

Julio, 2014

**ESTUDIO DE GEOLOGÍA BÁSICA, HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL Y
CONDICIÓN DE AMENAZAS Y RIESGOS NATURALES**

**PROYECTO
SEDE CENTRAL RODRIGO FACIO**

San Pedro, Montes de Oca, San José

COORDINADO POR:

**GEOCAD ESTUDIOS
AMBIENTALES**

MSc. Mauricio Vásquez Fernández

Geólogo Hidrogeólogo Consultor

SETENA-82-2004

CGCR-287



RESPONSABILIDAD PROFESIONAL

El suscrito Mauricio Vásquez Fernández, Bachiller en Geología de la Universidad de Costa Rica y Máster en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos de la Universidad de Costa Rica, incorporado al Colegio de Geólogos de Costa Rica, con el código 287 y consultor asociado a SETENA con el código 82-2004, manifiesta el conocimiento y aceptación de las condiciones y requisitos establecidos en el punto 9, "Responsabilidad profesional por la información aportada", del anexo 6 del "Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental", Parte II, publicado en el Alcance N° 43 de la Gaceta N° 223 del 18 de noviembre del 2005 y por lo tanto es responsable de los contenidos y alcances del informe técnico de geología básica, hidrogeología ambiental y condiciones de amenazas/riesgos naturales elaborado como parte del Documento de Evaluación Ambiental D1 para el **PROYECTO SEDE CENTRAL RODRIGO FACIO**, ubicado en San Pedro, distrito San Pedro, cantón Montes de Oca, provincia San José.

Mauricio Vásquez Fernández



CONTENIDOS

Resumen de resultados y conclusiones técnicas	4
Introducción.....	5
1. ESTUDIO DE GEOLOGÍA BÁSICA DEL AP	8
1.1 Unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior	8
1.1.1 Subsuelo del AP.....	10
1.2 Geomorfología del AP y alrededores.....	11
1.2.1. Unidad denudacional volcánica de baja pendiente.....	12
1.3 Cauces en el AP	12
1.4 Geodinámica externa en el AP	13
1.5 Síntesis de resultados y conclusiones geológicas	13
1.6 Discusión sobre limitantes de incertidumbre y alcance del estudio	14
2. ESTUDIO DE HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL DEL AP	14
2.1 Datos hidrogeológicos del entorno inmediato al proyecto	14
2.2 Condiciones hidrogeológicas del AP	20
2.3 Propiedades básicas del acuífero subyacente	21
2.4 Análisis de vulnerabilidad a la contaminación.....	21
2.4.1 Aplicación del método de vulnerabilidad G.O.D.	21
2.4.2 Amenaza de contaminación de las aguas subterráneas	22
2.6 Modelado hidrogeológico local	22
2.7 Síntesis de resultados y conclusiones hidrogeológicas.....	23
2.8 Discusión sobre limitantes de incertidumbre y alcance del estudio	23
3. AMENAZAS Y RIESGOS NATURALES DEL AP	24
3.1 Estructura geológica local y susceptibilidad a las amenazas	24
3.2 Fallas geológicas.....	24
3.3 Potencial de licuefacción	25
3.4 Sismicidad	26
3.5 Amenaza volcánica.....	27
3.6 Síntesis de resultados y conclusiones geológicas	28
3.7 Discusión sobre limitantes de incertidumbre y alcance del estudio	29
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
5. FIGURAS.....	31



Resumen de resultados y conclusiones técnicas

El AP se ubica sobre unidades de lahares y tobas correlacionadas con la Formación Lavina del Valle Central, la cual consiste de piroclastos intercalados con coladas de lava originadas en los volcanes extintos del paleo Irazú, en la base de la secuencia están las Formaciones Tiribí que consta de ignimbritas principalmente y Colima que son lavas andesíticas. Se presenta un perfil de suelos caracterizado por limos arcillosos. La morfología es típica de topografías de relleno volcánico, presentando pendientes suaves.

El acuífero principal en el AP se desarrolla dentro de las capas de tobas y los depósitos laháricos que conforman el subsuelo del AP. Este acuífero es de tipo poroso no confinado cubierto de bajo potencial, es sobreyacido por tobas de ceniza y otros piroclastos que funcionan como acuítardos. Se ubica aproximadamente a los 20m de profundidad y es capaz de rendir entre 0,5 y 3 l/s. Además se tiene un nivel profundo ubicado por debajo de los 50m, el cual se cataloga como un acuífero confinado de moderado a alto potencial alcanzando, según los registros de pozos, los 15 l/s.

La dirección de flujo de las aguas subterráneas es hacia el WSW siguiendo la misma dirección de flujo de la escorrentía superficial. El análisis de la vulnerabilidad a la contaminación en el acuífero del AP resultó ser baja a media de acuerdo con el método GOD. Los proyectos contemplan el desfogeo de las aguas residuales al sistema colector de aguas negras administrado por el AyA.

Las principales amenazas naturales del AP son la sismicidad asociada a fallas activas y la amenaza volcánica del Irazú por caída de piroclastos y lluvia ácida. Las principales fallas son Cipreses, Lara, Río Azul y Agua Caliente catalogadas como activas, Dorita, Laguna y Rancho Redondo son neotectónicas.

La zona ha sido afectada por sismos históricos de magnitudes mayores a 5,0 y 6,0 que han ocasionado hasta muertes en el pasado, también ha sido afectada por caída de cenizas durante los períodos de actividad del Irazú en 1962-65 y 1994. Además se deben considerar afectaciones por deslizamientos producto del socavamiento sobre las márgenes de la quebrada Poró, la cual atraviesa la propiedad con rumbo E-W.

El proyecto es viable en tanto se tomen en cuenta las condiciones de sismicidad en los diseños de las estructuras del edificio siguiendo los lineamientos del Código Sísmico y el estudio de suelos.

Introducción

Los proyectos a desarrollar se ubican dentro de la Sede Central Rodrigo Facio, en el distrito de San Pedro, cantón de Montes de Oca, provincia de San José, en las coordenadas Lambert Costa Rica Norte 213400 N y 530650 E de la hoja topográfica Abra del IGN, escala 1:10 000.

De forma general la propiedad presenta zonas desarrolladas, principalmente infraestructura, además de red vial, zonas de parqueo, en menor proporción se cuenta con zonas verdes, las cuales principalmente se ubican en las márgenes de la quebrada los negritos y sitios de descanso de la comunidad universitaria (Fotografía 1- 4).

Los accesos son por calles asfaltadas que comunican San Pedro con la provincia de San José, además de los otros distritos de Montes de Oca, Guadalupe y Zapote, al oeste colinda con la carretera de circunvalación, las cuales son transitables durante todo el año en cualquier tipo de vehículo (Figura 1, Mapa de Ubicación).



Foto 1. Zonas verdes ubicadas en la margen izquierda de la Quebrada los Negritos, cerca de la Facultad de Educación, presenta una cobertura vegetal con zacate y árboles, topografía plana.



Foto 2. Condiciones de bajo caudal de la Quebrada Los Negritos, en el momento de la visita, dicho cauce tiene 2 a 3 m de ancho y su profundidad es variable.



Foto 3. Sitio donde se va desarrollar el Edificio anexo Escuela de Medicina, este se ubica en la parte posterior de la Facultad de Farmacia y Medicina, la zona es utilizada para parqueo, además de estar intervenida.



Foto 4. Sitio donde se va desarrollar el Edificio anexo a la Escuela de Música, se va desarrollar en la zona de parqueo ubicado en las inmediaciones de las Facultades de Música y Química. El área es utilizada para parqueo por lo que está intervenida.



Objetivos

El siguiente estudio contempla los protocolos de geología, hidrogeología ambiental y amenazas y riesgos naturales, el objetivo en cada caso es el siguiente:

Estudio técnico de geología básica

Caracterizar de manera rápida y directa la conformación geológica estructural del AP y su entorno inmediato. De acuerdo con la sección I del Manual de Evaluación de Impacto Ambiental es importante determinar a geoaptitud de AP, que se define como las limitantes técnicas o atributos técnicos positivos respecto del desarrollo de la actividad, obra o proyecto.

