

Universidad de Costa Rica  
Instituto de Investigaciones en Ingeniería  
Laboratorio de Ingeniería Sísmica

Informe final de investigación:

**Caracterización de la geología superficial y subterránea, del  
área de las estaciones acelerográficas RALT, CSLG, CCDN,  
CPAR, CCCH, sector central de la provincia de Cartago**

N° 731-A9-123

Vanessa Rojas Herrera, Investigadora Principal

20 de mayo del 2010

# ANTECEDENTES

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) está dedicado al estudio de eventos sísmicos, incluyendo estudios efectos de sitio, atenuación, amplificación, amenaza sísmica, potencial de daño y de vulnerabilidad, entre otros, con el fin de mejorar el diseño de infraestructura y disminuir el riesgo.

Este laboratorio cuenta actualmente con más de 40 estaciones de acelerógrafos a lo largo del país, de las cuales 5 están ubicadas en el sector central de la provincia de Cartago, una zona densamente poblada del país, que cuenta con más de 150 000 personas solamente en el cantón central (véase [www.inec.go.cr](http://www.inec.go.cr)).

Cada una de estas estaciones posee una descripción de la geología superficial básica del punto en el cual están ubicadas. Sin embargo no cuentan con una descripción detallada de la misma, así como de perfiles estimados del espesor de suelo. Siendo este último aspecto sumamente importante en el estudio de la amplificación del suelo, efectos de sitio y amenaza sísmica.

La geología tanto en el cantón central de Cartago, como en sus cantones aledaños, muestra que dichas poblaciones se encuentran construidas sobre rocas volcánicas producto de diferentes eventos eruptivos del volcán Irazú, intercalados en menor proporción con depósitos fluviales, todos estos afectados por la falla Aguacaliente, que se extiende desde el sur de San José hasta el suroeste Paraíso y se considera la responsable del terremoto que destruyó la ciudad colonial de Cartago en 1910.

Por lo tanto la elaboración de esta caracterización geológica superficial y subterránea permite conocer las condiciones geológicas en las que se encuentra cada estación acelerográfica, así como los cantones centrales de la provincia. Promoviendo la definición de sectores más susceptibles a amplificación de terreno, así como la propuesta de lugares en los cuales puedan colocarse nuevas estaciones y por último sentando las bases para posteriores estudios de efectos de sitio y amenazas.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Determinar la geología en los puntos de las estaciones de acelerógrafos, mediante revisión bibliográfica, perfiles geológicos y levantamiento geológico, con el fin de establecer la geología tanto superficial como subterránea y su relación con la ubicación actual de las estaciones, así como el establecimiento de futuras estaciones.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar la bibliografía existente de la geología superficial del área de estudio para elaborar un mapa geológico.
- Recopilar la información geológica de los pozos del SENARA de esta área para elaborar los perfiles.
- Proponer sectores de establecimiento de nuevas estaciones, con el fin de determinar puntos con las condiciones óptimas de ubicación de las mismas.

De acuerdo con los objetivos establecidos se logró llevar a cabo el 100 % de lo previsto en el proyecto, se logro compilar un mapa geológico general actualizado con los aportes de diferentes autores, se realizaron en total 7 perfiles a lo largo del centro y alrededores de la ciudad de Cartago pasando por las estaciones acelerográficas respectivas y se proponen dos poblados idóneos para la colocación de futuros acelerógrafos tomando en cuenta el tipo de roca sobre la que están asentadas.

## **DURACIÓN**

Este proyecto inició el 23 de enero del 2009. Se realizó una solicitud de suspensión desde el 30 junio del 2009, hasta el 31 de diciembre de ese año, oficio INII-LIS-043-2009, debido a que el Instituto no contaba con ¼ T disponible para concluir el proyecto. Posteriormente, se reactivó desde el 01 de enero del 2010 hasta el 30 de junio del 2010. El cronograma planteado al inicio, no cambió de forma significativa, ya que solamente se retrasaron las fechas para cada una de las actividades propuestas.

## **INVESTIGADORES**

Investigadora principal: Vanessa Rojas Herrera.

Investigador asociado: Aarón Moya Fernández.

## **METODOLOGÍA**

Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva, con el fin de identificar las unidades geológicas y las estructuras neotectónicas presentes en el área. Tanto las formaciones geológicas como de las estructuras tectónicas encontradas, fueron procesados mediante el software de ubicación geográfica *Integrated Land and Water Information System* (ILWIS), a manera de base para el trabajo posterior.

Se comparó la ubicación y descripción de las diferentes unidades geológicas de los diversos autores, tomando en cuenta las características geomorfológicas y actualizaciones de datos, con el fin de elaborar el mapa geológico superficial. De la misma manera se trabajó con las estructuras tectónicas.

La información geológica de los pozos fue obtenida del registro de pozos solicitado al SENARA. Dicho registro fue procesado en el programa ILWIS, con el fin de obtener el mapa de ubicación de pozos. A partir de este mapa y de la ubicación de las estaciones acelerográficas existentes, se plantearon los perfiles geológicos a realizar.

Los perfiles topográficos fueron elaborados utilizando los programas Surfer 8 y Excel. Posteriormente se dibujaron todos los pozos con las diferentes unidades descritas en el registro del SENARA, utilizando el programa Adobe Illustrator. Por último, los pozos seleccionados fueron incluidos dentro de los perfiles topográficos respectivos.

Utilizando el mapa de geología superficial, con las respectivas las descripciones litológicas, las estructuras neotectónicas recopiladas y las descripciones de pozos, se re-interpretaron algunos pozos y se elaboraron los perfiles geológicos.

Posteriormente se elaboró el mapa de sectores adecuados para poner estaciones acelerográficas.

El cronograma establecido para el cumplimiento de la metodología se presenta en la siguiente tabla.

<b>Actividad</b>	<b>Fecha</b>
Revisión bibliográfica y recopilación de datos del SENARA	del 23/01/2009 al 31/03/2010
Procesamiento de la información y Elaboración de perfiles	del 01/04/2009 al 30/06/2009 del 01/01/2010 al 30/04/2010
Interpretación e informe final	del 01/05/2010 al 30/06/2010

Tabla 1: Cronograma

## **Dificultades**

Entre las dificultades encontradas se presenta la inconsistencia entre las descripciones y ubicación de las unidades geológicas del área. Tanto los nombres como las interpretaciones geológicas han variado a lo largo del tiempo, por lo tanto en muchos casos se contradicen de uno a otro año, u autor. Una de las razones de este fenómeno puede deberse tanto a las metodologías utilizadas por cada autor, número y condición de los caminos de acceso, como al grado de meteorización de la roca, ya que dependiendo del grado de alteración no es posible apreciar las principales características de la litología y puede confundirse con otras unidades o inclusive perderse del todo toda la información de la roca madre. Así mismo, ha dependido de la cantidad y calidad de afloramientos a lo largo del tiempo. Esta dificultad se superó, estableciendo pesos a las descripciones de los diferentes autores, tomando en cuenta el tipo de estudio (general, vulcanológico, sedimentológico, etc) y grado de detalle.

Por otro lado, la ciudad de Cartago, por su cercanía al volcán Irazú y gracias a los procesos tectónicos de hundimiento locales (en los alrededores de la falla Aguacaliente), se encuentra asentada sobre una compleja secuencia de depósitos. Por un lado se presentan diversos depósitos volcánicos de diferentes características y consistencias y por el otro, depósitos fluviales y lacustres intercalados, que por sus características, pueden ser poco diferenciados unos de otros y por lo tanto, no reflejados en las descripciones de pozos y confundidos en las descripciones de geología superficial.

Así mismo, en algunos casos las descripciones de pozos en el SENARA suelen ser limitadas, confusas y ocasionalmente contradictorias e inconsistentes. Lo que lleva a que se presenten una serie de pozos cercanos (separados por distancias métricas) con descripciones litológicas totalmente diferentes entre si, siendo estos pozos in-correlacionables. Por otro lado, en algunos casos, las descripciones de los pozos no coinciden con la geología superficial indicada para esa área.

Para superar estas dificultades, se analizaron y compararon las descripciones de pozos con respecto a la geología superficial planteada, dando así mayor relevancia a una o a otra, dependiendo del grado de detalle de la descripción o la presencia de contradicciones.

En cuanto a las estructuras neotectónicas, en algunos casos, se presentan diferentes trazas inferidas a lo largo del tiempo, esto debido a que el área se encuentra en pleno proceso de estudio neotectónico de comprobación, tomándose en cuenta las más actualizadas o estudiadas.

# **RESULTADOS**

## ***CARACTERIZACIÓN DE LA GEOLOGÍA SUPERFICIAL***

El área de Cartago se encuentra asentada sobre una secuencia sedimentaria y volcánica que va desde el Mioceno hasta el Pleistoceno y sobre esta se encuentran una serie de depósitos de la cordillera actual (Volcán Irazú), así como depósitos fluviales y lacustres actuales. Así mismo es cortada por una serie de fallas activas, entre las que sobresale, el sistema de fallas de Aguacaliente, Navarro y la falla Orosi (Figura 1: Mapa Geológico). A Continuación se presenta un resumen de las unidades geológicas del área de acuerdo al orden cronológico.

