas 514050-1189670.

Descripción

Kruschensky (1972) la asocia con el Miembro Superior de la Formación Reventado, en el Grupo Irazú, mientras que Alvarado *et al.* (2006) la asocian únicamente con la Unidad Reventado. En el presente trabajo se ha demostrado que la nomenclatura estratigráfica utilizada por Kruschensky (1972) para los miembros de la Formación Reventado no es correcta, ya que los miembros más antiguos (Paraíso y Capa de Ceniza) de dicha propuesta corresponden más bien con formaciones geológicas diferenciables por su edad, génesis, composición y distribución geográfica. Por tanto, el término Miembro Superior deja de tener utilidad práctica en una formación geológica con un solo miembro, por lo que se propone abandonar el término y utilizar únicamente el de Formación Reventado.

Los materiales de la Formación Reventado son descritos por Kruschensky (1972) como una colada de lava de composición andesítico-basáltica intercalada con lahares, con espesor variable debido al paleorelieve. Alvarado *et al.* (2006) señalan que además de andesitas basálticas se presentan andesitas con hornblenda, y que la intercalación es en general con epiclastos. En la hoja Paraíso los afloramientos de estos materiales son escasos, presentándose como andesitas alteradas, cerca del techo de la unidad, donde es sobreyacida por la Capa de Regolita el Rincón. Se visitó un afloramiento en el río Páez ubicado 2.5 km al norte de la hoja Paraíso, en la localidad de Cot, en el cual se observa una colada de lava compuesta por un espesor de 10 m de andesita masiva de color gris, correspondiente a la parte intermedia de la colada, el cual sobreyace a una brecha lávica correspondiente a la parte inferior (Figura 9 A). Se analizó petrográficamente dicha

colada de lava (Figura 9 B y C) y se determinó que está compuesta por fenocristales de plagioclasa, augita, olivino alterado a Iddingsita y magnetita, con matriz traquítica, compuesta principalmente por cristales de plagioclasa seriados, opacos y vidrio.



Figura 9. A. Afloramiento de la Formación Paraíso donde se observa la parte inferior e intermedia de la colada de lava en la localidad de Cot. **B y C.** Petrografía de una andesita basáltica de la colada de lava donde se observan cristales de Plagioclasa (Pg), Augita (Au) e Iddingsita (Id) .

En la hoja Paraíso se presenta como una colada de lava que tiene su frente terminal en el sector Páez y Molina, donde aflora como andesita alterada. En dichos sitios es normal la ocurrencia de manantiales, debido a sus características hidrogeológicas (este tema será tratado en el apartado de Estudio Hidrogeológico). Por tanto, la determinación cartográfica de la extensión de esta formación se basó en su morfología y en los datos suministrados por los registros litológicos de los pozos IS-325, IS-429 e IS-226, donde se describen la totalidad de los materiales de la colada de lava y su contacto con la unidad Capa de Laterita el Rincón.

Edad

Alvarado *et al.* (2006) determinan por medio de una datación Ar/Ar que presenta una edad de 136 ka.

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Sobreyace discordantemente a la unidad Capa de Laterita El Rincón, mientras que hacia el techo grada hacia materiales de la propia laterita, por lo que se interpreta una relación geométrica de interdigitación con la unidad Capa de Laterita el Rincón.

Génesis

Alvarado y Gans (2012) mencionan que se trata de materiales asociados a la construcción de lo que determinan como *Paleovolcán Irazú*.

Depósitos Lacustres

Se define en este trabajo como unidad informal, aflorante en el poblado de Alto Birrisito.

Descripción

El presente trabajo describe por primera vez esta unidad, la cual corresponde con al menos 4 capas de materiales finos (arcillas y limos) distinguibles por su geometría, espesor y tonalidad, que varía entre amarillenta, parda y grisácea (Figura 10). Se presenta de manera aislada cerca de uno de los escarpes de las fallas inversas (el Estudio Estructural detalla su relación con el fallamiento) en un área de apenas 0.003 km², con un espesor total de aproximadamente 10 m.

En general se observa un depósito lacustre que sobreyace a la Capa de Laterita El Rincón por medio de un contacto plano. La primera capa y la tercera están compuestas por arcillas bentoníticas, asociadas a periodos con mayor actividad volcánica de emanación de cenizas. La segunda capa está conformada por arcillas de tipo “bola” o “*ball clays*”; presentan tonalidades amarillentas debido al aporte de caolinita; se observa además una estructura donde la continuidad de la capa se interrumpe, asociada probablemente a un paleocanal. Finalmente, la cuarta capa está compuesta por arcillas ferruginosas y limos y presenta espesor mayor al de las capas subyacentes. Se considera

que está asociada a un incremento en la sedimentación de material detrítico inducido por una mayor actividad lluviosa, y representa el último estadio de la sedimentación en la microcuenca.

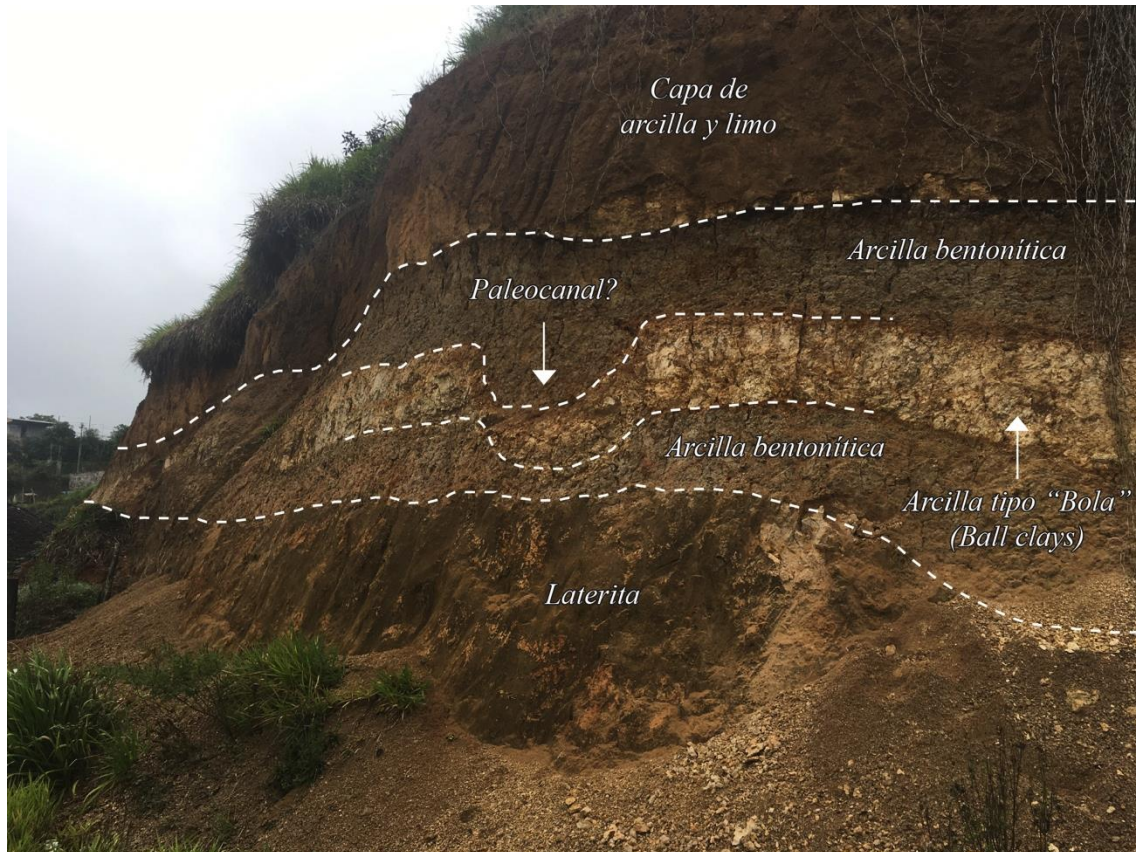


Figura 10. Afloramiento de la unidad Depósitos Lacustres en la localidad de Alto Birrisito (515770-1088410).

Edad

Según las observaciones de campo, la sedimentación se inició después del desarrollo de la Capa de Laterita El Rincón y terminó antes de la aparición de los Depósitos Aluviales del Pleistoceno en la localidad de Alto Birrisito, ya que la aparición de estos últimos depósitos se dio después del levantamiento tectónico de los materiales lacustres, por lo que se le asigna un rango de edad de Pleistoceno Medio.

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Sobreyace discordantemente a la unidad Capa de Laterita El Rincón, y debido a los procesos de deformación tectónica en el sector no se observan materiales por encima de esta unidad.

Génesis

Se interpreta que estos materiales fueron depositados en una cuenca pequeña (un área menor de 6 ha según el mapa geológico), de forma elongada, con orientación E-W, paralela al escarpe de la falla inversa en Alto Birrisito. Debido a las características de los sedimentos se estima que el ambiente fue de baja energía, en condiciones climáticas estables, con fuerte influencia de la actividad volcánica debida a periodos de emanación de cenizas en volcanes aledaños.

Depósitos Aluviales del Pleistoceno

Corresponde con una serie de depósitos de tipo aluvial, expuestos en distintos puntos del área estudiada. Existen buenos afloramientos en el sector de Molina, en el río Taticú y en el poblado de Alto Birrisito (Figura 11)

Descripción

En la hoja Paraíso se presenta como un paquete de al menos 10 m de espesor, compuesto por material detrítico proveniente de las partes altas del flanco sur del volcán Irazú. En el campo se lograron distinguir dos tipos de facies: Sh y Gmm (Figura 11 A y B), que contrastan significativamente en su granulometría y grado de selección.

Las facies Sh se observan únicamente en algunos afloramientos, donde el paquete de sedimentos ha sido lo suficientemente erosionado. Están compuestas por arenas de grano fino a medio, con cantos esporádicos, laminación horizontal y tonalidad parda. La parte superior de las facies Sh no presenta bioturbación. Sobre estos materiales se presentan las facies Gmm, formadas por cantos angulosos poco seleccionados, soportados por matriz arcillosa, sin laminación ni estructuras sedimentarias evidentes.