Estudio de hidrogeología ambiental

Con base en la información geológica definir el modelo conceptual de las aguas subterráneas y la presencia de acuíferos en la zona para luego determinar si existe un factor de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y el grado de vulnerabilidad del acuífero subyacente en caso de que exista.

Estudio estructural y amenazas / riesgos naturales

Establecer si el proyecto, actividad u obra a desarrollar, puede ser realizable bajo las condiciones estructurales, geomecánicas y geotécnicas y establecer las medidas necesarias para disminuir la eventual condición de vulnerabilidad que puede presentar el mismo, analizando además el entorno geotectónico en que se ubica.

La metodología utilizada fue hacer una visita al sitio para realizar observaciones de campo, hacer un análisis de las condiciones geológicas, de la topografía y de las unidades aflorantes de roca, tanto en el AP como en el AID, recopilación de la información obtenida del estudio de suelos con respecto a las características geotécnicas del AP, recopilación de información de pozos para definición de las características hidrogeológicas del sitio y la amenaza de contaminación por aguas residuales o fluidos provenientes de los proyectos y recopilación de cualquier otra información bibliográfica necesaria para la elaboración del presente informe como una parte de la evaluación ambiental D1.

1. ESTUDIO DE GEOLOGÍA BÁSICA DEL AP

Se realiza a continuación el estudio de geología básica del AP de conformidad con lo establecido en la Sección II del anexo 6 del Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, dado que el proyecto involucra la construcción de infraestructuras, además de estructuras asociadas como parqueos, accesos y demás servicios.

1.1 Unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior

El Valle Central de Costa Rica constituye una cuenca intra-arco rellena por espesores potentes de varias centenas de metros de secuencias de materiales volcánicos originados en una paleo Cordillera durante el Pleistoceno Temprano, se incluyen mayoritariamente lavas e ignimbritas de las formaciones Colima (o Formación Lavas Intracañón) y Tiribí (o Formación Depósitos de Avalancha Ardiente). Posteriormente del Pleistoceno Medio al presente, se han depositado flujos de lavas, lahares y piroclastos de caída, todos provenientes de los estratovolcanes actuales Irazú, Barva y Poás y otros ya extintos.

En la zona donde se ubica el AP y en general al este del centro de San José, las mayores influencias han sido del volcán Irazú y de otros volcanes extintos que lo precedieron, las unidades superiores están constituidas principalmente por depósitos de lahares y cenizas (Figura 2, mapa geológico).

A los depósitos del este del Valle Central Occidental que conforman el casco central de San José y las ciudades del este, Denyer & Arias (1990) los denominan como “Formación de Lahares y Cenizas”, mientras que Hidalgo *et al.* (2004) se refiere a ellos como “Lavina del Valle Central”. Esta unidad de depósitos de flujo sobre yace a las ignimbritas de la Formación Depósitos de Avalancha Ardiente. La unidad volcánica más inferior conocida se denomina Formación Lavas Intracañón. A continuación se hace referencia a las formaciones geológicas principales de la más antigua a la más reciente.

Formación Lavas Intracañón

Se compone de al menos 7 coladas de lavas andesíticas de 10 a 30m de espesor (Echandi, 1981) y afloran principalmente en los valles profundos de los ríos Virilla y Tiribí, han sido identificadas en numerosas perforaciones a lo largo del Valle Central.

Esta formación por su importancia desde el punto de vistas hidrogeológico ha sido dividida en varios miembros. El Miembro Linda Vista corresponde con las lavas superiores donde se desarrolla en acuífero Colima Superior, son andesitas y afíricas. El Miembro Belén son las lavas inferiores donde se ubica el acuífero Colima Inferior y consiste de andesitas porfíricas con dos piroxenos. En los horizontes fracturados y brechosos de cada miembro de desarrollan los principales acuíferos que en general se conocen como acuíferos Colima.

Las unidades de lavas anteriores están separadas por el Miembro Puente de Mulas, que constituye ignimbritas de baja permeabilidad, lo que se denomina como acuitardo y tiene hasta 80m de



espesor (Losilla et. al., 2001), permite la conexión vertical entre los acuíferos Colima Superior e Inferior. Las mejores exposiciones de esta formación se encuentran en el cañón del río Virilla.

Se calcula que el espesor total de la formación es de 270m (Echandi, 1981), su forma es irregular en la base y plana en la parte superior, es sobre yacida concordantemente por los depósitos de avalanchas piroclásticas. Según Kussmaul (2000) estas lavas son el producto de efusiones a lo largo de fisuras con direcciones NE-SO hasta E-O, ya que su extensión lateral es muy grande. La composición química de estas lavas es diferente a las lavas de los estratovolcanes de la Cordillera Volcánica Central y se asemeja más a la composición de la Formación Tiribí sobre yacente.

Formación Depósitos de Avalancha Ardiente

Consiste de extensos depósitos de toba y flujos piroclásticos, flujos de ceniza con bombas escoriáceas, lapilli y clastos líticos, a veces se presenta como ignimbritas muy soldadas, de color gris claro y con fiames negros. Las facies de soldamiento varían tanto vertical como horizontalmente en diferentes puntos del Valle Central. En la base de la unidad se localiza una capa de pómez de caída de hasta 3m de espesor.

El espesor máximo de la formación es de 150m, tiene una extensión de 500km² y un volumen de 25km³ (Kussmaul, 1988). Yace discordante o discontinua a la Formación Lavas Intracañón y a otras unidades sedimentarias del Terciario al suroeste del Valle Central. Es sobre yacida por lahares, piroclastos y lavas procedentes de la Cordillera Volcánica Central, tales como Formación Barva en la zona norte del río Virilla y la Lavina del Valle Central hacia la zona de San José.

Esta formación se caracteriza por ser de alta porosidad y una moderada permeabilidad, en las zonas más soldadas la permeabilidad disminuye, actúa como acuitardo regional cuando subyace al acuífero Barba Inferior (SENARA-BGS, 1985). En gran parte del Valle Central cubre al acuífero Colima Superior, de modo que le proporciona una verdadera protección a la contaminación superficial dada sus características de baja permeabilidad.

Lavina del Valle Central (lavas del paleo Irazú, lahares y cenizas)

Estos depósitos afloran al este del Valle Central Occidental, en los ríos Torres y María Aguilar entre otros. Son depósitos sumamente heterogéneos con fragmentos volcánicos subangulares a subredondeados, predominando los bloques de lavas con diámetros máximos de 2m pero en general no superan 1m, los fragmentos flotan en matriz areno-limosa a limo-arcillosa compactada; están cubiertos por capas de ceniza de hasta 20m de espesor y localmente depósitos coluviales y aluviales (Hidalgo et al., 2004).

Son depósitos originados por movimientos de grandes volúmenes de material, tipo *debris avalanches*, que se produjeron por la desestabilización de estructuras volcánicas y en este caso pudo ocurrir una transición a *debris flow* por la incorporación de agua durante el movimiento. La fuente se ubica al noreste de San José en las estribaciones occidentales del actual macizo Irazú (Hidalgo et al., 2004).



Krushensky *et al.* (1976) las asocia a la formación Reventado mientras que Bergoeing (1979) asegura que son manifestaciones volcánicas del extinto volcán Las Nubes. Por su parte, Hidalgo *et al.* (2004) correlaciona estas coladas a estratovolcanes extintos del paleo Irazú los cuales nombra como Pico de Piedra, Cabeza de Vaca y Pre-Cabeza de Vaca, todos localizados al oeste del actual volcán Irazú.

Camacho *et al.* (2004) elaboraron la geología del cantón de Montes de Oca, muy cerca de donde se ubica el AP, describen la unidad de lahares (Unidad Roosevelt) que aflora de manera esporádica en los cauces de los principales ríos, como es el caso del río Torres. Constituye depósitos volcanoclásticos compuesto de andesitas con tamaños entre 5cm y 1,5m, flotando en una matriz limo-arenosa, cinerítica, arcillificada de color café claro a crema, medianamente consolidada y sin ninguna estructura interna. Estos lahares están cubiertos por al menos dos capas de ceniza de espesor variable, denominada Unidad Mansiones, que se extienden a lo largo del cantón de Montes de Oca, la más superior que culmina la secuencia se asocia a los eventos del volcán Irazú ocurridos entre 1963 y 1965, el espesor máximo es de unos 10m.