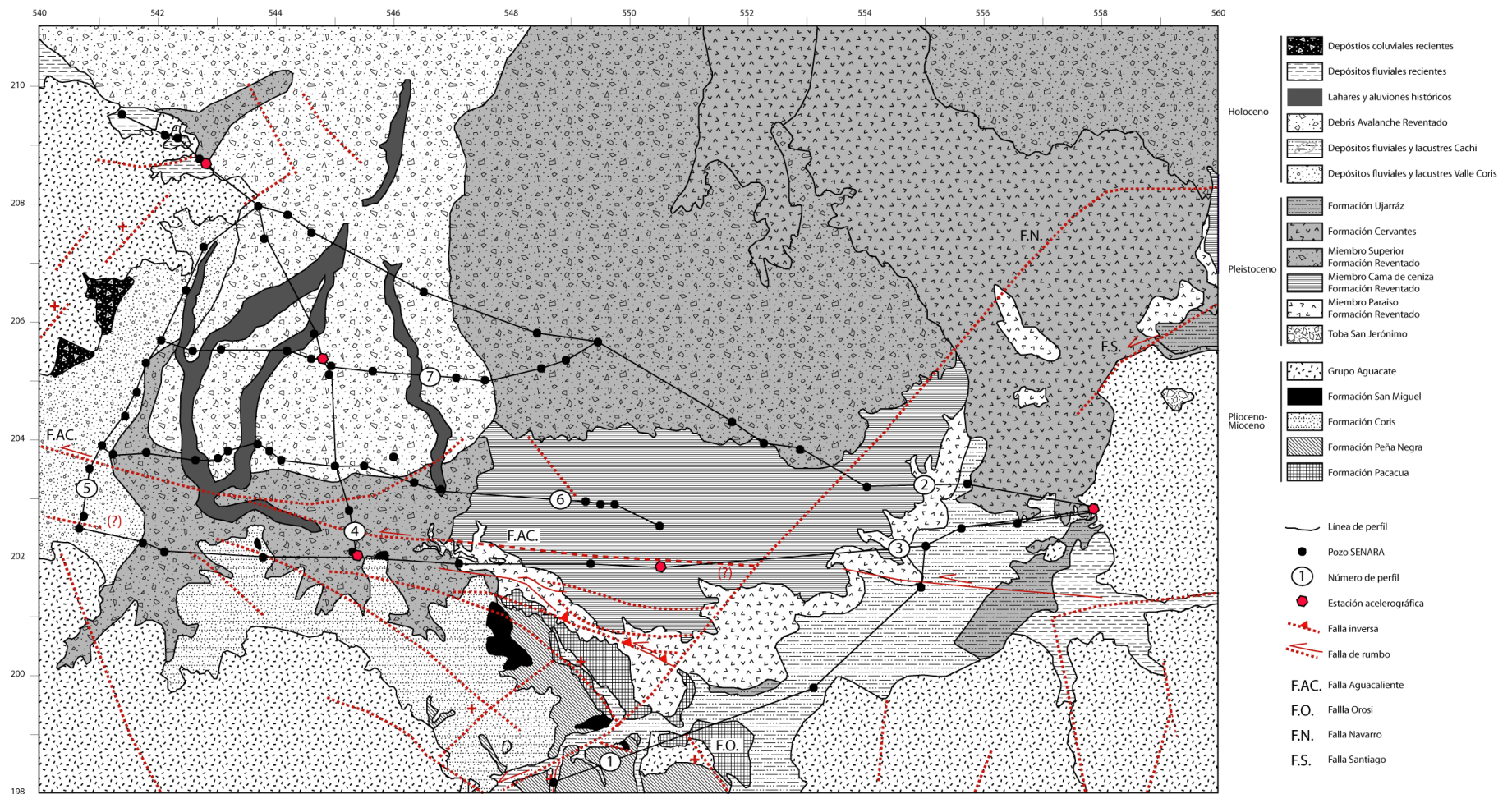


Figura 1: Mapa Geológico

Base geológica tomada de Krushensky (1972), Berrangé & Whittaker (1977), Badilla et al. (1999), Alvarado (1993), Pavanelli et al. (2004), Alvarado et al. (2006) y Quintanilla et al. (2008). Las fallas son tomadas de Berrangé & Whittaker (1977), Badilla et al. (1991), Salazar et al. (1992), Denyer et al. (2003), Linkimer (2003) y Montero & Kruse (2006).

## 1. Formación Pacacua

Características	Relaciones estratigráficas	Edad	Otras
<p>Fue definida por Castillo (1969) fuera del área de estudio, como interestratificaciones de conglomerados brechosos y areniscas conglomeráticas, areniscas, limolitas y lutitas, todas tobáceas, con espesores mayores de 1148 m. Según Denyer &amp; Arias (1991) hacia la parte superior presentan fragmentos de troncos, diques y sill métricos y estiman un espesor entre 1200 y 2000 m. El espesor estimado en los alrededores de Aguacaliente es de 150 m según Badilla et al. (1999).</p> <p>Dentro del área de estudio, en la hoja topográfica Tapantí, Berrangé &amp; Whittaker (1977) describen esta formación como brechas y conglomerados volcániclasticos, areniscas conglomeráticas, areniscas, y en menor porcentaje lutitas. Todas con buena estratificación. Generalmente los conglomerados y las areniscas son mucho más resistentes a la meteorización.</p>	<p>Sobreyacidas discordantemente por la Formación Peña Negra (Castillo, 1969), la Formación Ujarrás y las Calizas San Miguel (Berrangé &amp; Whittaker, 1977). Rivier (1979) afirma que esta formación es el equivalente lateral de la Formación San Miguel y Formación Coris, mientras Denyer &amp; Arias (1991) explican que sobryace gradualmente a la Formación Carraigres (fuera del área de estudio) y se encuentra sobryacida por la Formación Peña Negra mediante un contacto brusco.</p>	<p>-Mioceno Medio por ubicación estratigráfica (Castillo, 1969).            -Eoceno Superior a Oligoceno (Berrangé &amp; Whittaker, 1977).            -Mioceno (Rivier, 1979).            -Oligoceno Superior a Mioceno Inferior (Sprechmann et al., 1984).            -Mioceno Inferior (Denyer &amp; Arias, 1991).            -Edad mínima Oligoceno Superior a Mioceno Inferior, con base en las relaciones estratigráficas observadas en la Hoja San Isidro (Alvarado et al., 2009).</p>	<p>El ambiente de depositación es marino somero (sublitoral) con fuerte influencia del vulcanismo continental activo contemporáneo (Denyer &amp; Arias, 1991).</p>

## 2. Formación Peña Negra

Características	Relaciones estratigráficas	Edad	Otras
<p>Denyer &amp; Arias (1991) la describen, fuera de la hoja Tapantí, como constituida por areniscas medias y finas estratificadas, lutitas y areniscas finas, con intercalaciones de tobas y en la parte superior intercalaciones guijarrosas y estratos de caliza aislados, con aumento de la influencia volcánica.</p> <p>Dentro del área de estudio, Berrangé &amp; Whittaker (1977) afirman que esta formación está compuesta por areniscas y lutitas calcáreas, con estratos ocasionales de calizas, lutitas bioclásticas, conglomerados y brechas pobremente seleccionadas. Generalmente con un buzamiento menor a 10° y estratos muy gruesos de apariencia</p>	<p>Según Krushensky (1972) esta formación sobryace discordantemente a la Formación Pacacua y es sobryacida por las calizas San Miguel mediante un contacto concordante. Por otro lado, Denyer &amp; Arias (1991) afirman que Peña Negra es lateral a la Formación San Miguel y sobryacida y equivalente lateral de la Formación Coris y Turrucars. Los estudios de la Campaña Geológica de 1999 afirman que esta formación</p>	<p>-Mioceno Medio (Krushensky, 1972; Denyer &amp; Arias, 1991)            -Mioceno Inferior a Medio de acuerdo con los foraminíferos (Berrangé &amp; Whittaker, 1977).            -Mioceno Inferior. (Sprechmann et al., 1994).</p>	<p>Esta formación fue denominada en los trabajos de Castillo (1969), Krushensky (1972) y Berrangé &amp; Whittaker (1977) como el equivalente de la Formación Terraba (de la cuenca Terraba) para el Valle Central, lo cual posteriormente provocó que Sprechmann et al. (1984) propusiera eliminar la Formación Terraba del Valle Central renombrándola como</p>

<p>masiva. Se encuentra plegada con ejes de dirección W-NW cerca del poblado Navarro. Añaden que al norte del río Navarro el grado de meteorización de la roca es alto, inclusive haciendo difícil la separación entre esta formación y la Formación Coris, coincidiendo con lo expresado con Krushensky (1972). Se estima un espesor de 1200 m fuera del área de estudio según Denyer &amp; Arias (1991), mientras Badilla et al. (1999) observan un espesor de 450 m en las cercanías del poblado de Navarro.</p>	<p>presenta un contacto concordante con la Formación Pacacua y que presenta un contacto superior transicional con la Formación San Miguel (Badilla et al., 1999).</p>	<p>Formación Peña Negra. El ambiente de depositación estuvo dominado por periodos anóxicos de la plataforma interna y ocurrió durante un período de relativa calma volcánica y tectónica (Denyer &amp; Arias, 1991).</p>
---	---	--

### 3. Formación Coris

Características	Relaciones estratigráficas	Edad
<p>Definida por Castillo (1969) como una secuencia de arenisca cuarzosa espesa con intercalaciones de delgadas de lutita, tiene un espesor de 380 m. Franco (1978) añade que se compone de una secuencia de tobas finas, vulcarenitas, limolitas y lutitas interestratificadas con ortocuarzitas, que presentan en la base y en la parte superior interestratificaciones lenticulares decimétricas de lignito. En el área de estudio Krushensky (1972) indica que existen dos facies, una de ellas corresponde con las areniscas argilitizadas que presentan una meteorización mucho más fuerte y tienden a dar relieves mucho más suaves, poseen estratificación fina y fracturas poco espaciadas. La segunda <i>facie</i> consiste de areniscas cuarzosas, más resistente, de estratos gruesos y fracturas ampliamente espaciadas. Ambas <i>facies</i> son bastante friables y cambian en trayectos muy cortos. El espesor observado en la Hoja Istarú es de 60 m (Krushensky, 1972) mientras el espesor estimado general es de 500 m (Denyer &amp; Arias, 1991).</p>	<p>Sobreyace transicionalmente a la Formación Peña Negra (Denyer &amp; Arias, 1991). Castillo (1969), Morales (1975) y Carballo (1977) coinciden en que esta formación es sobreyacida discordantemente por el Grupo Aguacate (Formación La Cruz de acuerdo con Denyer &amp; Arias (1991)), mientras Krushensky (1972) observa un contacto por falla al sur del Tejar y Fisher &amp; Franco (1979) afirman un contacto brusco concordante y localmente discordante. De igual forma, el contacto con la Formación San Miguel varía dependiendo de los autores, concluyéndose que la Formación San Miguel constituye un lente dentro de la Formación Coris</p>	<p>-Mioceno Medio a Superior tardío con base en fósiles (Fisher &amp; Franco, 1979; Sprechmann et al., 1994).</p>

#### 4. Formación San Miguel

Características	Relaciones estratigráficas	Edad	Otras
Dentro del área de estudio ha sido descrita por Krushensky (1972) como calizas con ocasionales lentes o zonas de fragmentos de fósiles cementados por calcita. Morales (1975) especifica que la parte basal se compone de arenisca media, dura, ligeramente calcárea y sobre esta aparece la caliza gris oscuro, masiva, con abundantes restos orgánicos, muy fracturadas. Berrangé & Whittaker (1977) describen la formación en la ladera este del cerro Jucosal como calizas interestratificadas con lutitas, areniscas y conglomerados calcáreos, que poseen un buzamiento de 30° al suroeste. Añaden que la base es mucho más masiva y de estratos más gruesos que la parte superior.	Castillo (1969), Morales (1975) y Berrangé & Whittaker (1977) coinciden que esta formación sobreyace concordantemente a la Formación Peña Negra, y Berrangé & Whittaker (1977) afirman que sobreyace discordantemente a la Formación Pacacua. El tipo de contacto con la Formación Coris varía entre cada autor, por lo que Denyer & Arias (1991) concluyen que la Formación San Miguel se encuentra como un lente intercalado en la Formación Coris y describen el contacto inferior con esta última como concordante.	-Mioceno Inferior a Medio (Denyer & Arias, 1991). -Mioceno Medio en Sprechmann et al. (1994).	El ambiente de depositación se concluye como de salinidad normal, temperatura tropical, lejos de tierra firme, con una tasa de sedimentación rápida, interrumpida ocasionalmente (Carballo, 1978)

#### 5. Grupo Aguacate

Dentro de este grupo se han incluido todas la litologías volcánicas anteriores al emplazamiento de los volcanes de la cordillera volcánica actual, desde el Mioceno hasta el Plioceno- Pleistoceno? (Denyer & Arias, 1991). Estos autores dividieron este Grupo en dos formaciones, Formación La Cruz conformada por coladas de lava basáltica y tobas, sobre la cual se deposita la Formación Grifo Alto constituida por lavas andesíticas y flujos piroclásticos.

La Formación Doán, de acuerdo con trabajos anteriores (Escalante, 1966; Krushensky, 1972; Berrangé & Whittaker, 1977), se ha asumido como unidad independiente al Grupo Aguacate, sin embargo posteriormente Denyer & Alvarado (2007) la proponen en el Mapa Geológico de Costa Rica, 1:400 000, como formando parte de la Formación Grifo Alto. Por lo que tanto en el mapa geológico como en los perfiles, se utilizará solamente el nombre "Grupo Aguacate" incluyendo todas estas formaciones.

Las litologías de este grupo, en el área de estudio han sido descritas por Escalante (1966), Krushensky (1972), Morales (1975), Berrangé & Whittaker (1977), Elizondo (1979), Badilla et al. (1999) y Alvarado & Pérez (1999).