Figura 11. Afloramientos de los Depósitos Aluviales del Pleistoceno. A. Afloramiento en el cauce del río Páez (514150-1089700) donde se observa el cambio de facies Sh a Gmm. B. Afloramiento en el cauce del río Tatizcú (511455-1090450) donde se observa el cambio de facies de los Depósitos Aluviales del Pleistoceno y el contacto con los Depósitos Aluviales Actuales.

Edad

Se infiere que se comenzaron a depositar posteriormente al evento volcánico que originó a la Formación Reventado, en el Pleistoceno Superior, mientras que son sobreyacidos discordantemente por materiales del Holoceno, por lo que se les asigna una edad de Pleistoceno Superior.

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Su contacto inferior no ha sido observado; sin embargo, se infiere que sobreyace discordantemente a las formaciones Paraíso, Reventado, Capa de Laterita El Rincón y Depósitos Lacustres, mientras que es cubierta discordantemente por los Depósitos Aluviales Actuales, tal y como se muestra en la Figura 11 B.

Génesis

Las facies descritas sugieren un estadio inicial de condiciones constantes de alto régimen de flujo, unidireccional, que cambia drásticamente a condiciones de muy alta energía reflejadas en flujos cohesivos de tipo *debris flow*. Lo anterior puede estar asociado a aumentos en la tasa de actividad volcánica, recurrencia de eventos climáticos extraordinarios y aumento de la inestabilidad de las laderas debido a actividad sísmica.

Depósitos Aluviales Actuales

Generalidades

Se observa en la mayoría de los lechos de ríos, representados principalmente por clastos subredondeados, poco seleccionados y con matriz arenosa de baja cohesión. Se encuentran coronando la secuencia de materiales estudiados y se infiere una edad de Holoceno debido a sus relaciones estratigráficas y con los cauces fluviales. Según lo observado en todos los afloramientos, los ríos donde afloran estos materiales han disectado las unidades inferiores, incluyendo los Depósitos Aluviales del Pleistoceno (Figura 11 B). Dicha incisión estaría asociada a cambios en el nivel base de dichos cuerpos de agua (fuera de la hoja Paraíso), o bien al levantamiento del basamento rocoso local debido a la acción de las fallas.

Coluviones

Generalidades

Corresponde con afloramientos aislados en las localidades de Barro Morado, Páez y Alto Birrisito. Se presentan en general como materiales inestables compuestos principalmente por arcillas y bloques esporádicos. Se asocian al fallamiento debido a que los afloramientos se encuentran en los escarpes de las fallas con mayor desplazamiento vertical aparente.

Síntesis y evolución

El basamento rocoso corresponde a las rocas sedimentarias (con clastos ígneos de afinidad toleítica) de la Formación Pacacua, del Mioceno Superior, que se encuentra cubierta mediante una discordancia angular por las rocas volcánicas de la Formación Paraíso, del Pleistoceno Medio, evidenciando un alto grado de actividad tectónica y la ausencia de sedimentación durante el Plioceno y Pleistoceno Inferior. La Formación Paraíso marca el inicio de la actividad ígnea calcoalcalina y los primeros episodios efusivos del volcán Irazú. Posteriormente la actividad ígnea efusiva desciende e inicia el proceso de laterización de las rocas volcánicas, evidenciado por la Capa de Laterita El Rincón, la cual según su génesis y espesor se desarrolla a un ritmo de alrededor de 25 cm cada 10 ka respecto al techo de los materiales de la Formación Paraíso. Simultáneo a

lo anterior, los procesos de deformación continúan, generando la aparición de depósitos lacustres debido al colapso del sistema de drenaje. A finales del Pleistoceno Medio la actividad volcánica se reanuda, generando las coladas de lava de la Formación Reventado, acelerando los procesos de erosión y generando las facies *Gmm* de los Depósitos Aluviales (Pleistoceno Medio-Superior). Finalmente, el Holoceno se ve marcado por un descenso del nivel base de los ríos, haciendo que estos incidan sobre sus cauces y definiendo la red hídrica actual.

ESTUDIO MORFOTECTÓNICO Y ESTRUCTURAL

En este capítulo se caracterizaron las principales formas de relieve y estructuras tectónicas presentes en el área de estudio, relacionando los procesos de geodinámicos ocurridos desde finales del Neógeno y hasta el presente.

Metodología

En general se trabajó con datos geográficos derivados del proyecto BID-CATASTRO, el cual proporciona curvas de nivel correspondientes con una escala 1:5 000. A partir de dichas curvas de nivel y del Modelo de Elevación Digital generado, se realizó un análisis cualitativo para caracterizar las diferentes morfologías y estructuras observadas. Es importante aclarar que no se realizó ningún análisis cuantitativo, ya que las metodologías existentes para el mismo son desarrolladas para zonas con clima templado o árido (Bull y McFadden, 1977; Burbank y Anderson, 2001), sin considerar las variantes de un clima tropical húmedo como el de Costa Rica.

Junto a los datos anteriores, se consideraron datos bibliográficos sobre morfotectónica y sismología y se realizaron las visitas de campo que se mencionan en la descripción de la metodología del Estudio de los Materiales, donde se observaron y fotografiaron las distintas morfologías y estructuras presentes en el área de estudio.

Se ha elaborado un mapa de contornos estructurales del “techo” de la Formación Paraíso, contando en primera instancia con datos de campo (afloramiento de los materiales de la Formación Paraíso) y datos derivados de los sondeos de pozos

registrados por SENARA (2015). En los lugares donde hubo una falta de información se realizaron perfiles de sismica de refracción (ubicación detallada en el mapa geológico).

Los perfiles de prospección sísmica de refracción se realizaron con separación de geófonos cada 5 m; la onda se generó por medio de un golpe de maza de 6 kg, y el arribo de las señales fue medido con un sismógrafo de marca “Geometrics ES3000”. Los datos de dicha señal fueron procesados con el programa “Refract”, donde se tomaron los primeros arribos de la onda P para generar un modelo que mostrara la posible configuración de las capas bajo la línea de perfil y la profundidad a la que se encuentra el “techo” de la Formación Paraíso. Los datos iniciales derivados de esta técnica se presentan en el Anexo 3.

El mapa de contornos fue trazado tomando en cuenta los datos anteriores, la topografía y la influencia de las estructuras. La interpolación consistió en la triangulación manual de los datos (en el Anexo 4 se muestra el tipo de dato, ubicación y profundidad de los mismos). Cabe señalar que el marcador empleado es en esencia el frente de meteorización de los materiales de la Formación Paraíso, el cual se determinó que avanza a un ritmo de 25 cm cada 10 ka o bien 10 m cada 400 ka, por tanto, la precisión del mapa de contornos será de 20 m.

Debido a la ausencia de afloramientos que muestren datos como planos de falla, estrías y/o mineralizaciones las trazas de falla que se determinan en este trabajo se clasificarán como “Falla supuesta”, mientras que las fallas ampliamente detalladas en la literatura se tratarán como “Falla comprobada” en el mapa geológico.

Antecedentes

Las investigaciones sobre temas asociados a la tectónica y geomorfología en el área de estudio corresponden a trabajos de escala regional, los cuales caracterizan de forma general las estructuras y macroestructuras, dejando de lado ciertos detalles que se consideran en el presente trabajo.

De dichas investigaciones sobresale la realizada por Montero y Morales (1990), quienes determinan la dirección de los esfuerzos neotectónicos en Costa Rica, señalando que en la región donde se encuentra la hoja Paraíso el eje máximo compresivo presenta

dirección aproximada de N005°E. Posteriormente, Montero (2001) define que la región central de Costa Rica corresponde con una macroestructura compuesta principalmente por un sistema de fallas sinestrales de orientación NE y fallas dextral-inversas con orientación NW, la cual denomina como Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. Dicho autor indica que al sureste de la ciudad de Paraíso se presenta el sistema de falla sinistral Navarro y al suroeste de la ciudad se presenta el sistema de falla dextral Agua Caliente, ambas con sismicidad asociada; por ejemplo, al sistema de falla Navarro se la asocia el terremoto de Paraíso de 1951 (Ms 5.4).

Finalmente, Montero *et al.* (2013) y Montero *et al.* (2016) definen que en la región este del Valle Central de Costa Rica (región estudiada) se observan, además de las fallas de desplazamiento de rumbo, fallas inversas con orientación E-W, e indican que al menos dos de las trazas de falla inversa se encuentran al norte de la hoja Paraíso.

Descripción morfológica

En el área de estudio las formas principales del relieve están asociadas a la actividad volcánica y a la actividad tectónica. Dadas las condiciones meteóricas del área de estudio (y el consecuente alcance de los datos estructurales obtenidos en afloramientos) la información morfológica toma gran relevancia en este trabajo, ya que ha sido una herramienta fundamental a la hora de definir el modelo estructural.

Morfologías asociadas a la actividad volcánica

Estos modelados afectan sobre todo a los materiales de la Formación Reventado, y su elemento principal es el escarpe de frente terminal de la colada de lava que se generó durante dicho periodo eruptivo (señalado en el mapa geológico y en la Figura 12 A). El relieve ha sido posteriormente suavizado, y presenta una red de drenaje subparalela a contorneada, evidenciando poco desarrollo de la misma.

Morfologías asociadas a la actividad tectónica

Son las morfologías dominantes en el área de estudio, según Lafuente (2011), estas morfologías se asocian a estructuras como fallas de desgarre y fallas inversas, sobresaliendo las lagunas distribuidas en toda el área de estudio, algunas de las cuales se encuentran alineadas con las trazas de las fallas denotando su componente de desgarre

(*sag ponds*). Otras morfologías sobresalientes son los valles lineales, cursos fluviales desplazados, deslizamientos en los escarpes de falla y depósitos aluviales represados (depósitos de aluvión que han sido aislados debido a los efectos de la tectónica sobre el sistema de drenaje) en las localidades de Alto Birrisito y Barrio Nuevo debido la evolución del sistema de drenaje respecto a la actividad tectónica. El patrón de drenaje en estas zonas es de tipo combinado, entre rectangular y multicubeta; el relieve es ondulado y la pendiente aumenta hacia los cauces de los ríos. Los rasgos anteriores reflejan la impronta estructural en una cuenca hidrográfica relativamente joven con actividad tectónica reciente.