1.1.1 Subsuelo del AP

Se realizaron diversos estudios de suelos, cada uno para los respectivos proyectos a desarrollar dentro de la Sede Central Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica, a continuación se describen cada uno de ellos:

- **Edificio de Tecnología de Salud**

La firma Vieto & Asociados, realizó el estudio de suelos en agosto de 2008, se hicieron tres perforaciones con diversas profundidades, desde los 7,2 a 8,4 m, a dichas profundidades no se determinó el nivel freático en el sitio de exploración, el resultado obtenido determinó un suelo limoso arcilloso de consistencia variable, con una baja plasticidad.

- **Edificio anexo para Escuela de Biología**

En el mes de febrero del 2014 se realizaron cuatro perforaciones para determinar las condiciones del subsuelo, por parte de la empresa Ingeotec S.A, se determinaron dos capas, las cuales están conformadas de la siguiente forma:

Capa 1: Limos arcillosos color café oscuro. Plasticidad media. Consistencia entre blanda y muy compacta. Espesor variable entre 0,45 y 2,25 m.

Capa 2: Estratos de limos arcillosos y/o arenosos color café amarillento y café grisáceo con vetas grises, negras y amarillentas. Plasticidad variable entre baja a alta. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS1), clasifican como limos de baja a alta compresibilidad (ML y MH), con una consistencia variable entre medianamente compacta y rígida.

No se detectó la presencia de niveles freáticos en los sitios y profundidades exploradas por los sondeos.

- **Edificio anexo para Centro de Investigación en Tecnologías de Alimentos (CITA)**



En el mes de febrero del 2014 se realizaron cuatro perforaciones para determinar las condiciones del subsuelo, por parte de la empresa Ingeotec S.A., se determinaron dos capas, las cuales están conformadas de la siguiente forma:

Capa 1 limo orgánico color café de tonalidades claras y oscuras. Plasticidad media a alta. Consistencia variable entre blanda y medianamente compacta. Capa de mala calidad mecánica.

Capa 2 Limo arcilloso color café de tonalidades grisáceas. Plasticidad alta. Consistencia variable entre compacta y muy compacta. Capa de regular a buena calidad mecánica.

Para el área y la profundidad cubiertas por este estudio, se detectó la presencia del nivel freático a profundidades variables entre 1,90 m y 2,70 m.

- **Edificio anexo a la Escuela de Música** (Estudio completo se adjunta como anexo).
- **Edificio para el Instituto de Investigaciones en Farmacia (INIFAR) y planta piloto** (Estudio completo se adjunta como anexo).
- **Edificio de Aulas y Laboratorios** (Estudio completo se adjunta como anexo).

La firma Vieto & Asociados realizó el estudio de suelos en abril de 2013, se hicieron ocho perforaciones con diversas profundidades, desde los 6 a 9 m, a dichas profundidades se determinó el nivel freático a partir de los 6 m y hasta los 7,8 m en el sitio de exploración. El resultado obtenido determinó un suelo arcilloso de una consistencia variable.

- **Edificio anexo Escuela de Medicina** (Estudio completo se adjunta como anexo).

En general, a partir de las condiciones encontradas en los suelos de la zona, se determina que la aptitud es favorable para la cimentación de las obras nuevas, siempre y cuando se consideren todas las recomendaciones hechas en los diferentes estudios de suelos, en lo que con respecto a las excavaciones y cimentaciones. Este tipo de obras como las que se proyectan, existen a lo largo del campus de la Sede Central de la UCR, lo que demuestra que es posible llevar a cabo su construcción.

De acuerdo con BGS-SENARA (1985) la porosidad de los tobos meteorizadas del Valle Central de Costa Rica es superior al 50% con valores de hasta 60%. BGS-SENARA (1985) establece permeabilidades para estos materiales meteorizados de origen volcánico como los del AP, entre 10^{-2} y 10^0 m/día.

1.2 Geomorfología del AP y alrededores

El AP se ubica dentro de lo que regionalmente se conoce como la unidad geomorfológica de formas de origen volcánico (Madrigal & Salazar, 1993). La mayor parte de la superficie del área de San José y donde se ubica el AP es plana, con pequeñas ondulaciones (Unidad de formas volcánicas) y pendientes menores a 8%.

La unidad geomorfológica donde se ubica el AP corresponde a colinas denudacionales de disección baja a moderada, con superficies plano onduladas y cortada por la unidad de valles fluviales con laderas de pendiente baja a moderada (Figura 3, Mapa Geomorfológico). La unidad denudacional de colinas y pendientes se originó por la cobertura de cenizas que tiende a suavizar la morfología anterior de depósitos laháricos o *debris avalanches*.

Hidalgo *et al.* (2004) describe la morfología de la lavina del Valle Central como suave y uniforme con presencia de montículos o colinas alongadas con direcciones NE-SO que asemejan *hummocks* característicos de eventos tipo *debris avalanches*. El sentido de la pendiente regional es hacia el suroeste principalmente, indicando, en la dirección opuesta, el lugar de la fuente que originó los materiales volcánicos de la zona, tanto las cenizas como los lahares.

1.2.1. Unidad denudacional volcánica de baja pendiente

La pendiente de la zona correspondiente al AID es en general menor a un 5%, en el AP predomina la pendiente de 1% a 2% lo cual se cataloga como plana, ya que la mayoría de las áreas destinadas para los nuevos proyectos, son intervenidas, pues están dentro del actual Campus Universitario. Las características del AP son favorables para la construcción de obras como las que se proyectan, se requiere de movimientos de tierras para la cimentación de los edificios, y posiblemente se deban conformar taludes, que deberán hacerse según los parámetros establecidos en el estudio geotécnico de suelos en cada lugar.

1.3 Cauces en el AP

El Campus Universitario Rodrigo Facio de la UCR es atravesado por el cauce de la Quebrada Los Negritos, con rumbo E-W (Foto 5). Este cauce se cataloga como de bajo régimen de caudal, aumentando de manera considerable en periodos de lluvias por aportes en las partes altas de la cuenca donde se han dado los cambios de uso del suelo. Por la distancia a la que se encuentran los proyectos y aunado a las diferencias de altura entre dicho cauce y las áreas del proyecto, se define que no representa una amenaza de inundación. Si se puede esperar un socavamiento en los bordes de la quebrada. Se debe determinar mediante un estudio hidrológico el aporte de agua que recibiría dicho caudal por la construcción de los proyectos.



Fotografía 5: Vistas de la quebrada los Negritos, vista desde la margen izquierda, en las cercanías de la Facultad de Educación, sitio donde va a desarrollar el edificio de aulas.

1.4 Geodinámica externa en el AP

La zona del AP para los diferentes proyectos dentro del Campus, presenta una topografía de baja pendiente en la mayor parte del área, condición que no favorece la formación de surcos y cárcavas de erosión fluvial o la incidencia de deslizamientos o caída de rocas. Siendo considerable el factor de deslizamiento por socavamiento o formación de cárcavas en la margen de la quebrada Los Negritos únicamente. La cohesión de las tobas y cenizas superiores es baja y son fácilmente erosionables cuando se exponen a flujos de corrientes turbulentas, por lo que se debe llevar a cabo un control de la escorrentía.

1.5 Síntesis de resultados y conclusiones geológicas

La geología del AP es de origen volcánico, constituido en su basamento por cenizas y andesíticas asociadas a la Formación Lavas Intracañón que son sobre yacidas por los depósitos de la Lavina del Valle central, la cual está constituida por materiales heterogéneos con fragmentos volcánicos.

La unidad superior consiste de lahares y cenizas intercalados con flujos de coladas de lava provenientes de los volcanes extintos del paleo Irazú, que constituyen la Lavina del Valle Central. Son depósitos muy heterogéneos con fragmentos volcánicos que flotan en una matriz areno limosa a limo arcillosa compactada. Se originaron por depósitos de grandes volúmenes de materiales tipo *debris avalanches* al ocurrir la desestabilización de estructuras volcánicas.