A continuación se presenta la descripción de estas formaciones.



## 5.1 Formación La Cruz

Esta área fue descrita por sectores especialmente por Krushensky (1972), Berrangé & Whittaker (1977) y Badilla et al. (1999). Se presentan diferencias en las descripciones litológicas entre los autores, lo cual puede deberse al grado de meteorización de la roca, así como a que visitaron diferentes afloramientos. Debido a que Berrangé & Whittaker (1977) realizan su estudio detallado en un área más amplia, se toma como base las descripciones realizadas por estos autores.

Características	Relaciones estratigráficas	Edad
<p>Krushensky (1972) y Berrangé &amp; Whittaker (1977) tobas finas intercaladas con arenas volcanoclásticas, aglomerados y brechas volcánicas, así como flujos de lava andesítica y basáltica y sedimentos locales. Intrusiones de numerosos plutones, diques, <i>sill</i> y <i>stock</i>, que varían de gabro a adamellita. Todas las litologías cercanas a estos intrusivos se encuentran alteradas hidrotermalmente, con silicificación, propilitización, kaolinización y priritización ampliamente distribuida.</p> <p>La mayor parte del área está representada por tobas, cuya génesis incluye flujos de ceniza masivos (ignimbritas) y ceniza de caída, así como tobas lapílicas, conglomerados y brechas volcánicas. Las coladas de lava andesíticas son poco abundantes y tienen espesores métricos. Mientras, las coladas de lava basálticas son horizontales, con un espesor observado de 100 m y presentan diques de dolerita (Berrangé &amp; Whittaker, 1977).</p> <p>Se estima un espesor mínimo de 1440 m (Berrangé &amp; Whittaker, 1977).</p>	<p>Sobreyace en concordancia angular a la Formación Pacacua, Peña Negra y Coris y es sobreyacida en concordancia angular por la Formación Grifo Alto (Denyer &amp; Arias, 1991).</p>	<p>-Mioceno Superior Terminal (Denyer &amp; Arias, 1991).</p>

## 5.2 Formación Grifo Alto

En el mapa geológico, corresponde con los cerros ubicados al sureste del área de estudio, incluyendo los cerros Doán que han constituido la formación del mismo nombre. Para efectos de este trabajo se describirán ambas formaciones individualmente, sin embargo, en el mapa geológico, no se realizará la distinción debido a que los límites de la Formación Doán no han sido bien definidos. Por lo tanto, las descripciones litológicas realizadas por los autores refiriéndose a la Formación Aguacate, serán descritas siguiendo la nomenclatura propuesta por Denyer & Arias (1991) como Formación Grifo Alto.

Características	Relaciones estratigráficas	Edad
<p>Conformada predominantemente aglomerados con una matriz arcillosa de dureza variable, tobas, tobas lapílicas de dureza variable y coladas de lava interestratificadas andesíticas, con un espesor de 1 a 6 m (Escalante, 1966). Por otro lado, Krushensky (1972) observa conglomerados volcánicos, brechas, flujos de lavas y en menor cantidad tobas.</p> <p>En el sitio de presa, específicamente donde está ubicada la estación acelerográfica CCCH, la roca consiste de aglomerados con ordenamiento caótico de diversos tipos de andesitas y basaltos en varios grados de meteorización, inmersos dentro de una matriz tobácea (Umaña, 1962; Escalante, 1966).</p> <p>El espesor varía entre los 200 y 400 m de acuerdo con las perforaciones realizadas por el ICE (Umaña, 1962).</p>	<p>Escalante (1966) asume un contacto inferior discordante sobre la Formación Coris y tal vez sobre la Formación San Miguel y un contacto superior discordante con Doán, Formación Ujarrás, Miembro Paraíso y Formación Cervantes, mientras Krushensky (1972), observa fuera del área un contacto inferior discordante con la Formación Pacacua.</p>	<p>-Plioceno - Pleistoceno ? (Denyer &amp; Arias, 1991).</p>

### 5.3 Formación Doán

Tanto la delimitación geográfica, como la génesis y la definición están aun en controversia, por lo que se describirá de acuerdo con los diferentes autores que han trabajado en el área de estudio.

Características	Relaciones estratigráficas	Edad	Otras
<p>Definida por Escalante (1966) al sureste del área de estudio como aglomerados de origen lahárico, con intercalaciones y lentes de tobas y flujos ignimbríticos locales. La base esta compuesta por tobas que desaparecen por intercalación y erosión dentro de los aglomerados, los cuales presentan bloques de andesitas, basalto y tobas, dentro de una matriz de toba soldada. Mientras que la cima está representada por ignimbritas localizadas en San Jerónimo (actualmente separada de esta formación).</p> <p>A diferencia de este autor, Krushensky (1972) la describe como conglomerados volcánicos y areniscas conglomeráticas volcánicas, de génesis predominantemente marina.</p> <p>Más tarde, Berrangé &amp; Whittaker (1977) la describen como toba lapílica y toba formada por ceniza de caída, ambas intercaladas con flujos de lava andesíticas a basálticas. Con una unidad superior compuesta por areniscas conglomeráticas o aglomerados de tobas, con ocasionales diques de dolerita y andesita.</p> <p>Posteriormente, Alvarado &amp; Pérez (1999) especifican que se compone de flujos de bloques y ceniza, posiblemente <i>debris avalanche</i>, así como <i>debris flow</i> (lahares) y en menor proporción de flujos de lava y diques. De acuerdo con este último estudio, se redefine esta formación como una serie de tobas bien soldadas sobreyacidas por brechas masivas y conglomerados, así como intercalaciones y lentes de toba y lapilli, todos intercalados con flujos de lavas (localidad tipo: entre Cerros Doán y Cerro Congo).</p> <p>Han sido estimados diferentes espesores, sin embargo Alvarado &amp; Pérez (1999) concluyen que se podría hablar de 800 m.</p>	<p>Escalante (1966) y Krushensky (1972) indican un contacto inferior discordante con el Grupo Aguacate (Formación Grifo Alto) y un contacto por falla con la Formación Pacacua.</p>	<p>-Plioceno superior debido a su posición estratigráfica (Alvarado &amp; Pérez, 1999).</p>	<p>Alvarado &amp; Pérez (1999) afirman que el final de la formación de Doán coincide con el levantamiento, fallamiento y vulcanismo del Grupo Aguacate. Añaden que las <i>facies</i> de <i>Debris flow</i> de la base de la formación pueden estar interdigitadas con las litofacies de la Formación Suretka. Por lo tanto puede ser correlacionable con el Miembro Mano de Tigre de la Formación Paso Real de la zona sur del país.</p> <p>Por otro lado, especifican que el término "aglomerado" utilizado por Escalante (1966), Krushensky (1972) y Berrangé &amp; Whittaker (1977) correspondería con lo que ahora se conoce como mesobrecha o mesoconglomerado volcánico.</p>

## 6. Formación Ujarrás

Características	Relaciones estratigráficas	Edad	Otras
Definida por Escalante (1966) como una serie de intercalaciones de arcillas, limos, areniscas y conglomerados de clastos métricos débilmente cementados por una matriz areno-arcillosa, ubicadas en el valle del mismo nombre. Krushensky (1972) afirma que se compone de conglomerados y de brechas locales poco consolidadas, intercaladas con areniscas y lutitas friables con cambios de <i>facies</i> abruptos en poca extensión. Posee un espesor máximo de 240 m (Escalante, 1966; Berrangé & Whittaker, 1977).	Sobreyace a la Formación Grifo Alto (Escalante, 1966, Krushensky, 1972; Berrangé & Whittaker, 1977) y se propone sobreyacida por el Miembro Paraíso de la Formación Reventado (Krushensky, 1972).	-Pleistoceno (Escalante, 1966).	El origen de esta unidad fue propuesto por Escalante (1966) como producto de un represamiento originado por una depresión volcano-tectónica, mientras Krushensky (1972) propone que es producto de coladas de lava antiguas del volcán Irazú o Turrialba que represaron las aguas del actual río Reventazón, produciendo la depositación de esta formación.

## 7. Unidades del volcán Irazú

Krushensky (1972) define el Grupo Irazú como una serie de rocas volcánicas producto de la actividad del volcán Irazú, que van desde el Pleistoceno tardío hasta la actualidad. Este autor divide este grupo en orden cronológico en las formaciones Reventado, Sapper, Birrís y Cervantes.

Alvarado (1993) en su tesis de Doctorado propone las siguientes unidades vulcanológicas en orden estratigráfico: Unidad Ignimbrita, Unidad Reventado, Unidad De la Haya, Unidad Cerro Alto Grande, Unidad Sapper, Unidad Birrís, Colada de Cervantes, Unidad González, Unidad Dóndoli, Unidad Tristán, Unidad Alfaro y Depósitos recientes. Posteriormente, Pavanelli et al. (2004) realizan un estudio geológico en la faldas sur-sureste del volcán Irazú definiendo como unidades estratigráficas: Unidad indiferenciada, Unidad Cot, Unidad *Debris Avalanche* de Birrís, Unidad de flujos de lava de Cervantes, Unidad de ceniza de caída Laguna, Unidad de *Debris Avalanche* de Reventado y productos recientes.

Recientemente, Alvarado et al. (2006) proponen un nuevo orden estratigráfico para las unidades vulcanológicas del volcán Irazú, definiendo las siguientes: Unidad San Jerónimo, Unidad Paraíso y Pico de Piedra, Unidad Reventado, Unidad De la Haya, Unidad Sapper, Unidad Cervantes, Unidad González, Unidad Dóndoli, Unidad Tristán, Unidad Alfaro y Depósitos recientes.

Para efectos de este trabajo se utilizarán los nombres de las formaciones geológicas establecidas en el trabajo de Krushensky (1972) debido a que en los trabajos posteriores, la separación de unidades obedece a características vulcanológicas. Sin embargo se añadirán algunas unidades establecidas por Alvarado et al. (2006) debido al grado de actualización de la información en el área. Así mismo, se describirán solamente las unidades aflorantes en el área de estudio.

## 7.1 Toba San Jerónimo

Características y relaciones estratigráficas	Edad
<p>Fue descrita por primera vez por Escalante (1966) como una ignimbrita rica en feldespatos y biotita, sin embargo este autor la incluye dentro de la Formación Doán. Posteriormente Krushensky (1972) la describe como un flujo ignimbrítico riodacítico de 25 m de espesor, bien soldado, con abundantes fragmentos de pómez en la cima. Este autor denomina esta unidad como toba de flujo de ceniza de San Jerónimo y la separa de la Formación Doán debido a sus notables diferencias litológicas y porque no concuerda con el origen que este autor había establecido para la formación. Añade que sobreyace discordantemente a la Formación Doán. Sin embargo, Berrangé &amp; Whittaker (1977) afirman que posee tanto contacto inferior como superior con la Formación Doán y por lo tanto no debe ser separado de la misma.</p> <p>Alvarado (1993) incluye esta unidad dentro de una unidad llamada Unidad de Ignimbritas, dentro de la cual incluye también las ignimbritas ubicadas en el cañón del río Aguacaliente (descritas por Krushensky (1972)) y el río Conejo.</p> <p>Posteriormente, Alvarado et al. (2006) proponen a la Unidad San Jerónimo como la primer unidad perteneciente a los eventos recientes del volcán Irazú.</p>	-854 000 años, obtenida mediante el método de <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar (Alvarado et al., 2006).