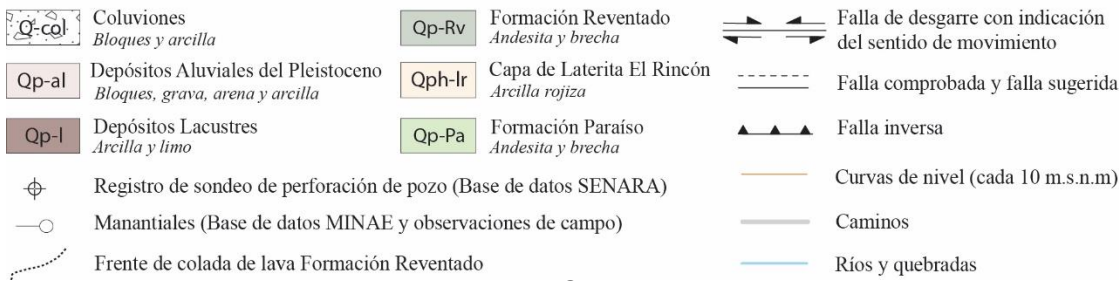
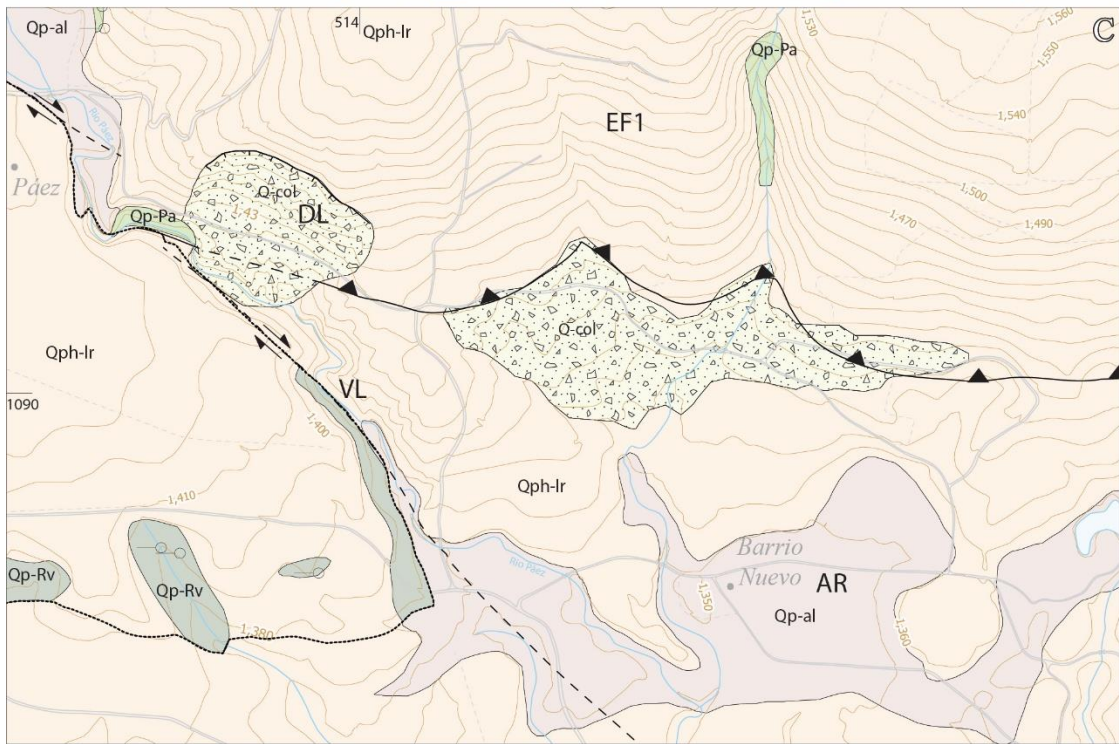


Figura 12. Selección de los elementos morfo-tectónicos presentes en el área de estudio. A. Detalle del frente terminal de la colada de lava asociada a la Formación Reventado y falla de desplazamiento de rumbo, donde se observan varias lagunas (LC) alineadas en las cercanías del Residencial Doña Flora. B. Detalle de la estructura de falla inversa en la localidad de Alto Birrisito, sobresaliendo cursos fluviales desviados (FD), aluvión represado (AR) y un deslizamiento (DL) junto al escarpe de la falla. C. Detalle de la falla inversa y la falla de desgarre dextral que discurren junto a las localidades de Páez y Barrio Nuevo, con valles lineales (VL), aluvión represado (AR) y deslizamientos (DL) junto al escarpe de la falla.

En la Figura 12 se seleccionan los aspectos morfológicos y estructurales más sobresalientes de la hoja Paraíso: frente terminal de la colada de lava asociada a la Formación Reventado, fallas de desplazamiento de rumbo con lagunas alineadas (LC), aluviones aislados (AR) y deslizamientos (DL) junto a los escarpes de falla. El escarpe de la falla inversa de Alto Birrisito (Fig. 12B) presenta más de 60 m de altura, y el de la falla inversa de Páez (Fig. 12C), más de 150 m.

Descripción de estructuras

En el presente trabajo se propone por primera vez el modelo estructural para la hoja Paraíso, el cual se sustenta con la información geológica y morfotectónica, junto con los datos bibliográficos y los datos derivados de los contornos estructurales para el techo de la Formación Paraíso. Debido a la falta de datos tales como medidas de orientación de planos y estrías de falla, se clasifican como fallas ‘supuestas’ las estructuras que no han sido descritas en la literatura. El modelo está constituido por una serie de fallas (supuestas y comprobadas según literatura) con rumbo E-W y componente inversa, junto con estructuras asociadas de movimiento oblicuo y orientación NE y NW y una serie de pliegues antiformes y sinformes (Figura 13).

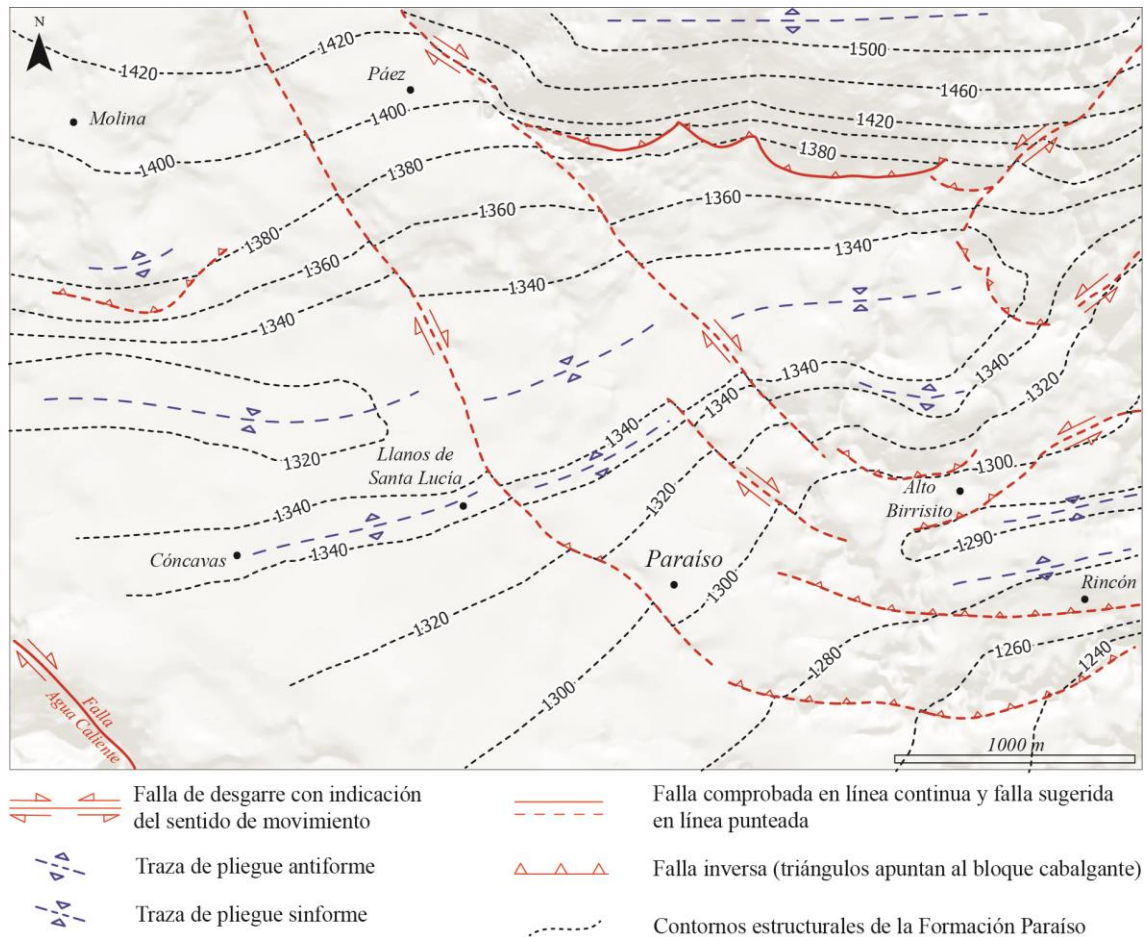


Figura 13. Mapa estructural de la hoja Paraíso, incluidos los contornos estructurales para el “techo” de la Formación Paraíso.

Estructuras con orientación E-W

Se trata de fallas (sugeridas según el presente trabajo o comprobadas en los trabajos previos) de componente inversa, con trazas sinuosas, longitudes menores de 2.5 km y con saltos verticales máximos en torno a un centenar de metros. Se presentan mayoritariamente en el sector este del área de estudio, donde el relieve se caracteriza por una serie de valles y divisorias paralelos entre sí, con orientación E-W (que se asocian a cabalgamientos o trazas de falla inversa), perpendiculares a valles con orientación N-S (río principal), marcando una red de drenaje rectangular.