La estratigrafía del suelo está conformada por capas de limos arcillosos. La consistencia del material en el sitio varía crecientemente de blando hacia la superficie a dura al final de los sondeos.

Respecto a la geomorfología el AP está dentro de las formas de origen volcánico, compuestas por lahares y coberturas de cenizas, son superficies plano onduladas de pendiente baja, colinas denudacionales de disección baja a moderada cortada por valles fluviales con laderas de baja a moderada pendiente. Localmente la topografía de la propiedad varía, presentando topografías subhorizontales.

A partir de las observaciones de campo, las características de las unidades aflorantes y las condiciones geomorfológicas, se determina que la geoaptitud del sitio es favorable para el desarrollo del proyecto de construcción de los edificios dentro del Campus Universitario donde de por sí, ya funcionan estructuras como las que se proyectan, lo que demuestra la aptitud de los suelos y el terreno para este tipo de obras.

Como atributos positivos se pueden destacar que la unidad superior de depósitos de cenizas y tobas constituye una topografía subhorizontal y una adecuada consistencia lo que permite la cimentación de las obras. Se deben seguir las recomendaciones en cuanto a los tipos de cimentación adecuados en cada caso y según el tipo de proyecto.



1.6 Discusión sobre limitantes de incertidumbre y alcance del estudio

Para la elaboración de este apartado se considera como incertidumbre la capacidad del cauce de la quebrada Los Negritos, para soportar el exceso de escorrentía proveniente de los proyectos. Desde el punto de vista geológico y a la información local observada en el campo, no se consideran incertidumbres en cuanto al modelo geológico de la zona del proyecto.

El alcance del estudio de geología está dado por las observaciones de campo y la información levantada del estudio de suelos, así como por la información bibliográfica obtenida de la zona y la levantada en el campo, de esta forma se cumple el principal objetivo que define la geoaptitud favorable del proyecto. Los resultados son, por lo tanto, aplicados al proyecto de construcción de los nuevos edificios dentro del Campus de la UCR, el cual se concluye que es viable desde el punto de vista de la geología del terreno.

2. ESTUDIO DE HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL DEL AP

Se realiza a continuación el estudio de hidrogeología ambiental del AP de conformidad con lo establecido en la Sección III del anexo 6 del Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental. El proyecto tendrá acceso al sistema alcantarillado de San Pedro el cual es administrado por Acueductos y Alcantarillados, con lo cual se estima que la amenaza de contaminación a las aguas subterráneas es baja.

2.1 Datos hidrogeológicos del entorno inmediato al proyecto

El sitio se ubica sobre la unidad denominada Lavina del Valle Central o lahares y cenizas. Los materiales sobreyacentes y cerca de la superficie, coinciden con cenizas o tobas de color café meteorizadas a suelos. Para determinar la estratigrafía geológica en la zona de estudio se recurren a registros litológicos de perforaciones existentes en los alrededores.

En algunos de los registros litológicos de las perforaciones no se describe la capa de cenizas superior. En las perforaciones de pozos se reportan espesores de hasta 10m cenizas. La Unidad de Lavina (lahares) está compuesta por bloques de lava englobados en matriz limo-arenosa, alcanzan hasta 25m de espesor.

Esta unidad de lahares y cenizas se considera de baja permeabilidad, con valores promedio de 10^{-1} m/día y porosidades de hasta 50% (SENARA-BGS, 1985). Están intercaladas con capas de lavas a más de 40m de profundidad, se asocia a coladas de los estratovolcanes extintos del paleo Irazú.

La Formación Tiribí está constituida por ignimbritas o tobas soldadas, con capas de pómez y cenizas, el espesor es variable y se ubican a más de 50m de profundidad. Estos materiales son de baja a moderada permeabilidad.

La Formación Colima se mantiene a una profundidad más o menos constante a más de 100m. Son lavas y brechas lávicas, porosas y fracturadas, de color negro a gris, andesítico – basálticas, se asocian al Miembro Linda Vista en esta área. No se conoce su espesor total, ya que a más de 200m de profundidad todavía se describen lavas fracturadas correlacionadas con dicho miembro.

Se revisó la información hidrogeológica disponible en el Área de Aguas Subterráneas del SENARA. En el mapa hidrogeológico del Valle Central (SENARA & BGS, 1985) se describe la zona este de San José como lahares y tobas de baja permeabilidad con pozos que pueden producir hasta 3 l/s y en general menos de 1 l/s. El AP se ubica dentro de la cuenca del valle central con la presencia de importantes cauces como lo son el río Tiribí, María Aguilar, Torres y Virilla.

2.1.1 Inventario de pozos

Se procedió a investigar en el Área de Aguas Subterráneas del SENARA y el AyA las bases de datos de pozos perforados y excavados disponibles en un radio de 2000 metros con respecto a un punto ubicado en la entrada principal del AP. Se encontraron en total 169 pozos perforados registrados (legales), en el Mapa hidrogeológico (Figura 4) se ubican los pozos localizados a distancias inferiores a los 2000m respecto al AP. En el Cuadro 1, corresponde con la lista de pozos obtenida de la Base de Datos del SENARA para un radio de 1000m.

Cuadro 1
Información básica de pozos registrados según la base de datos digital del SENARA para un radio de 2000m respecto al AP (julio de 2014)

No. pozo	X	Y	Propietario
AB-1040	531600	213700	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
AB-96	531060	213450	UCR (BELLAS ARTES)
AB-95	531000	213540	U.C.R (QUIMICA)
AB-93	530980	213580	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
AB-1081	531640	214040	ASOC CULT MIRAVALLS
AB-84	530960	213580	U.C.R.
AB-97	531050	213340	U.C.R (FAC. EDUCACION)
AB-76	530950	213450	U.C.R.
AB-94	530900	213580	U.C.R (MICROBIOLOGIA)
AB-99	531560	213140	A. ELECTRA.
AB-80	530880	213800	U.C.R.
AB-75	530850	213500	U.C.R.
AB-1806	531365	213055	ASOC.CULTURAL CALASANZ
AB-86	530850	213450	U.C.R.
AB-820	531250	213050	COLEGIO CALAZANS
AB-88	530900	213280	U.C.R.
AB-169	531400	213000	ALFREDO CRUZ.
AB-79	530780	213760	STERLING PRODS.
AB-74	530820	213370	U.C.R.
AB-1899	530770	213750	STERLING PRODUCTS
AB-2416	530768	213763	GLAXO SMITH KLINE



AB-98	532150	213580	SCISP
AB-90	530820	213190	TEJIDOS SAPRISSA
AB-83	530660	213580	U.C.R.
AB-445	531600	212900	FABRICA DE PAPEL
AB-683	531350	214400	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
AB-89	530830	213150	FABRICA SAPRISSA
AB-734	531370	214420	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
AB-1058	531000	212970	MARIO DIAZ SANCHEZ
AB-82	530620	213750	STERLING PRODUCTS.
AB-444	530800	213120	TEJIDOS SAPRISSA
AB-92	530830	213080	T.DADA
AB-87	530620	213400	U.C.R.
AB-1687	530930	212960	VICTOR MEJIAS CAMBRONERO
AB-72	530620	213340	U.C.R.
AB-173	531810	212880	ENSAMBLADORA DE AUTOS.
AB-570	531600	214500	KOBERG CIA.
AB-1320	531330	212750	INV. MU?OZ Y NANNE, S.A.
AB-85	530520	213620	U.C.R.
AB-991	530525	213530	UNIV. DE COSTA RICA
AB-81	530480	213780	U.C.R.
AB-77	530520	213300	U.C.R.
AB-569	531500	214600	KOBERG CIA.
AB-78	530450	213520	U.C.R.
AB-73	530450	213500	U.C.R.
AB-164	531250	212670	R. QUIROS
AB-167	531800	212730	F. OREAMUNO.
AB-172	531740	212670	SR. LORENZEU
AB-91	530600	213000	OLIVA MU?OZ S.
AB-166	530970	212690	CIA. PETRO. CAL.
AB-158	530620	212940	M.A. MU?OZ
AB-161	530870	212720	ING. RENAN MENDEZ
AB-596	531600	214700	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
AB-165	531100	212600	R- QUIROS.
ILG-900	531690	212570	ARGENTINA MORA MOLINA
AB-815	530750	212750	ASOCIACION SAN MIGUEL ARCANGEL
AB-159	530650	212830	GULF DE COSTA RICA
AB-1830	530580	212900	OUTLET MALL SAN PEDRO
AB-163	531000	212600	F. FOURNIER
AB-162	530950	212620	J.FAITH
AB-2014	530900	214650	HUA HUI CHEN
AB-171	531641	212490	A. COLLADO
AB-2132	530350	213150	CONDOMINIO MALL SAN PEDRO
AB-2000	530645	212755	ANA MARIA BERTOLANI