## 7.2 Formación Reventado

Se refiere a las rocas volcánicas de finales del Pleistoceno, que han sido divididas cronológicamente en Miembro Paraíso, Miembro Cama de ceniza y Miembro Superior y cuya localidad tipo se encuentra en el cañón del río Reventado (Krushensky, 1972). Esta formación aflora al noreste de la hoja topográfica Istarú, así como al noreste de la hoja topográfica Tapantí. Se utilizará la nomenclatura de Krushensky (1972) porque a pesar de ser las más antigua ha sido la más ampliamente utilizada como referencia en el área. Además, debido a que en los trabajos posteriores los nombre utilizados son diferentes con cada autor y/o su división responde a características vulcanológicas.

### 7.2.1 Miembro Paraíso

Características	Relaciones estratigráficas	Edad	Otras
<p>Conformado por flujos de lava andesítica y por flujos laháricos intercalados en menor proporción. La localidad tipo se observa en la catarata Los Novios al sureste de la ciudad de Paraíso (Krushensky, 1972).</p> <p>Berrangé &amp; Whittaker (1977) afirman que en la hoja topográfica Istarú se observan dos flujos que se depositaron en la depresión volcano- tectónica del Valle de Ujarrás.</p> <p>Escalante (1966) le asigna un espesor de 150 m (escarpe del norte del valle de Ujarrás).</p>	<p>Se encuentra sobreyaciendo discordantemente a la Formación Ujarrás y al Grupo Aguacate, concordantemente al flujo de ceniza del río Aguacaliente (Krushensky, 1972) (incluido por Alvarado et al. (2006) en Toba San Jerónimo). Sobreyace incorformablemente a la Formación Pacacua (Berrangé &amp; Whittaker, 1977) y es sobreyacida concordantemente por el Miembro Cama de Ceniza (Escalante, 1966; Krushensky, 1972).</p>	<p>-Pleistoceno (Escalante, 1966). -594 ± 16 ka (Alvarado et al., 2006).</p>	<p>Alvarado et al. (2006) mencionan este Miembro como Unidad Paraíso y Pico de Piedra. Sin embargo, ellos ubican el área de afloramiento como una plataforma extensa donde se asienta la ciudad de Paraíso, zona en la cual Krushensky (1972) propone el Miembro Cama de Ceniza y no Paraíso. Estas inconsistencias pueden deberse a que Alvarado et al. (2006) describieron la roca que constituye la plataforma sobre la cual está asentada dicha ciudad, bajo la delgada capa de ceniza del Miembro cama de ceniza, observada por Krushensky (1972).</p>

### 7.2.2 Miembro Cama de Ceniza

Características	Relaciones estratigráficas
Está constituido por una capa de ceniza fina de tonos café rojizos altamente meteorizada, de 15 m de espesor (Krushensky, 1972).	Se infiere que se encuentra bajo la colada de Cervantes (Krushensky, 1972) y sobreyace al Miembro Paraiso.

### 7.2.3 Miembro Superior

Existen incongruencias en los mapas de diferentes autores al representar esta unidad, ya que posterior a Krushensky (1972) los nuevos mapas utilizan diferente nomenclatura al referirse a las rocas ubicadas en donde Krushensky (1972) mapeo este Miembro. Pavanelli et al. (2004) le otorga el nombre de Formación Cot, compuesta por *debris flow* con paleosuelos intercalados. Alvarado et al. (2006) la denominan Unidad Reventado y Unidad Sapper, no separadas probablemente por la escala del trabajo. Mencionan que se compone de flujos de lava, intercalados con depósitos epiclásticos y de tefras, datados en  $136 \pm 5$  ka utilizando  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Mientras Quintanilla et al. (2008) utiliza el nombre de “lahares antiguos” que correlaciona con la “Formación Cot” de Pavanelli et al. (2004). Por lo tanto al compilar la geología del área en el mapa y al efectuar las interpretaciones en los perfiles, se efectuaron las correlaciones respectivas utilizando el nombre de Miembro Superior, entendiéndose como conformado principalmente por lahares.

Características	Relaciones estratigráficas	Edad	Otras
<p>Corresponde con capas de ceniza superficiales, flujos de lahares, así como flujos de lava (Krushensky, 1972).</p> <p>Según este autor, los flujos de lava tienen espesores de decenas de metros, presentan fracturas columnares. Los lahares poseen espesores métricos, son suaves y fácilmente erosionables. Presentan bloques de subredondeados a angulares, con tamaños que van desde milimétricos a métricos, dentro de una matriz arcillosa. Comúnmente se presentan lentes de arcillas verdosas parecidas a la bentonita, que muestran propiedades de alta plasticidad cuando están humedecidas.</p> <p>Las capas de ceniza varían de espesores métricos de acuerdo con su posición respecto a la fuente, presentando espesores mayores en los flancos noroeste y norte, y menores hacia el oeste, sur y este. Esto debido a la dirección del viento durante las erupciones. El espesor total se estima en 600 m (Krushensky, 1972).</p> <p>Pavanelli et al. (2004) menciona que consiste de un <i>debris flow</i>, con paleosuelo intercalados.</p>	Sobreyacido disconformemente por la Formación Sapper (Krushensky, 1972).	-110 000 años, utilizando el método radiométrico de U/Th (Allegre & Condominnes, 1976).	Correlacionable con el <i>debris avalanche</i> de Cot (Pavanelli et al., 2004) y con los denominados lahares antiguos del trabajo de Quintanilla et al. (2008).

### 7.3 Formación Cervantes

Características	Relaciones estratigráficas	Edad	Otras
<p>Está representada por coladas de basalto-andesitas (Escalante, 1966; Berrangé &amp; Whittaker, 1977). Geomorfológicamente, presenta bloques escoriáceos remanentes que representan la superficie original de los anteriores flujos, con una formación de suelo mínima (Krushensky, 1972; Berrangé &amp; Whittaker, 1977).</p> <p>Alvarado (1993) divide esta formación en dos unidades de acuerdo con su contenido de sílice. La unidad del oeste se compone de flujos basálticos, mientras que la del este, está compuesta por basalto-andesitas.</p> <p>El espesor varía desde 25 m hasta 220 m según Krushensky (1972), mientras Escalante (1966) afirma que en las vecindades de Santiago (al sureste) el espesor es de 200 m y presenta forma tabular.</p>	<p>Esta formación sobreyace discordantemente al Grupo Aguacate, la Formación Ujarrás y el Miembro Paraíso (Escalante, 1966; Berrangé &amp; Whittaker, 1977).</p>	<p>-13 800 ± 300 años, con el método de C14 (Murata et al., 1966).</p> <p>-23 000 años determinada mediante <sup>238</sup>U-<sup>230</sup>Th (Allegre &amp; Condomines, 1976).</p>	<p>El origen de las coladas de lava de Cervantes se produce a través de conos parásitos alineados norte-sur, ubicados en el flanco sur del volcán Irazú (Berrangé &amp; Whittaker, 1977), específicamente en el flanco sur del cerro Pasquí (Escalante, 1966).</p>

### 7.4 Unidades Volcánicas posteriores

Dichas unidades fueron mencionadas por primera vez en el trabajo de Alvarado (1993) y posteriormente en Alvarado et al. (2006). Siguiendo el orden estratigráfico serían las siguientes: Unidad González, Unidad Dóndoli, Unidad Tristán y Unidad Alfaro. Todas estas unidades afloran fuera del área de estudio, en los alrededores de los cráteres principales del volcán y corresponden con piroclastos y aglomerados en menor proporción.

### 7.5 Depósitos históricos

#### 7.5.1 Depósitos Lacustres del Valle de Coris.

Descritos por Krushensky (1972) como capas de arena cuarzosa, limos y arcillas, finamente estratificadas y horizontales, correspondientes a una zona pantanosa. De acuerdo con Montero et al. (1991) los suelos derivados de estos depósitos poseen una edad de 3665 ± 145 años a.P. al menos en las capas superiores de los mismos.

#### 7.5.2 Depósitos Lacustres del Valle de Cachí.

Krushensky (1972) los describe como depósitos fluvio lacustres, compuestos por gravas, arenas y limos inconsolidados.

### 7.5.2 Debris Avalanche Reventado

Pavanelli et al. (2004) describen depósitos de *debris avalanche* asociados a la cuenca del río Reventado. Los cuales consisten de bloques subangulares de lava y lapilli soportados por una matriz areno-limosa hasta arcillosa alterada hidrotermalmente. Dichos autores dividieron este depósito en tres flujos, el principal se extiende a través de la ciudad de Cartago, los otros dos se extienden, uno hacia Tres Ríos y el otro se desvía al llegar a los cerros de la Carpintera y se depositan en la ciudad de Cartago. Estos depósitos son sobreyacidos solamente por los depósitos más recientes del volcán Irazú, como los lahares de 1963-1967. La edad fue determinada por C14 en  $5930 \pm 100$  años b. P.

### 7.5.3 Flujos volcánicoclasticos antiguos

Descritos por Alvarado (1993), reportados en la siguiente tabla.

Fecha	Origen	Daños y víctimas
1723, 27 Febrero	Erupción freatomagmática	Ninguno
1724	Erupción o eventos post-erupción	Una casa
1861, Octubre	Tormentas durante 5 días	Destructivo
1891, 27 Octubre	Lluvias intensas durante 5 días	140 casas, puentes y caminos. Alrededor de 10 víctimas
1928, 23 Noviembre	Fuertes lluvias	Algunas casas, puentes y caminos
1951, 11 Octubre	Fuertes lluvias	Destructivo
1963, 9 Diciembre	17 horas de lluvias, actividad volcánica asociada	300 casas, caminos, puentes, industria. Alrededor de 20 víctimas

Tabla 2: Depósitos antiguos del volcán Irazú.

### 7.5.4 Lahares 1963-1965

Los lahares de Taras de Cartago fueron depositados a lo largo de la última erupción importante del volcán Irazú. Donde se unieron depósitos de productos volcánicos inconsolidados con intensas lluvias que ocasionaron dichos lahares (Alvarado, 1993).

Los mismos están constituidos por fragmentos de basalto y basalto-andesita, centimétricos a métricos, sanos y alterados hidrotermalmente, dentro de una matriz principalmente arenosa, formada por fragmentos líticos no juveniles, cristales, ceniza juvenil fresca y alterada, y en menor proporción materia orgánica y productos antropogénicos como cables, etc. El espesor de estos depósitos va desde los 2.5 a los 4.5 m (Alvarado, 1993).

## ESTRUCTURAS NEOTECTÓNICAS

Esta área posee una neotectónica activa, ya que forma parte del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, definido por Marshall (2000) como un sistema de fallas reciente, difuso y ancho, transversal a la región central del país y caracterizado por presentar una serie de fallas inversas de rumbo oeste-noroeste, dextrales de rumbo noroeste y sinestrales de rumbo noreste.

Específicamente en el área de estudio se presenta el sistema de fallas Aguacaliente, la falla Orosi y la falla Navarro, siendo el primero el predominante (Fig 1).

### Sistema de fallas Aguacaliente

Dentro de este sistema se presentan una serie de fallas y alineamientos de rumbo predominante NE-SW y un movimiento sinistral con componentes tanto tensionales como compresivas, de acuerdo con

los estudios que se han realizado en la zona (Fernández & Montero, 2002; Montero et al., 1991; Montero & Kruse, 2006).

### ***Falla Aguacaliente***

Descrita como una falla activa desde el trabajo de Dóndoli & Torres (1954), desde entonces ha sido estudiada y descrita por diversos autores, los cuales han propuesto diferentes trazas. Sin embargo, en este trabajo se utilizarán las trazas propuestas por Montero et al. (1991) y Montero & Kruse (2006).