Montero *et al.* (2013) señalan la presencia de una de estas estructuras e indican algunas de las evidencias morfológicas de la misma, mientras que en este trabajo se determinó que presentan algunas morfologías asociadas como cursos fluviales desviados,

deslizamientos y aluvión represado, así como evidencias hidrogeológicas como efluencia de manantiales, mientras que el mapa de contornos estructurales sugiere la presencia de pliegues antiformes y sinformes paralelos a las trazas de dichas fallas.

Estructuras con orientación NE y NW

Se interpretan como fallas de desplazamiento de rumbo sinestral (las de dirección NE-SW) y dextral (las de dirección NW-SE), conectadas con las fallas inversas ubicadas al este de la hoja. Presentan longitudes menores de 4 km, trazas rectilíneas, evidenciadas por morfologías como lagunas alineadas, valles lineales, deslizamientos y aluvión represado.

Pliegues

Junto a las trazas de las fallas inversas se observan morfologías abultadas que sugieren la presencia de pliegues. Estos pliegues se caracterizan por presentar poca longitud y terminar abruptamente junto con las trazas de las fallas. Fundamentalmente se trataría de anticlinales de bloque superior asociados a las fallas inversas sugeridas en el mapa.

Síntesis e interpretación

Se plantea un modelo estructural compuesto por una serie de fallas inversas de orientación E-W con fallas de desplazamiento de rumbo asociadas. En relación con las mismas aparecen también pliegues suaves de orientación E-W. Dicho modelo es compatible con un el eje de compresión con orientación aproximada N-S, y debido a estas estructuras los materiales que ocupan el lugar desde el Pleistoceno Medio han sido deformados hasta llegar a presentar varios tipos de expresiones morfológicas: escarpes, cursos fluviales rectilíneos, *sag ponds*, ríos desviados, deslizamientos, etc.

Una buena parte de la historia estructural del área de estudio puede ser resumida a partir de lo observado en la localidad de Alto Birrisito (Figura 12 B), donde se observan las relaciones de campo entre las unidades geológicas presentes en la hoja (excepto las formaciones Pacacua y Reventado) y la manera en que dichas unidades han sido afectadas o condicionadas por la deformación (Figura 14 y Figura 15).



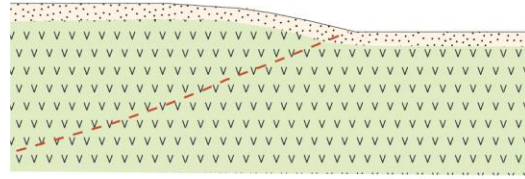
Figura 14. Imagen de campo de los contactos y estructuras en la localidad de Alto Birrisito

Las evidencias encontradas en dicho lugar (Figura 14) sugieren que al menos dos fallas inversas han interactuado con los materiales del lugar desde el Pleistoceno Medio, generando cambios en el relieve donde sobresalen varias lomas (anticlinal) y un deslizamiento. También se han generado al menos dos depocentros, los cuales se rellenaron con los Depósitos Lacustres y con los Depósitos Aluviales del Pleistoceno Superior, respectivamente. Se interpreta que dichos sedimentos han sido levantados por la acción de las fallas inversas, inicialmente los Depósitos Lacustres y más recientemente los Depósitos Aluviales. Estos últimos se encuentran al menos 2 m por encima de la cota actual del río Páez, el cual ha incidido sobre dichos materiales (Figura 15)

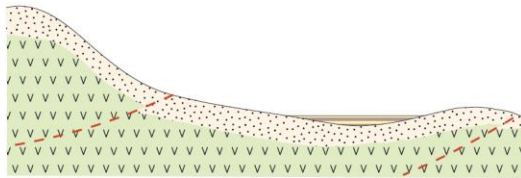
A. 590 ka. Evento volcánico que originó la Formación Paraíso



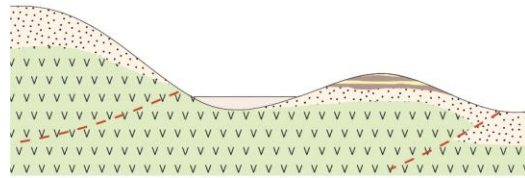
B. 590-250? ka. Inicia el desarrollo de la Capa de Laterita (avanza con una tasa de ≈ 25 cm/10 ka), inicio de la deformación tectónica



C. 250?-180 ka. Continúan procesos de deformación y laterización junto con procesos erosivos, inicia el evento volcánico que origina la Formación Reventado y se da la sedimentación lacustre



D. 180-20? ka. Continúan procesos de deformación y laterización junto con procesos erosivos, los sedimentos lacustres son deformados e inicia la sedimentación aluvial del Pleistoceno Superior



E. 20? ka-actualidad. Continúan procesos de deformación, laterización y erosión, cambia el nivel base del río, los Sedimentos Aluviales del Pleistoceno Superior son deformados, inestabilidad de laderas, depositación de Sedimentos Aluviales del Holoceno

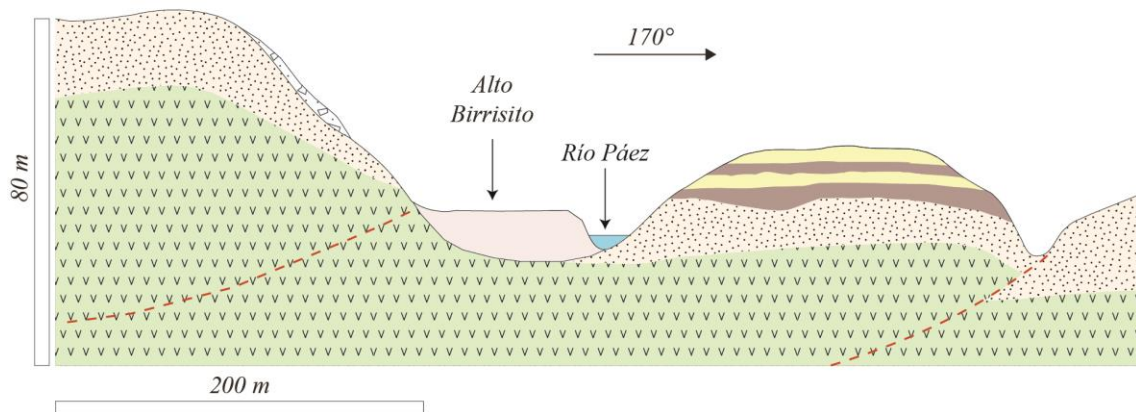


Figura 15. Modelo de evolución geológica propuesto para la localidad de Alto Birrisito.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

En este capítulo se caracterizan las principales unidades hidrogeológicas del área de estudio, se analizan las condiciones de vulnerabilidad acuífera y se evalúan las características de un sitio para la instalación de un campo de pozos para la extracción del recurso hídrico y su distribución en la ciudad de Paraíso y alrededores.

Metodología

Se trabajó correlacionando los datos derivados de los capítulos anteriores junto con la información hidrogeológica suministrada en los sondeos de los pozos del SENARA (2015).

Antecedentes

El recurso hídrico subterráneo ha sido explotado en la hoja Paraíso desde la segunda mitad del siglo XX mediante la perforación de pozos que no superan los 200 m de profundidad y la captación de manantiales al norte de la hoja. Sin embargo, no existe ningún trabajo que caracterice las unidades hidrogeológicas presentes en el subsuelo de la región.

Descripción de elementos hidrogeológicos

Los materiales encontrados dentro de la hoja Paraíso pueden ser clasificados por medio de cuatro unidades hidrogeológicas según sus propiedades hidrodinámicas, extensión lateral, relaciones estratigráficas y espesor. De esta manera, se consideran las rocas asociadas a la Formación Pacacua como el Acuitardo Pacacua, las formaciones Paraíso y Reventado como Acuífero Paraíso y Acuífero Reventado, los materiales de la Capa de Laterita El Rincón como el Acuitardo de Laterita, mientras que el resto de unidades se califican como unidades de bajo potencial acuífero.

Acuitardo Pacacua

Corresponde al basamento rocoso, compuesto por intercalaciones de lutita, arenisca y brecha, con muy baja permeabilidad y transmisividad, espesor y extensión desconocidos, y aflorante únicamente en la esquina suroeste de la hoja. Según sus relaciones estratigráficas con el Acuífero Paraíso y sus características hidrodinámicas se le considera como un acuitardo o acuífiero.

Acuífero Paraíso

Es la unidad hidrogeológica captada por la mayoría de pozos en la hoja. Según las observaciones de campo y las descripciones litológicas de los sondeos de pozos, se compone por coladas de lava fracturadas y brechas, lo cual le proporciona doble porosidad. Presenta transmisividades del orden de los 500 m²/día según los datos de la

prueba de bombeo del pozo IS-69, espesor mínimo de 300 m según los perfiles del mapa geológico, nivel de saturación normalmente encontrado a más de 20 m bajo el nivel del suelo (excepto en las cercanías de las zonas de falla), y con dirección del flujo subterráneo hacia el sur. Este acuífero está cubierto por el Acuitardo de Laterita, lo que implica que sea un acuífero con una cobertura que le provee aislamiento respecto a las actividades que se generen en superficie, reduciendo el riesgo y la vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico.

Presenta condiciones de efluencia en las cercanías de las zonas de falla inversa y pliegues, lo cual es interpretado como un efecto de los cambios en las propiedades hidrodinámicas y en las características geométricas del acuífero debido a la deformación experimentada por la roca.

Según lo anterior, se sugiere que un sitio idóneo para la realización de exploraciones hidrogeológicas (realización de sondeos exploratorios y su debida interpretación), con el objetivo de diseñar un campo de pozos y un sistema de distribución de agua potable, es la localidad de Ayala (Figura 16), situada en las coordenadas 512485-108845 y a la cota de 1370 m.s.n.m. Debido a que la ciudad de Paraíso se ubica entre las cotas de 1300 y 1330 m.s.n.m. y el poblado de Llanos de Santa Lucía sobre la cota de 1350 m.s.n.m., se presenta la posibilidad de extraer agua de calidad, con un caudal considerable respecto a la demanda, con bajo riesgo y vulnerabilidad a la contaminación, y con la diferencia de elevación adecuada para la implementación de un sistema de distribución por gravedad.