AB-435	530250	213780	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
AB-1069	531800	212500	PLAZA DEL SOL
AB-1972	532420	212950	INVERSIONES ASCAL S.A.
AB-1813	532500	214240	CONSTRUCTORA PROYCON S.A.
AB-822	531450	212400	TAKAMURA S.A.
AB-174	531700	212430	R. DORADO
AB-1283	530225	213250	INVERSIONES T.B., S.A
AB-1070	531800	212430	PLAZA DEL SOL
AB-1526	530250	213100	KUTKA S.A.
AB-23	530250	214180	ESCUELA ENSEÑANZA ESPECIAL
AB-1995	530370	212870	REAL MAYA S.A.
AB-1215	530250	213000	AUTO LAVADO COSTA RICA,SA
AB-170	530500	212630	AyA
AB-24	530190	214260	REFORMATORIO DE GUADALUPE
AB-1699	530090	213160	MALL SAN PEDRO
AB-71	530000	213590	JUAN DENT
AB-1433	531275	215050	MODELITOS CHACALINES SRL
AB-567	530000	213700	ALVARO ARIAS
AB-70	530000	213700	GERBER
AB-1088	530230	214420	MINIMAX
AB-990	530000	213400	CARLOS SALAS BLEN
AB-156	530332	212620	
AB-1575	531855	212210	INTAL S.A.
AB-149	530130	212870	C.M.GONZALES.
AB-1782	531150	215125	LAVACAR DEL ESTE S.A.
AB-599	530100	214400	COCA COLA
AB-915	529920	213310	CAYA S.A.
AB-233	529950	213180	CELSO SUROCA
AB-1568	529870	213710	GERBER DE C.A. S.A.
AB-147	530040	212930	CHARLES W. AVERRE
AB-1453	530900	215100	SUPER MORAVIA, S.A.
AB-67	529980	213050	JUAN DENT
AB-69	529890	213940	STICA
AB-1166	530075	212850	LAVAUTO DEL ESTE, S.A.
AB-160	530190	212680	GUILLERMO JIMENEZ
AB-1003	529870	213390	A?IWAPIE S.A
AB-66	529950	213060	EDUARDO ARTI?ANO
AB-1924	531030	215170	ASDRUBAL MOREIRA ARAYA
AB-1195	530080	212800	LAVAUTO DEL ESTE, S.A.
AB-888	529950	213050	CEDE S.A.
AB-148	530050	212810	GUILLERMO ESQUIVEL
AB-154	530100	212730	AyA
ILG-318	529900	213100	DOS PASOS S.A.
AB-68	529930	213020	JOSE PUJOL



AB-361	532805	212825	S. GUARDIAN
AB-1329	529875	213135	BEJOS YAMUNI JIMENEZ
AB-22	529900	214240	GALLITO INDUSTRIAL
AB-2317	532952	213080	INDUSTRIAL EQUILAB S.A.
AB-1082	529850	213162	INVERSIONES STEWART S.A
AB-1688	530170	212560	SAVIESE S.A.
AB-168	531230	212000	ADRIAN COLLADO
AB-155	530290	212430	M.URBINA.
AB-157	530200	212520	ALVARO ESQUIVEL
AB-234	529820	213200	GUIDO CASTRO G.
AB-1076	529750	213600	MAURICIO MENDIOLA (SAN BLAS)
ILG-339	531730	212000	INDUSTRIAS QUIMICAS S.A.
AB-769	529850	213050	CONSTRUCCIONES C.P.M.
AB-620	529800	213200	HOTEL CONQUISTADOR
AB-21	529900	214400	GALLITO INDUSTRIAL
AB-431	530930	215280	JORGE CLARE
AB-960	531500	215350	EXPUM S.A.
AB-235	529830	212970	MAX CORTES
AB-153	529970	212700	EMMA BAMBOA
AB-1612	532090	212050	SAN JOSE IDOOR CLUB S.A.
AB-622	529900	212800	RAMON HERRERO
AB-896	533090	213086	AyA
AB-2121	532900	214600	ASOC. IGLESIA EVANG METODISTA
AB-20	529890	214540	ESCUELA PILAR JIMENEZ
AB-2379	529720	214170	GRUPO BRITANICO GBCR PARA DES.Y LAS INVER.
ILG-447	529700	213150	JUVERO S.A
AB-788	529850	214500	SEDE PROVISIONAL DEL BUEN PAST
AB-1292	529740	212990	SYCAFRA, S.A.
AB-17	529740	214290	COLEGIO NAPOLEON Q.
AB-65	529700	213080	ALVARO DENT
AB-978	530110	212375	JESUS GAZEL SAUMA
AB-18	529930	214700	CLINICA CATOLICA
AB-728	529700	214300	EL GALLITO LTDA.
AB-182	530500	212040	AyA
AB-64	529650	213060	CELSO SURROCA
AB-1700	530265	212170	CORPORACION ABACO S.A.
AB-62	529665	212980	MARIO ULATE
AB-141	529710	212870	A. ELECTRICA.
AB-995	529700	214400	INDUSTRIAS COFALA
AB-897	530500	212000	AyA
AB-61	529630	212975	ALVARO PINTO
AB-899	530350	212050	AyA
AB-937	529650	212900	SANTIAGO MILLAS S.A.



AB-1270	532100	211850	KAMOIRE, S.A.
ILG-187	529700	214500	LABORATORIOS COFALA S.A.
AB-151	529790	212610	G.G. DE PINTO
AB-140	529660	212850	NO INDICA
AB-901	533150	212800	AyA
AB-505	530350	215250	SENARA
AB-63	529570	213045	E.D.I.C.A.
AB-143	529710	212700	JUAN DENT.
AB-138	529620	212885	MARIO URBINA
AB-936	529850	214800	CLINICA CATOLICA
ILG-113	529700	212700	FLORIA PINTO GONZALEZ
AB-137	529625	212830	M. FRANCO.
AB-859	529470	213920	EMBOTELLADORA TICA (COCA COLA)
AB-19	529740	214690	MONJAS DE GUADALUPE
AB-142	529730	212600	GUILLERMO ARAGON
AB-1706	531049	211690	J.ADM.REGISTRO NACIONAL
AB-2318	530620	215460	CULTURAL S.A.
AB-938	532850	212250	FRACCIONAMIENTO M. S.A.

La abundancia de pozos en el sector refleja la alta demanda de los acuíferos en las unidades volcánicas, ubicados en las lavas vesiculares de la Formación Colima y los acuíferos de menor capacidad ubicados dentro de las tobas, lahares e ignimbritas de la Formación Lahares y Cenizas, los cuales son captados en la zona.

A continuación se presenta información hidrogeológica de pozos cercanos al AP y AID tomada de los registros de datos del SENARA.