Definida como una falla de traza sinuosa, de rumbo variable entre el NW, EW y WNW, de movimiento predominantemente sinistral y con zonas transtensivas y transpresivas a lo largo de su recorrido (Fernández & Montero, 2002).

Se caracteriza por presentar levantamiento de terrazas no pareadas al NE del río Aguacaliente, el basculamiento hacia el NE de las lavas del Miembro Paraíso (Salazar et al., 1992), alineamiento de promontorios truncados, valles lineales, ríos desplazados y adaptados, alineamiento de fuentes termales y mineralizaciones sulfurosas, entre otras. Montero & Kruse (2006) proponen una segunda traza ubicada al sur de los cerros de la Carpintera, de rumbo oeste-suroeste, lineal, con facetamiento al sur, así como alineamientos cortos de rumbo NE, con valles lineales, facetamiento triangular y sillas de falla.

### ***Falla Orosi***

Esta falla se localiza en el conocido valle del mismo nombre, posee rumbo NW y está asociada a un movimiento normal (Fernández & Montero, 2002). Está caracterizado por el alineamiento de espolones truncados, alineamiento de fuentes termales, presencia de silla de falla y valle lineal (Montero et al., 1991) y forma una zona de falla que llega a alcanzar más de 1km de ancho (Salazar et al., 1992) . Posee una longitud de alrededor 16 km y un patrón anostomosado (Montero et al., 1991).

### ***Sistema de Fallas Navarro***

Se extienden desde el sur oeste de Navarro hasta el noreste de Turrialba. Este sistema tiene rumbo NW- SE, compuesto por fallas de desplazamiento de rumbo sinistral ampliamente descritas en el trabajo de Linkimer (2003).

### ***Falla Navarro***

Este falla es la de mayor extensión de todo el sistema. En el área de estudio está ubicada al sur del poblado de Navarro y se extiende hacia el noreste a través del valle del mismo nombre hasta fuera del área de estudio. Tiene rumbo ENE (Fernández & Montero, 2002), con movimiento normal y desplazamiento de rumbo lateral izquierdo, cuya componente normal está representada por facetas triangulares y la de rumbo por cerros aislados, así como por el desplazamiento del contacto entre las formaciones Pacagua y San Miguel (Salazar et al., 1992). De acuerdo con Linkimer (2003) también se reconocen sillas de falla, trincheras de falla, quiebres de ladera, escarpes locales y una pequeña cuenca de tracción cerca de la confluencia de los ríos Navarro y Grande de Orosi.

### ***Falla Santiago***

De rumbo noreste ubicada al suroeste de Santiago, posee corta extensión y es de desplazamiento de rumbo sinistral (Linkimer, 2003).



## GEOLÓGIA DE POZOS

Se elaboraron un total de 7 perfiles a lo largo del centro de la ciudad de Cartago y alrededores (Fig. 2).

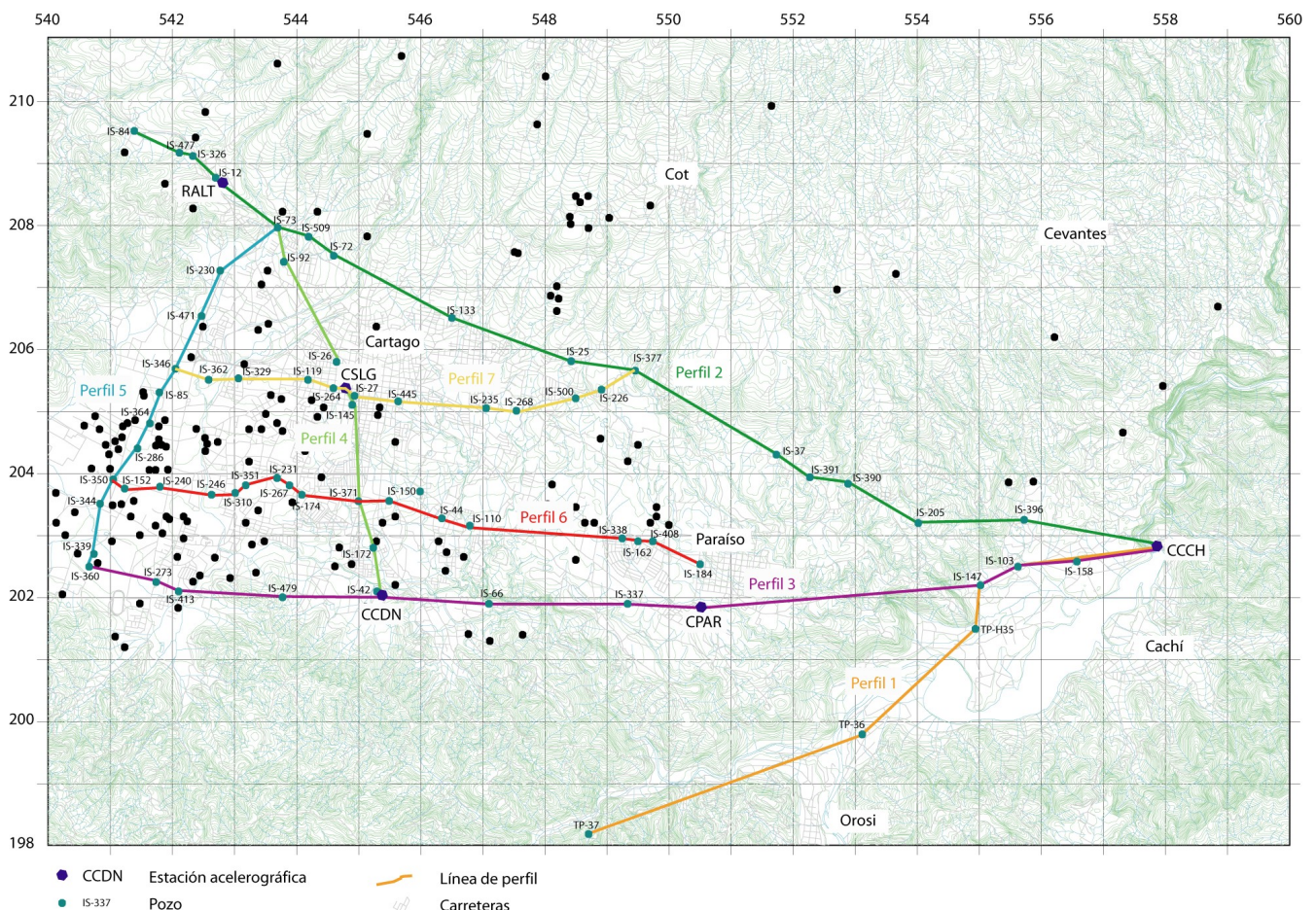


Figura 2: Mapa de ubicación de los perfiles.

Para la elaboración de estos perfiles se han revisado y correlacionado los pozos cercanos a la traza de los mismos. Los contactos y los espesores establecidos entre las unidades geológicas están basados en las descripciones realizadas en los trabajos anteriores, descritas en el apartado anterior.

Las descripciones litológicas de los pozos ha sido asociadas a las diferentes unidades geológicas que han sido mapeadas en el área, resumidas en el apartado anterior, con el fin de unificar y correlacionar toda la información. La mayoría de las descripciones de pozos coinciden con la geología superficial, sin embargo existen algunas excepciones, en las cuales predominó el criterio de la geología superficial, debido a que en la mayoría de los casos, este estudio ha sido elaborado con más detalle, mientras las descripciones de los pozos, son en algunas ocasiones, muy generales y contradictorias. Por ejemplo, en los pozos que expresan la presencia de "lahares", "arcillas", "aluviones", "bloques dentro de materia arcillosa" que se presentan en sectores donde otros autores han mapeado lahares o *debris avalanche* del volcán Irazú, se han asociado a estas últimas litologías, debido a que en las muestras de pozos y dependiendo del grado de meteorización de una roca, es difícil diferenciar entre un lahar, un aluvión y ciertas *facies* de un *debris avalanche*, por lo que en este caso predomina el criterio de la geología superficial.

### **Perfil 1**

Este perfil se extiende desde el oeste del poblado de Orosi hasta la estación acelerográfica CCCH al NE. Al oeste se presentan formaciones sedimentarias del Mioceno- Plioceno (Fig. 3), de acuerdo con los mapas geológicos de los trabajos anteriores. Mientras que hacia el este se presenta una pequeña cuenca rellena de sedimentos recientes de hasta 60 m de espesor máximo en algunos sectores del perfil.

Dentro de esta cuenca se está suponiendo que probablemente en algunos sectores en profundidad sea posible encontrar la Formación Ujarrás sobreyaciendo al Grupo Aguacate.

Acercándose a la estación CCCH se encuentran en profundidad lavas que han sido correlacionadas con las lavas del Miembro Paraíso de la Formación Reventado y con las de la Formación Cervantes debido a su posición con respecto al mapa geológico. Por otro lado, la estación CCCH, se ubica sobre aglomerados del Grupo Aguacate (Escalante, 1966), que representan roca fuerte, que no permite amplificaciones sísmicas importantes.

En general la profundidad de la roca firme a lo largo del perfil, varía desde superficial hasta mayor de 80 m en el sector central, de acuerdo con la información de pozos. Lamentablemente a lo largo del mismo no se cuenta con una mayor densidad de pozos que permita mejorar y comprobar la interpretación en algunos sectores.

### **Perfil 2**

Se extiende desde Ochoyomo al NW hasta la estación CCCH. En los cerros de Ochoyomo se encuentran las litologías más antiguas, la Formación Coris y Grupo Aguacate, cubiertas por depósitos de lahares y arcillas que han sido correlacionados con el *debris avalanche* de Reventado y por último arcillas y aluviones que se correlacionan con secuencias sedimentarias fluviales recientes de poco espesor, 20 m máximo (Fig. 4). En este sector Aguacate está conformado por lahares y un lente de lava métrico, de acuerdo con la descripción de los pozos.

La estación acelerográfica RALT se encuentra sobre depósitos fluviales recientes de poco espesor y estos a su vez, sobre 20 m de "lahares" de acuerdo con la descripción de pozos cercanos, los cuales son correlacionados con los depósitos del *debris avalanche* de Reventado. Bajo estas capas se encuentran una serie de lahares y un lente de lava intercalado a 30 m de profundidad (10 m espesor) asociados al Grupo Aguacate y subyaciendo se encuentran las areniscas de la Formación Coris a 70 m de profundidad.

Hacia el SE se presentan como basamento lavas correlacionadas con el Miembro Paraíso, a una profundidad máxima en la parte central de 90 m y 20 m de profundidad media. Sobreyaciendo estas lavas se encuentra una secuencia de arcillas y lahares correlacionados con los Miembros Cama de Ceniza y Superior.

En el límite SE del perfil se presenta el Grupo Aguacate y la colada de lava de Cervantes, cubiertas en algunos sectores por depósitos fluviales recientes de espesores métricos.

### **Perfil 3**

Va desde la estación CCCH al E hasta los alrededores del Tejar al W. En este último sector se presentan una serie de intercalaciones de arcillas y aluviones, que se correlacionan con los depósitos lacustres del Valle de Coris (Fig. 5). Hacia el este, de acuerdo con la descripción de pozos, se presentan una serie de "aluviones" y "arcillas", que en este caso son correlacionadas con los lahares

del Miembro Superior de la Formación Reventado, obedeciendo a las descripciones realizadas a su vez por otros autores en esta zona y tomando en cuenta que, dependiendo de las condiciones de meteorización, o conocimiento técnico, puede haber confusión al diferenciar un aluvión de un lahar o un *debris avalanche*.