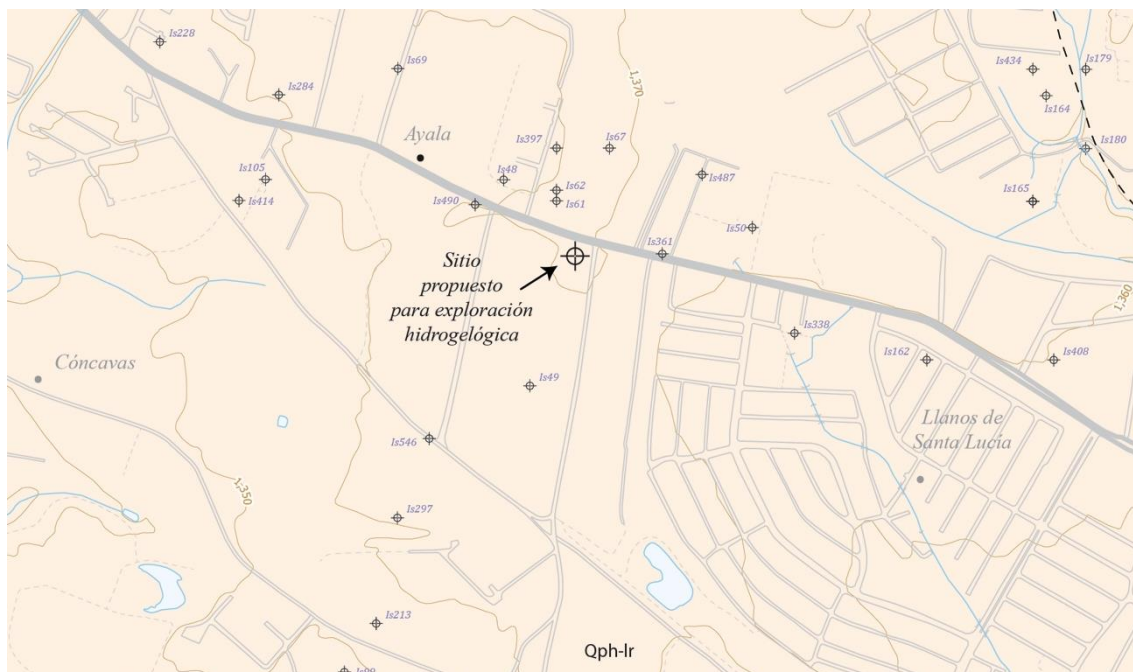


Figura 16. Ubicación del sitio propuesto para la realización de perforaciones exploratorias.

Acuífero Reventado

Corresponde a las coladas de lava y brechas ubicadas al noroeste de la hoja, presenta doble permeabilidad, y se infiere que tiene valores de transmisividad similares a los del Acuífero Paraíso; su espesor está cercano a los 20 m según el perfil geológico E-F del mapa geológico. Se encuentra interdigitado con el Acuitardo de Laterita, lo que le brinda un buen aislamiento respecto a las actividades que se realicen en superficie excepto en los frentes terminales, donde afloran las coladas de lava y se presentan condiciones de efluencia manifestada por medio de los manantiales que son aprovechados por la Municipalidad de Paraíso para brindar el servicio de agua potable.

Acuitardo de Laterita

Se encuentra distribuido en toda el área de estudio, compuesto principalmente de arcillas residuales producto de la alteración de las rocas volcánicas; presenta un espesor cercano a los 15-20 m, baja permeabilidad. Cubre a las unidades acuíferas y se considera como una cobertura efectiva que proporciona a los acuíferos un bajo grado de riesgo y vulnerabilidad a la contaminación acuífera.

Unidades de bajo potencial acuífero

Corresponden a los depósitos aluviales, coluviones y depósitos lacustres que, debido a su poca extensión y poco espesor, no presentan características hidrodinámicas de relevancia.

Interpretación hidrogeológica

Se interpreta un sistema hidrogeológico compuesto por la intercalación de dos acuíferos y dos acuitardos. El acuífero más profundo presenta potencial intermedio, grado de aislamiento favorable ante potenciales contaminantes y, según se infiere del modelo geológico elaborado en el presente trabajo, contiene zonas donde la actividad tectónica influye en el equilibrio del mismo. El acuífero más cercano a la superficie presenta menor potencial acuífero, con condiciones de efluencia en el frente terminal de las coladas de lava.

DISCUSIÓN

En este trabajo se lograron describir y clasificar los distintos materiales dentro del subsuelo de la hoja Paraíso, determinando que en general se trata de materiales de origen volcánico, junto a distintos tipos de sedimentos no consolidados asociados a los procesos de la tectónica, erosión y meteorización. No obstante, existen algunos detalles no aclarados que requerirán en el futuro investigaciones específicas, como es el caso de los cambios de facies registrados en los Depósitos Aluviales del Pleistoceno Medio y la relación entre el ritmo de avance del frente de meteorización de la Capa de Laterita El Rincón respecto al levantamiento tectónico y a los procesos erosivos.

Se propone un modelo estructural coherente con la orientación de los ejes de esfuerzos tectónicos determinados por Montero y Morales (1991). En general el modelo se compone de estructuras de falla inversa con orientación E-W y fallas de desgarre asociadas con orientación NE y NW. Sin embargo, este modelo carece de datos de campo esenciales, tales como medidas de planos de falla o de la orientación de estrías. Debido a esta razón serán necesarios trabajos enfocados en corroborar el modelo por medio de la aplicación de técnicas como la excavación de trincheras y su consecuente

interpretación, o bien mediante la instalación de una red geodésica para así determinar el grado de actividad de las estructuras y su potencial sísmico.

CONCLUSIONES

Se establece el modelo geológico para el área de estudio, compuesto por materiales con edades de Mioceno Superior a Holoceno. Se ha determinado que existen al menos cuatro discordancias: la primera representada por el contacto entre los materiales sedimentarios basculados del Mioceno Superior y las coladas de lava del Pleistoceno Medio; posteriormente se genera otra discordancia que pone en contacto los materiales lateríticos producto de la meteorización con las coladas de lava y aluvión del Pleistoceno Superior, y finalmente hay otra discordancia donde el nivel de base de los ríos cambió, haciendo que los mismos incidan sobre sus cauces.

El modelo estructural sugiere que la deformación corresponde principalmente con una compresión de orientación aproximada N-S, caracterizado por la presencia de estructuras contractivas, con evidencias de actividad reciente o neotectónica, y que en general produce un levantamiento y acortamiento durante los últimos 250 ka.

Los resultados indican que el modelo hidrogeológico está compuesto por dos acuíferos asociados a las coladas de lava, con capacidad hídrica intermedia, buenas condiciones hidrodinámicas y cubiertos por un espesor considerable de arcilla. Además se determinó que existen sectores donde las condiciones de flujo subterráneo del acuífero Paraíso son afectadas por las estructuras de falla inversa.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, G., Carr, M., Turrin, B., Swisher, C., Schmincke, H., Hudnut, K. (2006). Recent volcanic history of Irazú volcano, Costa Rica: Alternation and mixing of two intracrustal chambers. En: Rose, W., Bluth, G., Carr, M., Ewert, J., Patino, L., y Vallance, J. (Ed): Natural Hazards in Central America. Geol. Soc. Am., 412: 259-276.

Alvarado, G., Gans, P. (2012). *Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central*. Revista geológica de América Central, 46: 7-122.

Alvarado, C.M. (1982). *Estudios sedimentológicos en la Formación Pacacua (Mioceno, CR)*. Universidad de Costa Rica, San José, 185 p.

Berrangé, J., Wittaker, J.E. (1977). *Reconnaissance Geology of the Tapantí Quadrangle, Talamanca Cordillera, Costa Rica*. Institute Geol. Sciences, Overseas Division, London, 73 p.

Bull, W., McFadden, L.D. (1977). Tectonic Geomorphology north and south of the Garlock fault California. En: Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology in arid regions*, Allen y Unwin, London, 115-138.

Burbank, D., Anderson, R.S. (2001). *Tectonic Geomorphology*, Blackwell, Oxford, 274 p.

Castillo, R., (1969). *Geología de los mapas básicos de Abra y parte de río Grande, Costa Rica. Informes técnicos y notas geológicas*. Informes técnicos y notas geológicas, Ministerio de Industria y Comercio, Dirección de Geología, Minas y Petróleo, 33: 1-40.

Defant, M., Richerson, P., Deboer, J., Stewart, R., Maury, R., Bellon, H., Drummond, M., Feigenson, M., Jackson, T., (1991). Dacite genesis via both slab melting and differentiation; petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama. *Petrol.*, 1989: 1101-1142.

Dengo, G., (1962). Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. En: *Petrologic Studies*, Geol. Soc. America, Buddintong, 133-16.

Dengo, G., Chaverri, R. (1951). *Reseña Geológica de la región Sudoeste de la Meseta Central de CR*. Rev. UCR, 5: 313-326.

Denyer, P., Arias, O. (1991). *Estratigrafía de la región central de Costa Rica*. Rev. Geol. America. Central, 12: 1-59.

Denyer, P., Alvarado, G., (2007). *Mapa Geológico de Costa Rica. Escala 1:400 000* Librería Francesa, San José, Costa Rica.

Dóndoli, C., Chaves, R. (1968). *Mapa adjunto al estudio geológico del Valle Central.- Escala 1: 150 000*, IGN, San José, Costa Rica.

Dóndoli B., Torres A. (1954). *Estudio geo-agronómico de la región oriental de la Meseta Central. San José-CR: Ministerio de Agr. Ind., 11-47.*

Escalante, G., (1966). *Geología de la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.* Inst Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, Publ. Geol. ICAITI: 59-70.

Fischer, R., Franco, A., J.C. (1979). La Formación Coris (Mioceno, Valle Central, CR). *Inf. Sem. IGN. Jun*, San José, CR, 15-71.