Cuadro 2
Información hidrogeológica de pozos cercanos al AP

Pozo	Profundidad	Nivel Estático	Nivel Dinámico	Caudal	Uso
AB1040	103.0	20.0	57	2.0	DOMESTICO
AB96	61.0	4.6		0.5	DOMESTICO
AB93	61.0	13.7		0.5	DOMESTICO
AB95	44.2	9.1	36,57	2.5	DOMESTICO
AB1081	42.0	6.0		1.0	DOMESTICO
AB76	79.3	0.0		2.2	DOMESTICO
AB94	44.2	9.1	27,43	1.6	DOMESTICO
AB77	61.0	4.6		1.3	DOMESTICO

De acuerdo a los niveles estáticos reportados se asume la presencia de niveles colgados de bajo potencial dentro de lavas intercaladas con los lahares y cenizas. Dentro de las capas de lahares y cenizas existen además niveles colgados de agua subterránea, ya que en términos generales esta

unidad se clasifica como un acuítardo. Lo anterior quedó demostrado en los estudios de suelos en donde se reportan nivel de agua a menos de 10m de profundidad, que no corresponden por ende a acuíferos, sino a niveles colgados por las diferencias de permeabilidad de esta unidad.

2.2 Condiciones hidrogeológicas del AP

La hidrogeología de San José ha sido poco estudiada y no está del todo definida como ocurre en otras partes al oeste de la ciudad, como en las zonas de Heredia, Santo Domingo, San Antonio de Belén, etc. En el Mapa Hidrogeológico del Valle Central de SENARA-BGS (1985) no se hace una diferenciación con respecto a las unidades hidrogeológicas de esta zona, pues únicamente se hace referencia a tobas y lahares en general. En dicho mapa se describe la zona de San Pedro como lahares y tobas de baja permeabilidad con pozos que pueden producir hasta 3 l/s y en general menos de 1 l/s. Los acuíferos en estas unidades se catalogan como de bajo potencial y se estima que el espesor aproximado es de unos 100m.

El acuífero de San José y alrededores como San Pedro, se conoce como el Acuífero Metropolitano y fue estudiado principalmente a finales de los 70's por la presencia de varios pozos hacia el sector de Zapote. Posteriormente la investigación se concentró en la zona de Heredia y Belén donde se encontraron mejores condiciones hidrogeológicas. Este acuífero Metropolitano es de bajo potencial, cubiertos por capas de lahares poco permeables y se desarrolla principalmente en coladas de lavas y aluviones intercalados.

Existen tres unidades hidrogeológicas en la zona que se diferencian de acuerdo a la interpretación de los registros litológicos de los pozos. La unidad superior está compuesta por cenizas, seguidas por lahares y lavas del paleo Irazú. Esta secuencia sobreyace a otras tobas y cenizas, que se reportan en los registros de pozos y que aquí son correlacionadas con la Formación Tiribí. Por último, las lavas más profundas se asocian al miembro Linda Vista de la Formación Colima.

Acuífero superior

El acuífero superior o sistema acuífero, está constituido en materiales volcánicos, tanto en las lavas como en los lahares, incluidos dentro de la unidad conocida como Lavina del Valle Central. Por el tipo de materiales predominantes se le clasifica como de bajo a moderado potencial, dependiendo de las permeabilidades de las capas de lava fracturadas o los lahares que tienden a ser arcillosos y de baja permeabilidad.

El acuífero en los lahares es de tipo poroso, se estima que está compuesto por niveles colgados dentro de capas de granulometría gruesa, que pueden además presentar confinamientos por las capas de arcillas sobreyacente. Su permeabilidad intrínseca está ligada a los poros de la matriz principalmente, es de bajo potencial por las características granulométricas de la matriz, se trata de bloques lávicos dentro de una matriz arenosa a arcillosa de baja permeabilidad.

En las capas de lavas la permeabilidad es secundaria y ocurre en sus partes fracturadas y en menor proporción en las rocas porosas o brechas, son los materiales con mejor potencial de agua subterránea, su espesor es menor a los lahares y se describen en algunos de los registros. Las coladas de lava cubiertas de lahares se presentan en la zona a manera de montículos alargados en dirección oeste, limitados por quebradas y ríos.



Se define que el sistema acuífero es de tipo libre cubierto y es recargado por infiltración directa del agua de lluvia a través del subsuelo y posiblemente de partes aguas arriba de la cuenca.

Se sabe que las coladas de lava no son continuas a diferencia de las cenizas y lahares. Las variaciones litológicas pueden influir en los niveles del acuífero y en la distribución de las isofreáticas. La descarga ocurre hacia los ríos y quebradas permanentes como flujo base (acuífero efluente) y en menor porcentaje por medio de pozos para distintos usos. Por lo general las quebradas permanentes de la zona tienen conexión hidráulica con los niveles colgados superiores.

Acuíferos inferiores

La Formación Tiribí se toma generalmente como un acuitardo, aunque en ciertas zonas al oeste del Valle Central se conoce de su alto potencial acuífero. Estos materiales son de regular permeabilidad pero alta porosidad, permite la conexión hidráulica con el acuífero inferior, que en este caso podría tratarse del Colima Superior o La Libertad.

Los acuíferos en la Formación Colima se recargan por medio de una percolación vertical desde las unidades sobre yacientes (Formación Tiribí) y de una recarga a nivel regional que posiblemente ocurre en las partes montañosas al noreste de San José en los cerros del Zurquí y en las partes al oeste del volcán Irazú.

Los acuíferos Colima Superior y La Libertad se desarrollan en los estratos brechosos y fracturados de las coladas de lava andesíticas, separadas por capas de toba fina de 10m de espesor en promedio (SENARA-BGS, 1985), son capaces de rendir hasta 100 l/s en pozos.

2.3 Propiedades básicas del acuífero subyacente

Para tener un panorama claro de las características hidráulicas de los acuíferos subyacentes en los lahares y lavas es necesario contar con mayor información de pruebas de bombeo de los pozos alrededor del área de estudio. El coeficiente de almacenamiento por lo general ronda los 10^{-4} indicativo de acuíferos semiconfinado hasta confinados.

De acuerdo con los reportes de los pozos el nivel freático para el acuífero superior en la Lavina ronda los 10m de profundidad. Además se reporta un acuífero inferior a profundidades superiores a los 50m de profundidad, se cataloga como un acuífero confinado de moderado potencial.

El flujo de agua subterránea es variable y predomina hacia el WSW, variando localmente hacia los valles aluviales de los ríos y quebradas, lo que sugiere una conexión hidráulica con dichos cuerpos de agua, por ende se podría definir un acuífero efluente en las quebradas y ríos.

2.4 Análisis de vulnerabilidad a la contaminación

2.4.1 Aplicación del método de vulnerabilidad G.O.D.

Para el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero desarrollado en la Lavina (Acuífero Metropolitano) se usará el Método "G.O.D". (por sus iniciales en inglés), el cual considera dos factores básicos:

- El grado de inaccesibilidad hidráulica de la zona saturada
- La capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada del acuífero (Foster et al., 2002).

El índice de vulnerabilidad G.O.D. caracteriza la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en función de los parámetros:

- Grado de confinamiento hidráulico
- Ocurrencia del sustrato suprayacente
- Distancia al nivel freático

Para el área de estudio los valores asignados están en el Cuadro 4.

Cuadro 4
Aplicación del método GOD en el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero superior en los lahares o Lavina

PARÁMETRO	CLASIFICACIÓN	VALOR
Grado de confinamiento hidráulico	No confinado cubierto	0,60
Ocurrencia del sustrato suprayacente	Tobas volcánicas	0,60
Distancia al nivel del agua subterránea	5 - 20 metros	0,80
Valor del índice de vulnerabilidad	G x O x D	0,29
Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.	BAJA A MEDIA	

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero en la zona del proyecto se clasifica como baja a media (Figura 5, Diagrama G.O.D.). Se utilizó el acuífero como no confinado cubierto, debido al espesor de cenizas y tobas que lo cubren.

2.4.2 Amenaza de contaminación de las aguas subterráneas

Los proyectos de edificios dentro del Campus Universitario contarán con acceso al sistema colector de aguas negras de la zona de San Pedro, el cual es administrado por el AyA. Por lo tanto no se contempla la instalación de tanques sépticos o plantas de tratamiento de aguas residuales. En la zona de San Pedro y aun inclusive dentro del Campus Universitario, ya existen fuentes potenciales de contaminación, por la misma generación de aguas residuales de tipo ordinario.