Conforme avanzamos hacia el E se encuentran rocas de la Formación Coris, sobre las cuales se depositan los lahares del Miembro Superior de la Formación Reventado. El espesor de estos lahares bajo la estación CCDN es de 20 m aproximadamente, de acuerdo a la correlación de pozos cercanos al perfil.

Bajo la estación CPAR se presentan lavas correlacionadas con el Miembro Paraíso, sobre las cuales se presentan arcillas con un espesor medio de 15 m (con base en pozos cercanos y datos de espesor dados por diferentes autores).

En el sector del Valle de Ujarrás, se describen lavas correlacionables con las lavas de la colada de Cervantes, sobreyacidas por sedimentos lacustres y fluviales actuales, con menos de 10 m de espesor.

#### **Perfil 4**

Este perfil se extiende de NW a SE pasando por el centro de la ciudad de Cartago, incluye a las estaciones RALT, CSLG y CCDN. Al norte, la secuencia está dominada por lahares, tanto del Grupo Aguacate, como los correlacionados con el *Debris avalanche* de Reventado (Fig. 6).

Bajo la ciudad de Cartago se presenta una secuencia lahárica, relacionada con el *Debris avalanche* de Reventado en la parte superior y con el Miembro Superior de la Formación Reventado en la parte inferior. El espesor de esta secuencia lahárica es de 70 m en promedio y presentan intercalaciones de lentes de arcillas métricas. Bajo estas capas se presentan las lavas del Miembro Paraíso a unos 70 m de profundidad media.

Cerca de la estación CDDN se presentan según las descripciones de pozos, tobas y bloques de lavas dentro de una matriz arcillosa, por lo cual son correlacionados con los lahares del Miembro Superior de la Formación Reventado y bajo estos se infiere la presencia de las lavas del Miembro Paraíso a una profundidad mínima de 70 m.

#### **Perfil 5**

Se ubica al oeste de la ciudad de Cartago y corta el Valle de Coris de norte a sur. Al norte del perfil puede apreciarse la presencia de areniscas de la Formación Coris, las cuales desaparecen del registro de pozos hacia el sur y en cambio aparecen lavas a una profundidad promedio de 60 m, sobreyacidas por limos, arcillas, arenas y aluviones correlacionables con los sedimentos lacustres y fluviales del Valle de Coris (Fig. 7).

Al sur de las trazas de las fallas propuestas por Montero & Kruse (2006) el espesor de los sedimentos recientes aumenta y no se registra otro tipo de roca en profundidad, se infiere que el basamento en este sector podrían ser las lavas de Paraíso, sin embargo al sur la segunda traza se presentan las areniscas asociadas a la Formación Coris a 60 m de profundidad, por lo que podría ser cualquiera de estas litologías o ambas.

## Perfil 6

Se extiende de este a oeste, al sur del centro de la ciudad de Cartago. Al este se ubica la ciudad de Paraíso, la cual está asentada sobre casi 10 m de arcillas, correlacionadas con el Miembro Cama de ceniza, bajo el cual se presentan lahares y a 40 m de profundidad promedio se describen unas ignimbritas que podrían corresponder con las ignimbritas de San Jerónimo (Fig. 8).

Al oeste de la ciudad, se presentan bajo las arcillas lavas con diferentes niveles arcillosos métricos. Estas diferencias litológicas en sectores tan cercanos, apuntan a la existencia de una falla que no ha sido descrita en superficie por ningún autor. Sin embargo en el trabajo de Montero & Kruse (2006) se ha propuesto una traza relativamente cercana hacia el NW, con la cual podría relacionarse.

Hacia el oeste se presentan lahares con lentes arcillosos, así como arcillas y aluviones correlacionados con los lahares y aluviones históricos que han afectado la ciudad de Cartago. Mientras al oeste se presentan las arenas, arcillas y aluviones correlacionados con los depósitos lacustres y fluviales del Valle de Coris.

En general, el basamento rocoso corresponde con lavas que se presentan a una profundidad máxima de 40 m en el sector oeste del perfil y disminuyen su profundidad hacia el sector central y este del perfil.

## Perfil 7

Este perfil tiene rumbo EW pasando por el centro de la ciudad de Cartago. Al este se observan arcillas y lahares con un espesor medio de mayor a 40 m, que sobreyacen lavas correlacionadas con el Miembro Paraíso de la Formación Reventado, que pueden llegar a tener más de 90 m de espesor (IS-500) (Fig. 9).

Hacia el oeste, no hay evidencias de la presencia de lavas, en cambio se presentan una serie de arcillas y arenas de espesores que podrían superar los 20 m y que son correlacionados con los depósitos lacustres y fluviales del Valle de Coris, así como “lahares” correlacionados con el *Debris Avalanche* de Reventado. El contacto entre estos depósitos y los lahares ubicados al este se infiere interdigitado, debido a que la edad establecida para cada uno de los depósitos es similar.

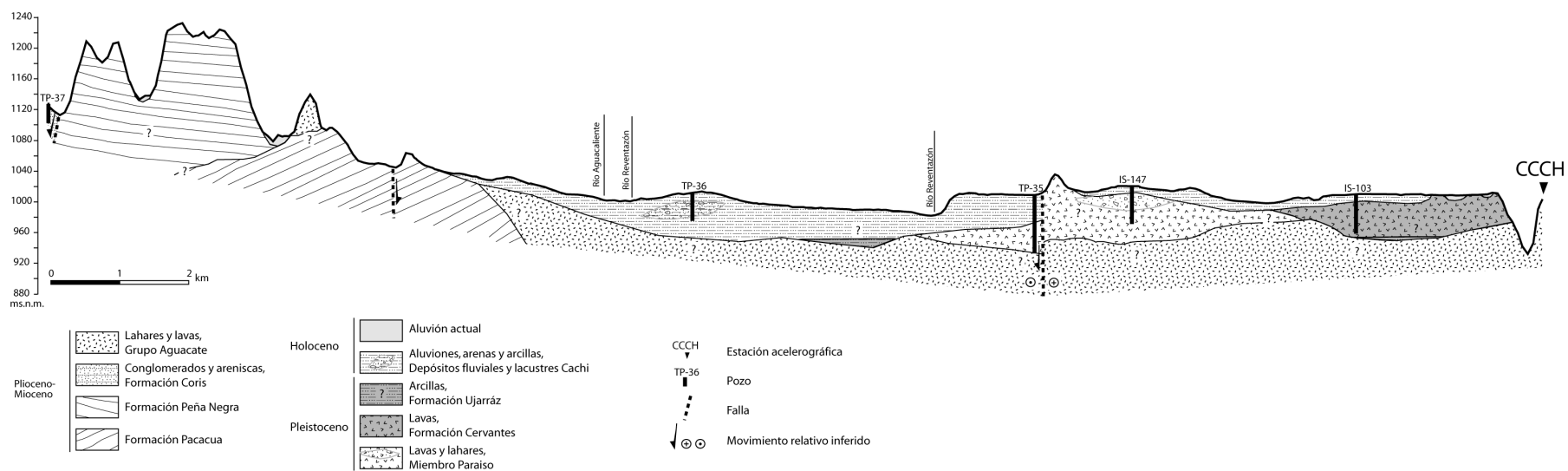


Figura 3: Perfil 1, rumbo W-E. Las fallas son derivadas de Berrangé & Whittaker (1977) y Salazar et al. (1991).

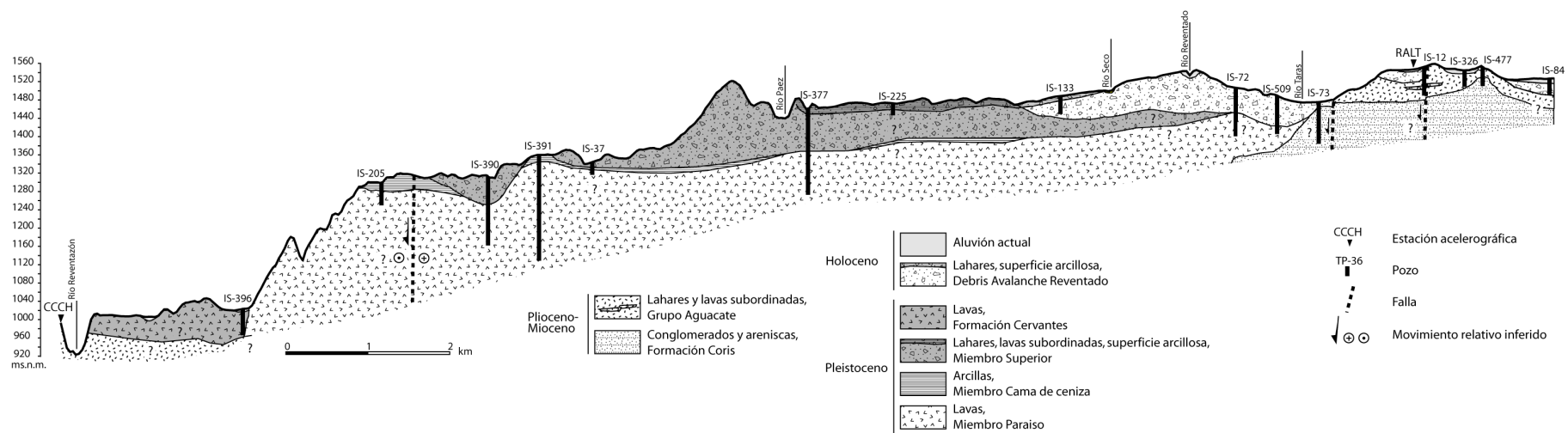


Figura 4: Perfil 2, rumbo SE-NW. Las fallas son derivadas de Montero et al. (1991) y Denyer et al. (2003).



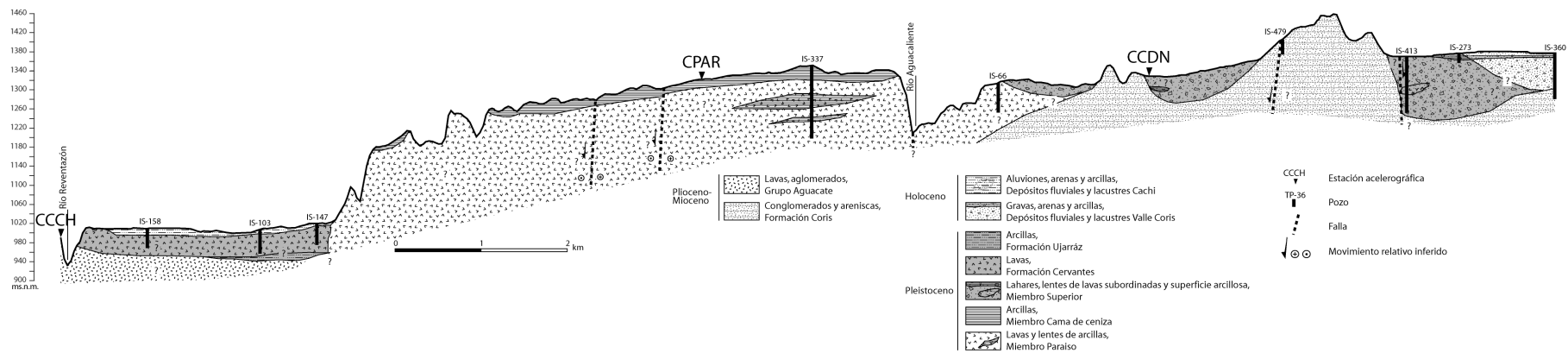


Figura 5: Perfil 3, rumbo E-W. Las fallas son tomadas de Badilla et al. (1999), Denyer et al. (2003) y modificación de Montero & Kruse (2006).