Gazel, E., Hayes, J., Hoernle, K., Kelemen, P., Everson, E., Holbrook, S., Hauff, F., Bogaard, P., Vance, E., Chu, S., Calvert, A., Carr, M., Yogodzinski, G. (2015). Continental crust generated in oceanic arcs. *Nature*, 8: 321-328.

Gazel, E., Hoernle, K., Carr, M., Herzerg, G., Saginor, I., Vandenbogaard, P., Hauff, Feigenson, M., Swisher III, C. (2011). Plume subduction interaction in southern Central America: Mantle upwelling and slab melting. *Lithos*, 121: 117-134.

Irvine, T., Baragar, A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548.

Krushensky. R. (1972), *Geology of Istarú quadrangle, Costa Rica.* U.S. Geol. Surv., Bull., 1358, 46 p.

Montero, W., Linkimer, L., Rojas, W. (2016). *El sistema de falla Navarro: desplazamientos izquierdos a lo largo del cinturón deformado del centro de Costa Rica.* Revista Geológica de América Central, 55: 71-100.

Montero, W., Morales, L. (1990). *Deformación y esfuerzos neotectónicos en Costa Rica.* Revista geológica de América Central: 11, 69-87.

- Montero, W. (2001). *Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la Microplaca de Panamá*. *Revista Geológica de América Central*, 24: 29-56.
- Montero, W., Rojas, W., Linkimer, L. (2013). *Neotectónica de las fallas Ochomogo y Capellades y su relación con el sistema de falla Aguacaliente, falda Sur Macizo Irazú-Turrialba, Costa Rica*. *Revista Geológica de América Central*, 48: 119-139.
- Rivier, F. (1979). Geología del área norte de los cerros de Escazú, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Inf. Sem. IGN*, San José, CR, 1, 99-138.
- Romanes, J. (1912). Geology of part of Costa Rica. *Quart. Jour. Geol. Soc.* London, 68: 103-139.
- Salvador, A. (1994). *International Stratigraphic Guide*. The International Union of Geological Sciences, Boulder, Colorado, 364 p.
- Sojo, D. (2015). *Modelo geológico del cuadrante Tapantí, Costa Rica*. Universidad de Costa Rica, San José, 125 p.
- Soto, D., Alvarado G.E. (2012). *Peperitas en Costa Rica*. *Revista Geológica de América Central*, 47: 55-68.
- Umaña, J. (1966). *Geología del sitio de presa del proyecto Cachí, Costa Rica*. Inst Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, Publ. Geol. ICAITI, 1: 27-41.

ANEXOS

1. Mapa geológico

2. Datos básicos de los sondeos de pozos

POZO	X	Y	PROPIETARIO	PROF. (m)	N. EST. (m)	N. DIN. (m)	Q (l/s)	USO
ILG305	511549	1090550	EXPORFLOR DE CARTAGO S.A.	0	0		18.9	RIEGO
ILG471	515246	1087847	JOSE JOAQUIN FONSECA MORALES	0	0		3.0	RIEGO
IS105	511897	1088590	ALVARO CASTRO	132	89	89.15	10.0	DOMESTICO
IS162	513146	1088249	PARAISO INDUSTRIAL	90	58	71	5.4	INDUSTRIAL
IS164	513372	1088748	EXPOFLOR	177	132		0.0	RIEGO
IS165	513347	1088548	EXPOFLOR	162	0		0.0	RIEGO
IS179	513447	1088798	AGROFLOR	135	109	109.4	2.0	RIEGO
IS180	513447	1088648	AGROFLOR	64	45		1.5	RIEGO
IS182	513766	1088148	GUILLERMO COGHI GUEVARA	45	2	4.24	0.6	RIEGO
IS184	514146	1087878	PARQUE REC.LA EXPRESION	50	8	9.75	1.0	RIEGO
IS202	513696	1088098	ALIMENTOS KAMUK	60	0		2.0	INDUSTRIAL
IS213	512106	1087750	U.C.R.	130	0		5.0	ABAST. PUBLICO
IS226	512569	1090689	FLORIDA HELECHOS S.A.	54	26	50	1.7	RIEGO
IS228	511697	1088850	ASOC.MANANTIAL VIDA ETER.	78	0		0.5	DOMESTICO
IS268	511199	1090351	MIGUEL BRENES MATA	24	6		1.8	RIEGO
IS277	512849	1090299	HUMBERTO MASIS MASIS	0	0		0.5	DOMESTICO
IS284	511922	1088750	INDUSTRIAS TEXSEDA, S.A.	109	28		0.4	INDUSTRIAL
IS297	512146	1087950	U.C.R.	136	98		9.8	ABAST. PUBLICO
IS325	513148	1089799	HELECHOS DE CUERO, S.A.	194	1		0.0	INDUSTRIAL
IS338	512896	1088299	ANACLETO, S.A.	142	99		7.0	RIEGO
IS352	512988	1089539	INVERSIONES BERMONT	181	0		0.0	RIEGO
IS361	512647	1088449	COOPEPAR, R.L.	0	0		0.5	DOMESTICO
IS37	515368	1089646	A.COLLADO	28	8	11.58	3.8	RIEGO
IS390	516517	1089175	NESTOR MATA	148	109		0.5	DOMESTICO
IS391	515904	1089280	EL PEIPUTE S.A	200	32		2.5	DOMEST-RIEGO
IS397	512447	1088649	RICALIT S.A.	186	107		0.0	INDUSTRIAL
IS404	512798	1089649	HEL-PARAISO S.A.	201	147	169.93	14.2	RIEGO
IS408	513386	1088248	FRANCISCO MADRIZ MORA	142	124		2.0	VARIOS
IS414	511847	1088550	JOSE DELGADO NUÑEZ	0	0		0.5	DOMESTICO
IS429	512949	1090699	JOSE BRENES MATA	120	52		6.0	RIEGO
IS434	513347	1088798	FLOREXPO S.A.	157	113	113.5	3.5	RIEGO
IS457	514928	1089947	CLAUDIO BONILLA ALARCON	0	0		0.0	RIEGO
IS459	512548	1089899	INVERSIONES LOTES Y CASAS S.A.	52	0		0.5	DOMESTICO
IS472	516648	1090145	FINCA BIRRISITO S.A.	0	0		0.7	VARIOS
IS48	512347	1088590	RICALIT	37	0		0.0	INDUSTRIAL
IS486	511767	1089162	MURILLO Y RAMIREZ S.A.	148	102		0.0	RIEGO
IS487	512722	1088599	CONCEPTOS TEXTILES DE C.R.	120	104		0.0	INDUSTRIAL
IS489	513647	1088513	FLOREXPO S.A.	134	120	127	4.7	RIEGO
IS49	512396	1088200	ICE	44	0		0.5	DOMESTICO
IS490	512297	1088550	AMANCO DE COSTA RICA S.A.	200	99		20.0	INDUSTRIAL
IS50	512817	1088499	ICE	67	40		1.3	DOMESTICO
IS500	512149	1090550	AYA	225	0	0	9.5	ABAST. PUBLICO
IS51	513347	1088548	I.C.E	34	23		1.0	ABAST. PUBLICO
IS546	512206	1088100	COMERCIAL GON FRI S.A.	140	0		10.0	URBANISTICO
IS551	511998	1089350	SEVEN DAYS S.A.	500	0		5.0	URBANISTICO
IS552	512148	1089283	CONSTRUCTORA PARAISO INC.EMP.RESP.LTDA.	180	0		5.0	URBANISTICO
IS61	512447	1088549	RICALIT	60	17		0.0	INDUSTRIAL
IS62	512447	1088569	RICALIT	120	112	112.3	3.8	INDUSTRIAL
IS63	514247	1088648	ANA L.DE ECHEVERRIA	53	38		0.5	DOMESTICO
IS67	512547	1088649	RICALIT	91	0		0.0	INDUSTRIAL
IS69	512147	1088800	FABRICA RICALIT	127	101	101.2	6.3	INDUSTRIAL
IS99	512046	1087650	LUIS CASTRO	95	28		2.0	DOMESTICO

3. Datos de perfiles de sísmica de refracción

LÍNEA 1				LÍNEA 2			
DISTANCIA (m)	TIEMPO (ms)	DISTANCIA (m)	TIEMPO (ms)	DISTANCIA (m)	TIEMPO (ms)	DISTANCIA (m)	TIEMPO (ms)
0	0	0	0	0	0	0	0
5	9.5	5	14	5	15.5	5	14.5
10	17.3	10	20.5	10	20	10	22.2
15	25.3	15	22.2	15	26	15	27
20	29.5	20	28	20	31.5	20	34
25	36	25	29.5	25	34.5	25	37.4
30	37.5	30	34	30	37.4	30	40.3
35	39.5	35	38.5	35	40.2	35	43.9
40	42	40	42.2	40	43.8	40	46.2
45	44.4	45	43.3	45	45.5	45	48.2
50	46.5	50	47	50	46	50	50.8
55	48.1	55	49	55	50.3	55	50.8
60	49.8	60	51.2	60	53	60	54
LÍNEA 3				LÍNEA 4			
DISTANCIA (m)	TIEMPO (ms)	DISTANCIA (m)	TIEMPO (ms)	DISTANCIA (m)	TIEMPO (ms)	DISTANCIA (m)	TIEMPO (ms)
0	0	0	0	0	0	0	0
5	11.5	5	7.7	5	9.2	5	9
10	18.2	10	19.2	10	13	10	16.5
15	26.7	15	27.8	15	19	15	26.3
20	28.4	20	31	20	27.5	20	34.6
25	32	25	34.2	25	32.7	25	38.8
30	37.6	30	38.3	30	39	30	44.2
35	40.2	35	39.3	35	44	35	48
40	43.1	40	42	40	48.3	40	53.5
45	46.3	45	45.4	45	51	45	55.4
50	49.5	50	48.7	50	54.7	50	59.5
55	51	55	51.6	55	59.1	55	61.2
60	53	60	54.2	60	62.5	60	63.2