2.6 Modelado hidrogeológico local

El acuífero principal en el AP se desarrolla dentro de las capas de tobas y los depósitos laháricos que conforman el subsuelo del AP. Este acuífero es de tipo poroso no confinado cubierto de bajo potencial, es sobreyacido por tobas de ceniza y otros piroclastos que funcionan como acuítardos. Se ubica aproximadamente a los 10m de profundidad y es capaz de rendir entre 0,5 y 3 l/s. Además se tiene un nivel profundo ubicado por debajo de los 50m, el cual se cataloga como un acuífero confinado de moderado a alto potencial alcanzando, según los registros de pozos, los 15 l/s.



La dirección de flujo de las aguas subterráneas es hacia el WSW siguiendo la misma dirección de flujo de la escorrentía superficial. La recarga se da en las partes altas de la zona al noreste y la descarga se da hacia los ríos permanentes efluentes de las partes más bajas de la cuenca y también por medio de pozos.

2.7 Síntesis de resultados y conclusiones hidrogeológicas

El modelo hidrogeológico local ha determinado que el acuífero somero en el AP se ubica dentro de lavas fracturadas intercaladas con tobas y lahares de baja permeabilidad y bajo potencial hidrogeológico, mientras que en profundidad se definen acuíferos fisurados en capas de lavas de alto potencial.

El acuífero somero se ubica aproximadamente a 10m de profundidad, se cataloga como un acuífero no confinado cubierto de bajo a moderado potencial, con caudales que van desde los 0,5 l/s hasta los 3 l/s. Se reporta un nivel a profundidades superiores a los 50m, caracterizado como un acuífero confinado de moderado a alto potencial, alcanzando según registros de pozos cercanos al AP un caudal de 15 l/s.

El análisis de la vulnerabilidad a la contaminación en el acuífero del AP resultó ser baja a media de acuerdo con el método GOD. Esto debido a las capas limosas por la meteorización de las tobas y lahares, y a la profundidad del nivel freático.

Se concluye que la geopotitud hidrogeológica del AP es favorable ya que no representa una amenaza de contaminación a las aguas subterráneas que se ubican en la zona y en especial al Acuífero Metropolitano.

2.8 Discusión sobre limitantes de incertidumbre y alcance del estudio

Dentro de los alcances de este estudio está la conceptualización de un modelo hidrogeológico local del acuífero en el AP, el mismo se ha definido con base en la correlación geológica con las unidades existentes y la información sustraída de los reportes de perforaciones cercanas.

La principal limitante técnica en este apartado es la falta de información de pruebas de bombeo y de los parámetros hidrogeológicos de los lahares para determinar las características del acuífero Metropolitano.

3. AMENAZAS Y RIESGOS NATURALES DEL AP

Se realiza a continuación el estudio de estructura y amenazas y riesgos naturales del AP de conformidad con lo establecido en la Sección IV del anexo 6 del Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental.

3.1 Estructura geológica local y susceptibilidad a las amenazas

Desde el punto de vista morfotectónico el AP se ubica dentro del arco volcánico de Costa Rica, sobre una unidad de lahares y cenizas que cubre gran parte del este del Valle Central Occidental, esta unidad sobre yace depósitos de ignimbritas y coladas de lava del paleo Irazú, finalmente la secuencia es coronada por capas de tobas y cenizas.

Por la génesis de los depósitos laháricos es común la formación de cerros alargados en el sentido de la dirección del flujo. Las coladas de lava inferiores tienen formas alargadas y tabulares y están cubiertas por espesores decamétricos de lahares y cenizas por lo que se dificulta su delimitación. Las unidades en general son discordantes entre sí, separadas por tiempos de relativa quietud volcánica, que se representa con la intercalación de paleo suelos.

Desde el punto de vista estructural el este de San José está afectado por varios sistemas de fallas neotectónicas, lineamientos y plegamientos asociados, tanto al sur como al este del AID. Varias evidencias morfotectónicas en superficie sugieren la existencia de las fallas como se verá más adelante.

Dentro de las principales amenazas naturales para el AP están la sismicidad asociada a las fallas activas del Valle Central de Costa Rica y en especial a las del este de San José y la amenaza volcánica del Irazú por caída de piroclastos y lluvia ácida principalmente.

3.2 Fallas geológicas

Existen numerosas fallas neotectónicas en el Valle Central que podrían afectar el proyecto por su relativa cercanía, están claramente identificadas en el Mapa Sismológico y Neotectónico de la Gran Área Metropolitana, escala 1:200 000 (Montero, 1993) y en el Atlas Tectónico de Costa Rica, hoja San José, escala 1:600 000 (Mapa Tectónico Regional).

Estas fallas, en el cantón de Montes de Oca al norte del AP por ejemplo, han sido identificadas utilizando fotointerpretación y criterios geomorfológicos, las principales son la falla Cipreses, Lara, Río Azul, Agua Caliente, catalogadas como activas y Dorita 1 y 2, Rancho Redondo y Laguna son neotectónicas. Las fallas Guarco y Coris son extensiones del sistema de falla Agua Caliente.

Sistema de falla Lara: se localiza a unos 10km al noreste del AP, según Montero *et al.* (1998) consiste de 4 fallas con segmentos de desplazamiento orientados con rumbo NO e inclinación al

SO (fallas Lara, Rancho Redondo, Laguna y Dorita), el segmento principal es la falla Lara, tiene una extensión de 18km, es de tipo dextral.

La falla Laguna presenta un lineamiento en dirección NNO a lo largo de 5,5km, con facetamientos o escarpes de 25 a 30m de altura, también sillas de falla, valles alineados, bermas, colinas alargadas, contraescarpes y ríos desplazados, los depósitos volcánicos no han sido afectados (Camacho *et al.*, 2004).

La falla Dorita presenta dos lineamientos, uno con rumbo NNO y el otro NO, tienen 6,7 y 5,5 km de longitud y presenta al igual que la falla Laguna varias evidencias morfotectónicas (Camacho *et al.*, 2004). Las fallas Laguna y Dorita son consideradas neotectónicas. La falla Rancho Redondo definida por Montero *et al.* (1998) tiene una orientación NE y una longitud de 8km.

Falla Cipreses y pliegues asociados: es la fuente sísmica de mayor peligro para el AP. La traza de la falla corresponde con un pliegue sinclinal que pasa cerca del río Pío, se considera como una falla activa debido a los desplazamientos en capas de suelos (Camacho *et al.*, 2004). Esta falla tiene un rumbo E-O y presenta escarpes entre 30 y 40m de altura, tiene una longitud estimada en 8km. En su extremo oeste y sur corresponde con una serie de superficies geomorfológicas abovedadas de rumbo NW a EW y que se ubican entre Granadilla y Tres Ríos, estas geoformas se relacionan con una secuencia de pliegues anticlinales y sinclinales (Fernández & Montero, 2002).

Falla Agua Caliente: ubicada al sureste del AP, se presenta geomorfológicamente como alineamientos de promontorios truncados, contraescarpes en depósitos recientes, valles y fuentes termales alineados, lomos de falla y sillas de falla (Fernández & Montero, 2002). Es una falla sinuosa con rumbo variable entre NW, EW y WNW en sus sectores oeste, central y este respectivamente. Se han identificado depósitos del Cuaternario Superior cortados por fallas inversas asociadas a esta falla (Fernández & Montero, 2002). Esta falla tiene un movimiento predominante sinistral con una zona transtensiva entre Quebrada Honda y Bermejo al sur de Cartago.

Falla Río Azul: se ubica a escasos 2km al sureste del AP, tiene un rumbo E-NE y una longitud de 5km. Se ha inferido que su trazo alcanza el límite oeste entre los cantones de San José, Curribadad y Montes de Oca, por lo que representa un gran peligro debido a la proximidad con zonas de alta densidad de población. Presenta un valle profundo en la quebrada Quebradas, también sillas de falla, espolón truncado y facetamiento triangular (Fernández & Montero, 2002).

Propiamente dentro del AP no hay evidencia de fallamiento, ninguna de las descritas anteriormente tiene su trazo dentro del AP o AID.