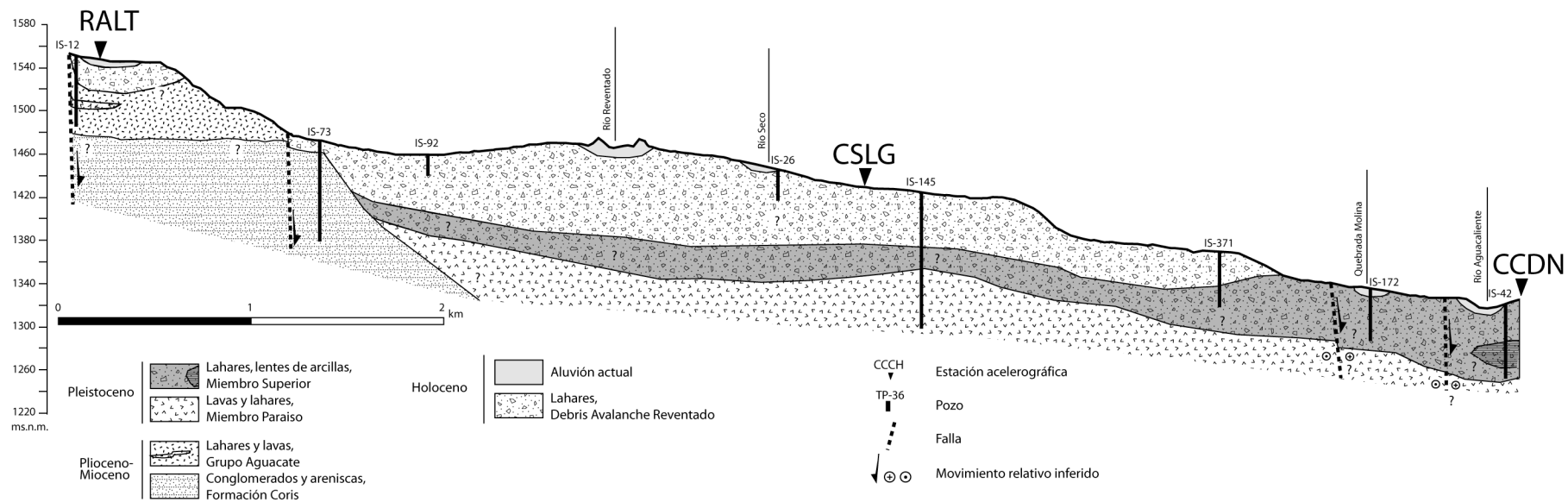


Figura 6: Perfil 4, rumbo NW-SE. Las fallas son tomadas de Montero et al. (1991) y Montero & Kruse (2006).

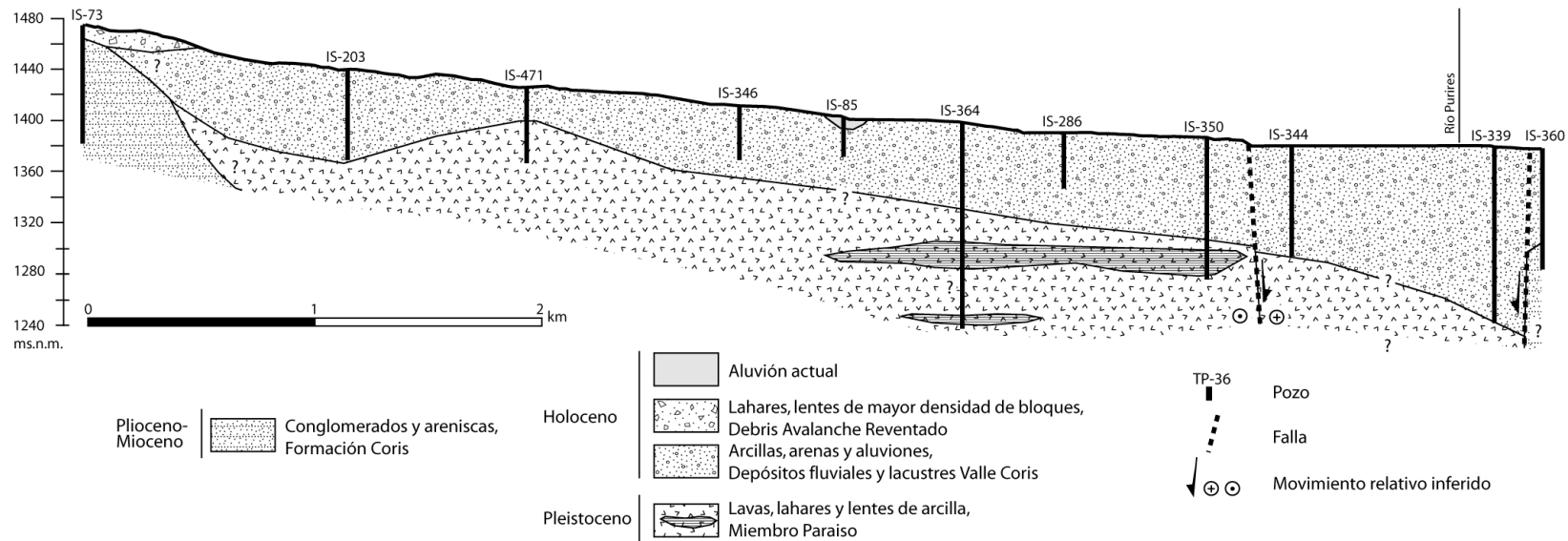


Figura 7: Perfil 5, rumbo NE-SW. La falla a la izquierda es tomada del trabajo de Montero & Kruse (2006), mientras la de la derecha es propuesta en este trabajo.

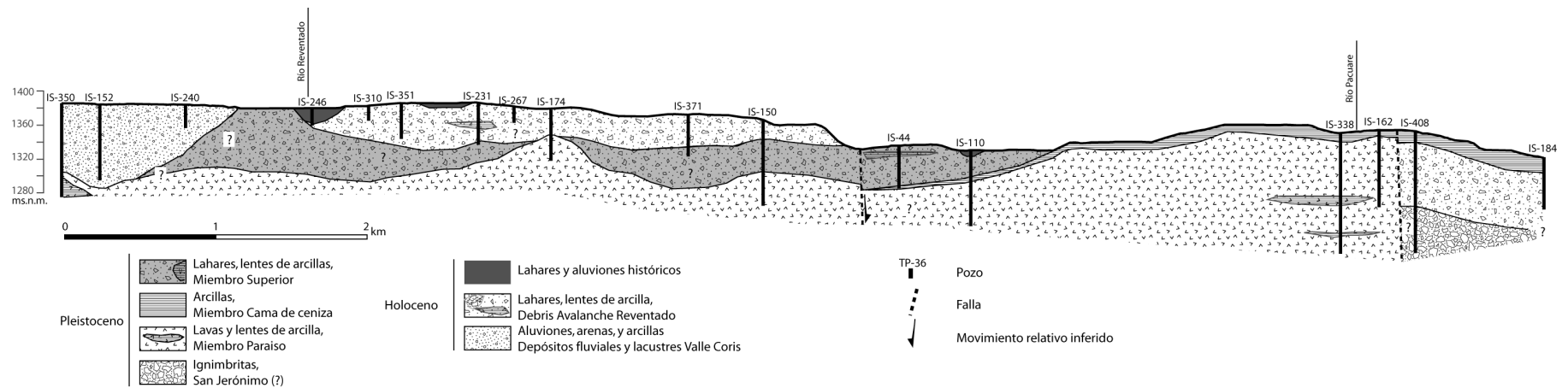


Figura 8: Perfil 6, rumbo W-E. La falla de la izquierda es tomada del trabajo de de Montero & Kruse (2006), mientras la de la derecha es propuesta en este trabajo.

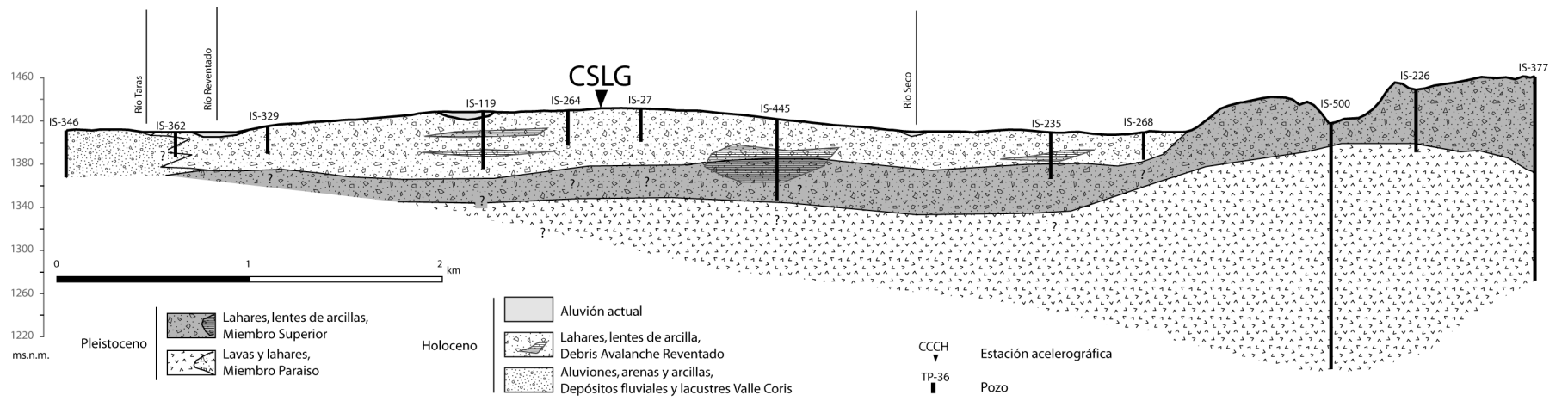


Figura 9: Perfil 7, rumbo W-E.



## PROPUESTA DE SITIOS IDÓNEOS

Para la propuesta de sitios idóneos de colocación de acelerógrafos se tomaron en cuenta los sectores donde se ubican las rocas más resistentes, como por ejemplo lavas (Fig. 10). Esto debido a que los sismos van a tener una mejor señal sísmica en roca que en los sitios de suelo blando donde la señal va a llegar amplificada.

Por esta razón y tomando en cuenta que es un pueblo cercano al centro de la Ciudad de Cartago se propone Cervantes como la localidad idónea para poner un acelerógrafo en roca, el cual puede utilizarse para comparar y estudiar la amplificación sísmica en la ciudad de Cartago y Paraíso, entre otros.

Por otro lado, para estudios de amplificación se propone colocar un nuevo acelerógrafo en el poblado de Cot debido a que se ubica sobre lo que algunos autores denominan *debris flow* de Cot (Pavanelli et al. 2004) y otros lahares, con lentes de arcilla de alta plasticidad, con un espesor total de 600 m según Krushensky (1972).