4. Datos utilizados en el trazado de los contornos estructurales

Tipo de dato	Altura (m.s.n.m.) Superficie	Altura (m.s.n.m.) Techo Fm Paraíso	Coord. X	Coord. Y	Tipo de dato	Altura (m.s.n.m.) Superficie	Altura (m.s.n.m.) Techo Fm Paraíso	Coord. X	Coord. Y
Afloramiento	1502	1502	514794	1090697	Afloramiento	1271	1271	515303	1087495
Afloramiento	1470	1470	513490	1090831	Afloramiento	1269	1269	515377	1087567
Afloramiento	1468	1468	513499	1090752	Afloramiento	1260	1260	515713	1087502
Afloramiento	1461	1461	513263	1090791	Afloramiento	1251	1251	516053	1087551
Afloramiento	1454	1454	514779	1090566	Afloramiento	1251	1251	516168	1087549
Afloramiento	1431	1431	516449	1090287	Afloramiento	1242	1242	516319	1087585
Afloramiento	1417	1417	513632	1090340	Afloramiento	1234	1234	516569	1087765
Afloramiento	1389	1389	512030	1089630	Perfil sísmico	1352	1344	514521	1089685
Afloramiento	1389	1389	513993	1089864	Perfil sísmico	1333	1325	514496	1088706
Afloramiento	1385	1385	516361	1090011	Perfil sísmico	1370	1360	511497	1089339
Afloramiento	1381	1381	513921	1090055	Perfil sísmico	1341	1331	514513	1089127
Afloramiento	1373	1373	512002	1089455	Sondeo de pozo	1359	1344	511897	1088590
Afloramiento	1364	1364	511842	1089336	Sondeo de pozo	1350	1333	515399	1089606
Afloramiento	1415	1360	513148	1089806	Sondeo de pozo	1363	1343	513347	1088548
Afloramiento	1313	1313	515489	1088619	Sondeo de pozo	1410	1385	512548	1089899
Afloramiento	1310	1310	515354	1088674	Sondeo de pozo	1360	1330	512146	1087950
Afloramiento	1310	1310	515410	1088686	Sondeo de pozo	1360	1330	513447	1088648
Afloramiento	1309	1309	515439	1088640	Sondeo de pozo	1359	1329	512896	1088299
Afloramiento	1308	1308	515513	1088621	Sondeo de pozo	1367	1327	513447	1088798
Afloramiento	1308	1308	516025	1088667	Sondeo de pozo	1458	1426	512569	1090689
Afloramiento	1306	1306	516597	1089047	Sondeo de pozo	1370	1337	512297	1088550
Afloramiento	1305	1305	516607	1088963	Sondeo de pozo	1453	1416	512949	1090699
Afloramiento	1298	1298	516672	1088914	Sondeo de pozo	1443	1363	512798	1089649
Afloramiento	1298	1298	515414	1088595	Sondeo de pozo	1370	1330	512447	1088549
Afloramiento	1290	1290	516607	1088669	Sondeo de pozo	1361	1318	511767	1089162
Afloramiento	1290	1290	516672	1088736	Sondeo de pozo	1370	1321	512447	1088649
Afloramiento	1285	1285	516590	1088568	Sondeo de pozo	1367	1317	512147	1088800
Afloramiento	1285	1285	516521	1088324	Sondeo de pozo	1360	1310	513386	1088248
Afloramiento	1279	1279	515590	1088072	Sondeo de pozo	1391	1340	512987	1089535
Afloramiento	1286	1276	515569	1087967	Sondeo de pozo	1360	1300	516651	1089284

Unidades cartográficas

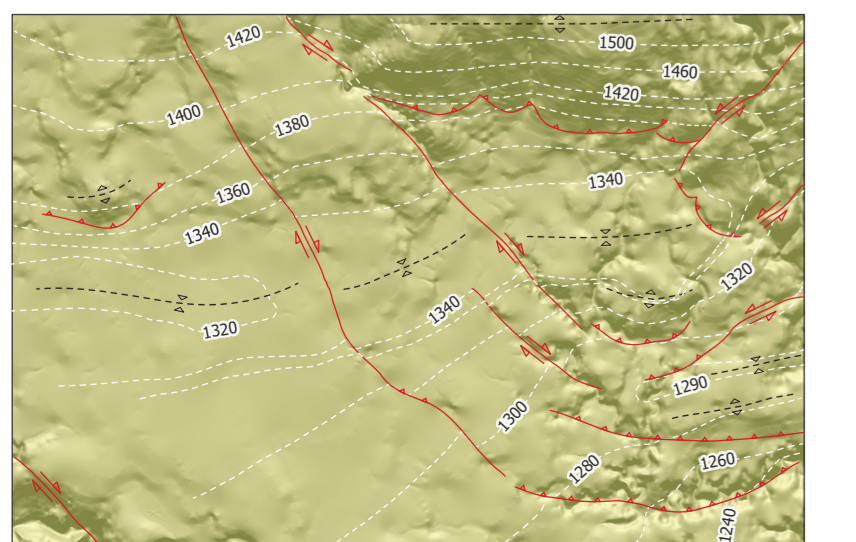
Unidades cartográficas	Sistema	Epoca	Plano	UNIDADES ÍGNEAS	OTRAS UNIDADES	UNIDADES SEDIMENTARIAS
0	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Sup.	Ivolcanismo Calcoo-Alcalino	Qph-lr	Qh-al
0.01						Qh-col
0.02						
0.04						
0.06						Qp-al
0.08						
0.1						
0.15						
0.2						
0.4						
0.6						
0.8						
1						
2						
3						
4						
5						
10						
15						

Unidades sedimentarias	Unidades ígneas
Qh-al Depósitos Aluviales Recientes <i>Bloques, grava y arena</i>	Qp-Rv Formación Reventado <i>Andesita y brecha</i>
Qp-col Coluvios <i>Bloques y arcilla</i>	Qp-Pa Formación Paraiso <i>Andesita y brecha</i>
Qp-al Depósitos Aluviales del Pleistoceno <i>Bloques, grava, arena y arcilla</i>	
Qp-l Depósitos Lacustres <i>Arcilla y limo</i>	
Nm-P Formación Pacacua <i>Arenisca, brecha y lutita</i>	

Símbolos geológicos

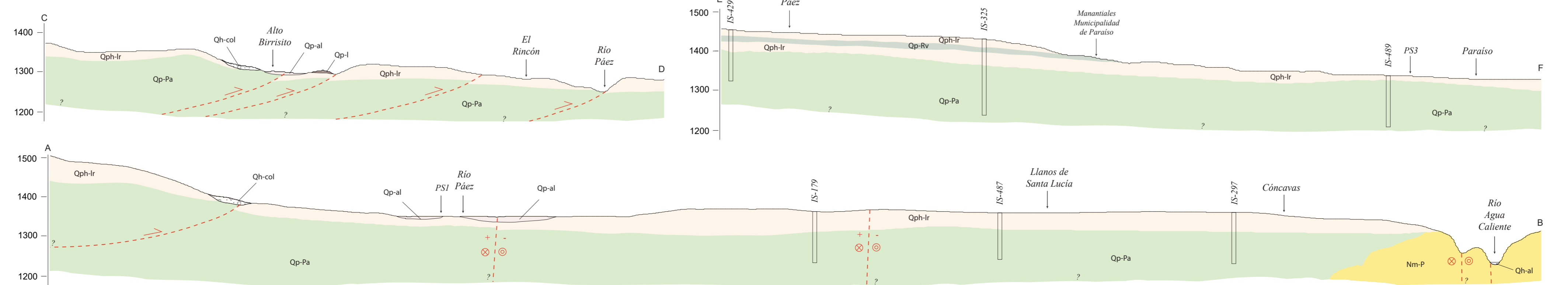
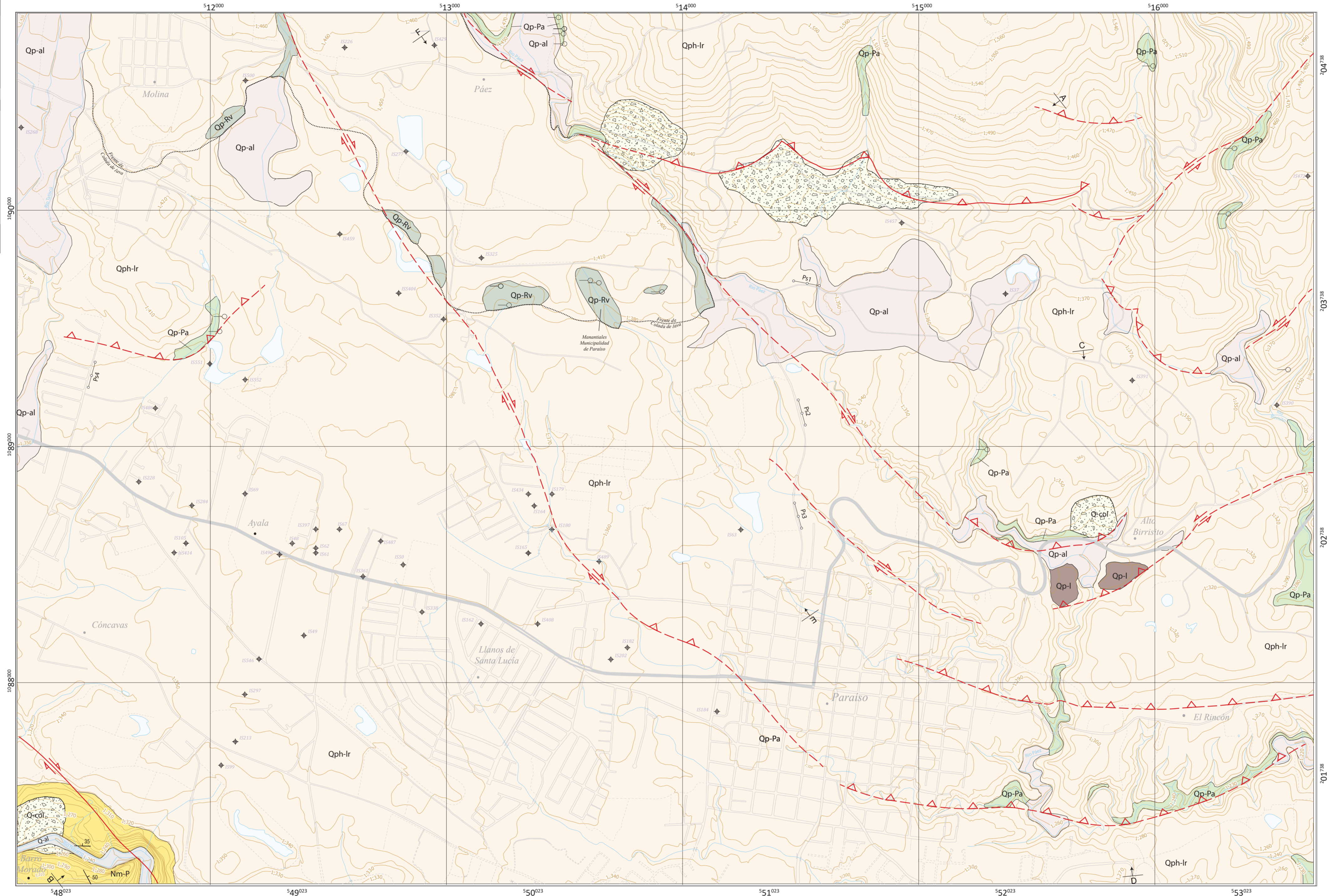
- Falla de desgarre con indicación del sentido de movimiento
- (+)(-) Bloque que sube, (-) bloque que baja.
- Falla comprobada
- Falla supuesta
- Falla inversa (triángulos apuntan al bloque cabalgante)
- Traza axial de pliegue sinforme
- Traza axial de pliegue antiforme
- Estratificación, con indicación del valor del buzamiento
- Falla sinistral en perfil
- Falla dextral en perfil
- Movimiento relativo de falla en perfil
- Extremo de perfil geológico
- Perfil de sísmica de refracción
- Datación radiométrica (Ma: millones de años) y datación paleontológica
- Evento tectónico (Denyer y Arias, 1991)
- Registro de sondeo (base de datos SENARA)
- Manantial (base de datos MINAE y observaciones de campo)
- Línea de contornos estructurales de la Formación Paraiso (línea blanca en mapa de sombreado del terreno)
- Frente de colada de lava Formación Reventado
- Cicatriz de cabecera de deslizamiento

Contornos estructurales para la superficie del techo del basamento rocoso (Formación Paraiso), estructuras y modelo digital del sombreado del relieve

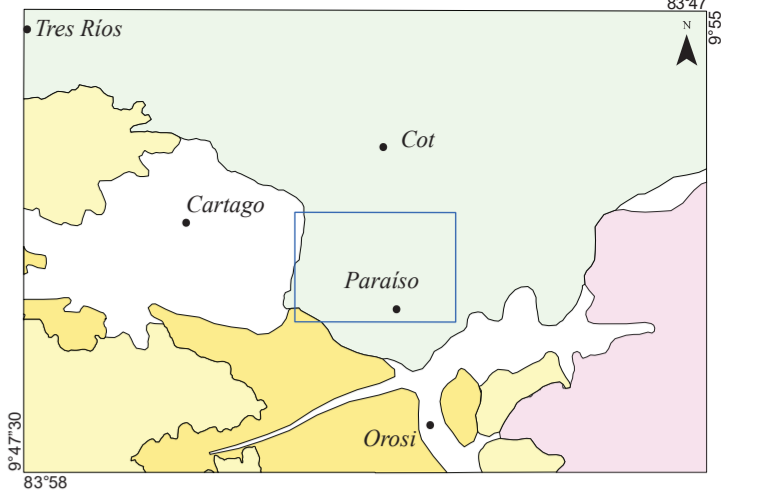


MAPA GEOLÓGICO DE LA HOJA PARAÍSO (1:10 000), COSTA RICA

Dennis Sojo Rivera



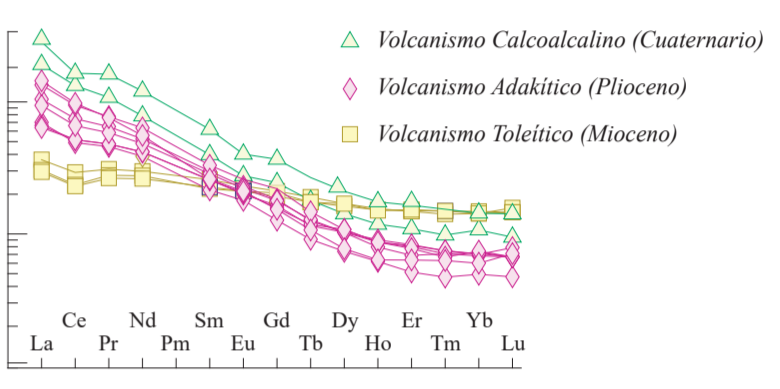
Macrounidades geológicas



- Sedimentos inconsolidados (depósitos aluviales, lacustres y debris flow, del Pleistoceno superior-Holoceno)
- Volcanismo Calcooalcalino (coladas de lava, brechas y tobas de edad Pleistoceno Medio-Holoceno)
- Volcanismo Adakítico (coladas de lava, toba, brecha e intrusivos hipobasales del Plioceno-Pleistoceno)
- Volcanismo Toleítico (coladas de lava, toba y brechas del Mioceno)
- Cuenca Candelaria (sedimentos neríticos del Mioceno)

Geoquímica

Diagrama tipo "araña" normalizado a condritos basado en los datos presentados por Sojo (2015) donde se evidencia la evolución geoquímica registrada en las rocas volcánicas de la región desde el Mioceno hasta el presente.



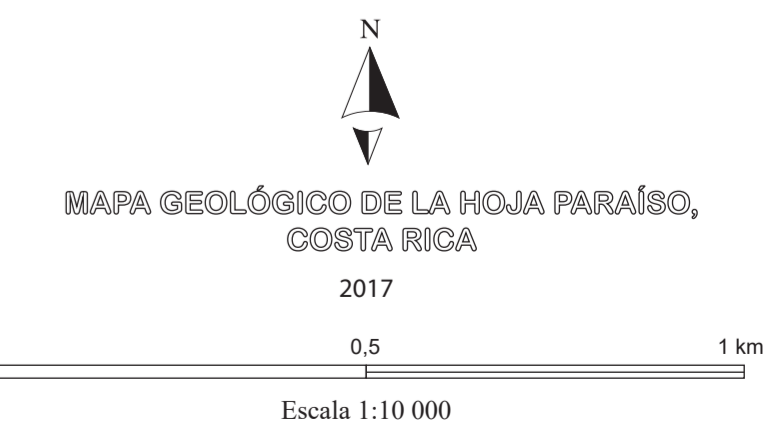
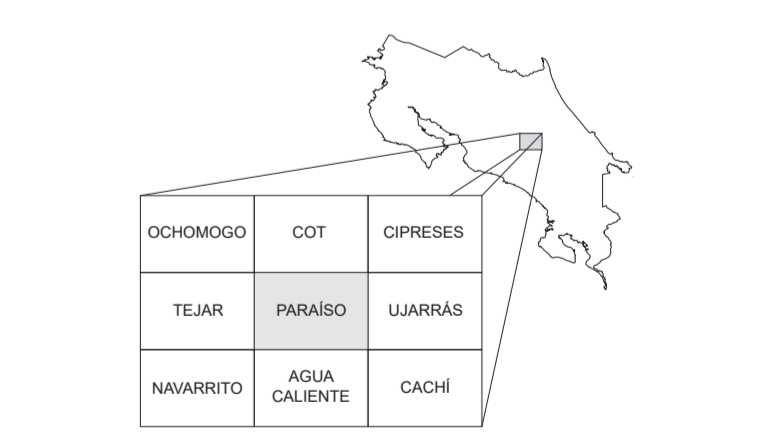
Principales fuentes de información

- DÓNDOI, C. & CHAVES, R., 1968: Mapa adjunto al estudio geológico del Valle Central.- Escala 1: 150 000, IGN, San José
- KRUSHENSKY R.D., 1972: Geology of Istarú quadrangle, Costa Rica.- U.S. Geol. Surv., Bull. 1358, 46 págs.
- ALVARADO, G.E., CARR, M., TURRIN, B., SWISHER, C., SCHMINCKE, H., & HUDNUT, K., 2006: Recent volcanic history of Irazú volcano, Costa Rica: Alternation and mixing of two intracrustal chambers.- En: ROSE, W., BLUTH, G., CARR, M., EWERT, J., PATINO, L., & VALLANCE, J. (eds): Natural Hazards in Central America. Geol. Soc. Am. 412: 259-276.
- MONTERO, W., 2001: Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la Micropalca de Panamá.- Rev. Geol. Amér. Central, 24: 29-56.
- ALVARADO, G., GANS, P., 2012: Síntesis georrológica del magmatismo, metamorfismo y metalogía de Costa Rica, América Central.- Rev. Geol. Amér. Central, 46:7-122.
- SOJO, D., 2015, Modelo geológico del cuadrante Tapanti, Costa Rica. Tesis de Licenciatura Univ. de Costa Rica, San José 160 pp.

Símbolos geográficos

- Curva de nivel (cada 10 m.s.n.m)
- Ruta primaria
- Ruta secundaria
- Río o quebrada
- Laguna o balsa

Ubicación de la hoja Paraiso (3445-IV-23), escala 1:10.000



*Base cartográfica del proyecto BID-CATASTRO (2005), Instituto Geográfico Nacional (IGN). Sistema de coordenadas CRTM 05 (parte superior de la cuadrícula) Lambert Norte (parte inferior y derecha de la cuadrícula). Elipsoide WGS84. **Este mapa geológico es parte de un modelo conceptual, concebido como un insumo inicial para la planificación de uso de la tierra y como base para ulteriores investigaciones. Por lo tanto, no reúne las características de precisión para su utilización directa en obras civiles