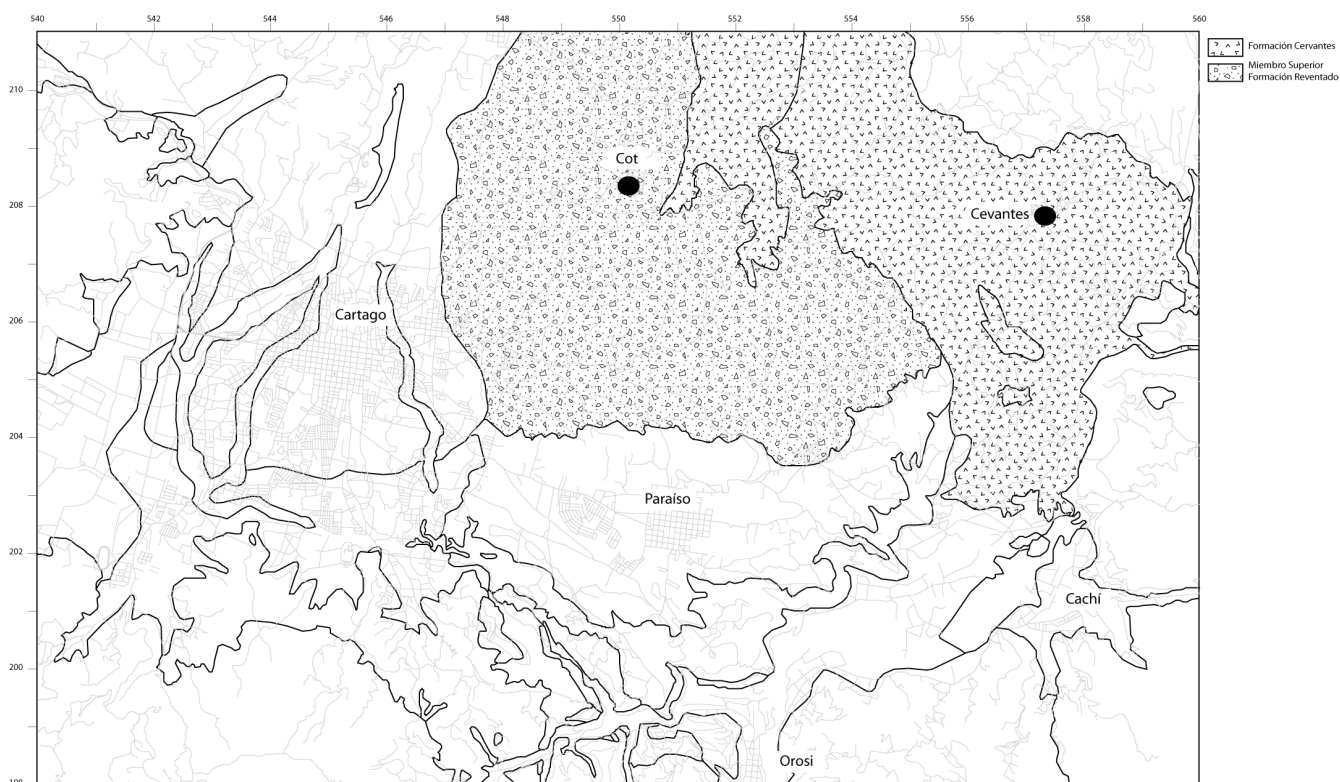


Figura 10: Mapa propuesta de ubicación de nuevas estaciones acelerográficas.

## CONCLUSIONES

Tanto en los perfiles como en la geología superficial, se aprecia que al sur de Cartago predominan rocas sedimentarias y volcánicas del Mioceno al Pleistoceno con diferentes grados de meteorización, mientras que bajo la ciudad de Cartago, Paraíso y sectores aledaños, predominan depósitos sedimentarios y volcánicos Pleistocénicos a Holocénicos, que han propiciado una estratigrafía compleja, sobre todo bajo el centro de la ciudad de Cartago. Como puede apreciarse en los perfiles 4, 6 y 7 la cubierta de material vulcanoclástico es en promedio de 40 m. Este material superficial, según

las descripciones de los diferentes autores está conformado por bloques que van desde el lapilli hasta bloques métricos, dentro de una matriz areno-limosa y arcillosa, localmente alterada hidrotermalmente, así como por niveles de paleosuelos. En su mayoría son depósitos inconsolidados como el *Debris Avalanche* de Reventado o poco consolidados como las unidades inferiores. Localmente, bajo la ciudad de Paraíso se presentan niveles arcillosos métricos y niveles laháricos, que en conjunto tienen 40 m de espesor.

Todas las estaciones acelerográficas, con excepción de la CCCH, se encuentran sobre materiales heterogéneos, poco consolidados y/o arcillosos, que van desde los 10 m hasta los 40 m de espesor.

Toda esta secuencia del centro y alrededores de Cartago, sobreyace a lavas que han sido correlacionadas con el Miembro Paraíso y también a ignimbritas correlacionadas con las ignimbritas San Jerónimo, sin embargo, en algunos sectores las lavas poseen niveles métricos de arcillas que pueden propiciar amplificación sísmica.

Dichas características litológicas favorecen la amplificación sísmica debido a su baja consolidación y materiales heterogéneos dentro de una matriz generalmente arcillosa.

Se recomienda hacer estudios integrales de detalle, que tomen en cuenta las características litológicas y las estructuras neotectónicas para poder caracterizar claramente las litologías de esta área, comprender la estratigrafía y la respectiva evolución geológica. Así como permitan establecer con un error más bajo, los lugares que efectivamente pueden sufrir amplificación sísmica importante o se encuentran en mayor riesgo por la existencia de una falla potencialmente activa.

## REFERENCIAS

- ALLEGRE, C. & CONDOMINES, M.**, 1976: Fine chronology of volcanic process using  $^{238}\text{U}$ -  $^{230}\text{Th}$  systematics. Earth Planet Sci Lett. 28: 395-406.
- ALVARADO, G. E.**, 1993: Volcanology and Petrology of Irazú Volcano, Costa Rica. -261 pág. Univ. Kiel, Alemania [Tesis Ph. D.].
- ALVARADO, G. E. & PÉREZ, W.**, 1999: The Doán formation (Pliocene) of Costa Rica: An overview on its description, origin, lateral equivalents, and further implications on the closing of the Central America seaway. - Sixth International Congress on Pacific Neogene Stratigraphy and IGCP – 355: 150-167.
- ALVARADO, G. E., CARR, M., TURRIN, B., SWISHER, C., SCHMINCKE, H-U., HUDNUT, K.**, 2006: Recent volcanic history of Irazú volcano, Costa Rica: Alternation and mixing of two magma batches, and pervasive mixing. Geological Society of America. Special Papers, 412: 259-276
- ALVARADO, G. E., BARQUERO, R., TAYLOR, W., MORA, M., PERALDO, G., SALAZAR, G., AGUILAR, T.**, 2009: Geología de la Hoja San Isidro, Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 40: 111-122
- BADILLA, E., LINKIMER, L. & ZUÑIGA, H.**, 1999: Geología de Navarro y alrededores, provincia de Cartago, Costa Rica. - 100 pág. Univ. Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- BERRANGÉ, J. P. & WHITTAKER, J.**, 1977: Reconnaissance geology of the Tapantí Quadrangle, Talamanca Cordillera, Costa Rica. -Institute of Geological Sciences, London. Report 37. - 72 pág.
- CARBALLO, M.**, 1977: Geología de la zona sur de Quebrada Honda Patarrá, San José, Costa Rica. -29 pág. Univ. Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].

- CARBALLO, M.**, 1978: La Formación San Miguel, Mioceno Inferior, Costa Rica. -114 pág. Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- CASTILLO, R.**, 1969: Geología de los mapas básicos Abra y partes de Río Grande, Costa Rica. -40 pág. Informe MEIC [Inf. Interno].
- DENYER, P. & ARIAS, O.**, 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 12: 1-59.
- DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G. E.**, 2003: Atlas tectónico de Costa Rica. -81 pág. Ed Univ. Costa Rica, San José.
- DONDOLI, C. & TORRES, A.**, 1954: Estudio geogronómico de la región oriental de la Meseta Central. - 180 págs. Min. Agricultura e Ind. San José.
- ELIZONDO, J.**, 1979: Estudio hidrogeológico preliminar de la cuenca del río Navarro, provincia de Cartago. - 89 pág. Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- ESCALANTE, G.**, 1966: Geología de la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica. Trabajos presentados en la primera reunión de geólogos de América Central. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI). 1: 59-70
- FERNÁNDEZ, M. & MADRIGAL, R.**, 1960: Calcáneos y calizas de la zona de Patarrá. - 17 pág. Informe MEIC [Inf. Interno].
- FERNÁNDEZ, M. & MONTERO, W.**, 2002: Fallamiento y sismicidad entre Cartago y San José, Valle Central de Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 26: 25-37.
- FISCHER, R. & FRANCO, J.**, 1979: La Formación Coris. Instituto Geográfico Nacional. San José. 15-71 [Inf. Semestral.].
- FRANCO, J.**, 1978: La Formación Coris, Mioceno, Valle Central, Costa Rica. - 87 pág. Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- KRUSHENSKY, R.**, 1972: Geology of the Istarú Quadrangle, Costa Rica. - Geological Survey Bulletin 1358. - 46 pág.
- LINKIMER, L.**, 2003: Neotectónica del extremo oriental del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. -103 pág. Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- MARSHALL, J.**, 2000: Active tectonics and quaternary lanscape evolution across the Western Panama block, Costa Rica, Central America. -304 pág. The Pennsylvania State University. [Tesis Ph. D.].
- MORALES, L. D.**, 1975: Estudio geológico, esquina suroeste, Hoja Istarú. - 26 pág. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- MONTERO, W. & KRUSE, S.**, 2006: Neotectónica y geofísica de la Falla Agua caliente en los Valles Coris y el Guarco, Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 34-35: 43-58.
- MONTERO, W., OBANDO, L., MORA., R., SALAZAR, G. & LEANDRO, G.**, 1991: Informe final. Proyectos habitacionales Los Diques y Duarco-Suerre.- Proyecto de Investigación de Fallas Activas. -72 pág. San José.
- MURATA, K., DÓNDOLI, C., SÁENZ, R.**, 1966: The 1963-65 Eruption of Irazú Volcano, Costa Rica (The period of March 1963 to October 1964). -Bulletin Volcanologique, 29: 765-796
- PAVANELLI, N., CAPACCIONI, B., SAROCCHI, D., G., VASELLI, O. TASSI, F. & DUARTE, E.**, 2004: Geology and stability of the southern flank of Irazu volcano, Costa Rica. -Acta Vulcanológica, sección especial, 16

(1): 2004.

**QUINTANILLA, E., ALVARADO, G. E., MARÍN, C. & DURÁN, M.,** 2007: Estratigrafía de pozos como un aporte al conocimiento de la Geología del Cuaternario del Valle de El Guarco (Cartago), Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 38: 53-64.

**RIVIER, F.,** 1979: Geología del área norte de los cerros de Escazú, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional. San José. 99-138 [Inf. Semestral.].

**SALAZAR, L., OBANDO, L. & MORA, R.,** 1992: Acueducto Metropolitano, tramo embalse El Llano- Río Navarro, Costa Rica (Un sitio bajo amenaza) -Rev. Geol. Amér. Central, 14: 85-96

**SPRECHMANN, P.,** 1984: Manual de Geología de Costa Rica, Estratigrafía. Vol 1. -320 pág. Ed. Univ. Costa Rica, San José.

**SPRECHMANN, P., ASTORGA, A., CALVO, C. & FERNÁNDEZ, J.,** 1994: Stratigraphic chart of the sedimentary basins of Costa Rica, Central America. - Profil, 7: 427-433

**UMAÑA, J.,** 1962: Informe geológico preliminar del proyecto de Cachi. -36 pág. Informe ICE [Inf. Interno].