3.3 Potencial de licuefacción

Por las características de los suelos de alta consistencia, el alto porcentaje de granulometrías finas y la presencia de nivel freático somero, se considera que no existen condiciones para que se presenten suelos potencialmente licuables en el AP.

3.4 Sismicidad

Este es quizás el factor de amenaza más importante a tomar en cuenta en el AP y AID y para toda obra de infraestructura en el Valle Central. La sismicidad en el AP y AID está muy vinculada con la presencia de las fallas antes mencionadas y otras que podrían causar efectos en la zona y que están ubicadas en otros bloques tectónicos del país, como es el caso de Puriscal y Pacífico Central por ejemplo. La principal fuente sísmica del Valle Central corresponde con el Sistema de Fallas Transcurrente de Costa Rica.

Varios sismos se han originado en el este y sureste del Valle Central con magnitudes (M_s) entre 5,4 y 6,4 e intensidades registradas en San José entre V y VIII (MM). Dentro de la sismicidad histórica para la zona hay registros de actividad de la Falla Lara, a la que se le asocia el terremoto de San Antolín de 1841 (M 6,5) (Peraldo y Montero, 1999). Según Camacho *et al.* (2004) para el período 1992-2002 hay registros de 181 sismos en el este de San José donde se ubica el AP, con profundidades menores a 30km (origen cortical) con magnitudes (M_L) entre 1,3 y 4,8. La mayoría de los epicentros se ubican cerca del trazo de la falla Lara. Por ejemplo, en el 2001 se produjeron cinco sismos sentidos con epicentros en los alrededores de Curridabat, alcanzaron aceleraciones máximas entre 0,0066 y 0,0306 g., son asociados a las fallas Agua Caliente o Río Azul.

Desde el siglo XIX se han registrado sismos importantes en la zona que comprende San José y Cartago, en el cuadro 5 se da una lista de los principales sismos según Rojas (1993).

Cuadro 5
Temblores históricos de la zona comprendida entre San José y Cartago
(Rojas, 1993)

Número	Nombre	Fecha	Magnitud (M_s)	Daños
1	Cartago	02-09-1841	6,0-6,5	Dstrucción de Cartago, 38 muertos
2	Alajuelita	1842	5,0-5,5	Daños en Alajuelita
3	Tablazo	13-04-1910	5,8	Daños en Desamparados
4	Cartago	04-05-1910	6,4	Dstrucción de Cartago y Paraíso, 600 muertos
5	Tres Ríos	1912	5,0-5,5	Daños en Tres Ríos
6	Paraíso	1951	5,4	Daños en Paraíso y Orosí

De acuerdo con el Código Sísmico de Costa Rica 2002 el proyecto se ubica en la zona sísmica III y los suelos son de tipo S_3 .

En el mapa de distribución de zonas sísmicas en Costa Rica (Fernández & Rojas, 2000) el AP se ubica en la zona 15 llamada Escazú-Guarco, donde el número anual de sismos de magnitud M mayor a 4,5 es de 0,0865 con un valor medio probable de máxima magnitud M que podría generar la fuente de 6,5 a una profundidad entre 1 y 15km y la aceleración horizontal máxima 35% de g.

Los sismos que más han afectado la zona se han producido en fallas corticales como las descritas anteriormente, esos ocurren a profundidades relativamente someras menores a 15 km y de ahí que su potencial de destrucción sea alto, aunado a que se dan en zonas con altas densidades de población como es el caso de San José.

Las características geomorfológicas y geológicas del terreno del AP lo hacen favorable para la construcción pues son áreas estables donde no ocurrirán efectos como agrietamientos o deslizamientos. En las cercanías de las zonas de fuerte pendiente, que no son comunes en este caso, es posible que ocurran deslizamientos si existe peso adicional a los suelos y además taludes mal diseñados.

3.5 Amenaza volcánica

El volcán más cercano al AP es el Irazú a unos 20km al este, también podría ocurrir afectación desde el volcán Turrialba pero en menor grado. Las estructuras volcánicas que lo conforman son escudos volcánicos cráteres y conos, tiene una altura máxima de 3432 msnm, ha presentado actividad histórica en los años 1723, 1917-20, 1924, 1928, 1930, 1933, 1939-40, 1962-65 y 1994. El volcán Irazú ha mantenido una actividad constante de tipo solfatárica-fumarólica y rara vez emisiones de vapor, la actividad ha sido principalmente de tipo vulcaniana. La última actividad significativa fue durante 1994 que presentó una pequeña explosión freática que produjo ceniza, bloques, arena y lodo, las partículas más finas se extendieron hasta 22km al oeste del volcán.

Se tienen datos de actividades prehistóricas basándose en dataciones con ^{14}C en los años 1560, 1080, 770, 670 y 390 d.C. y 600 a.C., la actividad ha sido principalmente vulcaniana, también estromboliana, freática, efusiva y lahares (Alvarado et al., 2000). En el siguiente cuadro se resumen los períodos eruptivos del volcán Irazú.

Cuadro 6
Períodos eruptivos históricos más importantes del volcán Irazú
(Tomado de Alvarado, 1993)

Año	Tipo de erupción	Comentario
1723-1726	Estromboliana fuerte a vulcaniana	Columnas eruptivas de ceniza de varios km de altura. Ceniza dispersada en el Valle Central, la más fuerte en tiempos históricos, hubo lahares en 1723 y 1724
1917-1921	Freática a vulcaniana	Ensanchamiento de los cráteres en el sitio actual del principal. Caída de cenizas a varios km de altura, en San José cayeron 16 g/m^2 de ceniza y al este de la capital cayeron 36 g/m^2 .
1962-1965	Estromboliana y vulcaniana	Proyección de cenizas a varios km de altura. Dispersión hacia el oeste-suroeste principalmente, incluyendo la península de Nicoya. Afectó mucho al Valle Central. Hubo lahares que mataron a cerca de 20 personas en Taras el 9/12/1963

Los peligros del volcán Irazú a corto plazo son principalmente caída de cenizas sobre San Pedro, como ocurrió en el periodo de 1963-1965, caída de bloques y lahares. Mientras que el peligro a largo plazo es actividad de tipo vulcaniana a estromboliana, lahares y deslizamientos volcánicos y formación de nuevos conos.

Las afectaciones a las obras que se construirán en el AP serán principalmente caída de cenizas, caída de bombas en caso de erupciones tipo plinianas o de ultraplinianas y lluvia ácida. Las

estructuras deberán estar diseñadas con los soportes necesarios (vigas de acero por ejemplo) para aguantar el peso de la ceniza acumulada en el techo del edificio principal, la misma debe ser removida a la mayor brevedad para evitar cualquier inconveniente o colapso por acumulación. Por otra parte se deben seguir las instrucciones de la Comisión Nacional de Emergencias en caso de alerta o actividad del volcán Irazú o Turrialba.

3.6 Síntesis de resultados y conclusiones geológicas

El AP se ubica en el Valle Central catalogado como una zona altamente sísmica por la presencia de numerosas fallas neotectónicas y activas que en el pasado han provocado daños a la población, entre las principales fallas están Cipreses, Lara, Río Azul y Agua Caliente activas y Dorita, Rancho Redondo y Laguna neotectónicas. Las fallas han sido identificadas con base en fotointerpretación y evidencias morfológicas del terreno. La mayor actividad está asociada a la falla Lara ubicada al noreste del AP, otras importantes que han generado sismos de baja magnitud son la falla Río Azul y Agua Caliente.

Entre San José y Cartago han ocurrido sismos de importante magnitud que provocaron daños a la población, tal es el caso del sismo de Cartago en 1841 y 1910 con magnitudes superiores a 6,0 y en Tres Ríos, Paraíso y Alajuelita con magnitudes superiores a 5,5, algunos de los cuales inclusive produjeron muertes. Según Fernández & Rojas (2000) el AP se ubica en la zona 15 llamada Escazú-Guarco, donde el número anual de sismos de magnitud M mayor a 4,5 es de 0,0865 con un valor medio probable de máxima magnitud M que podría generar la fuente de 6,5 a una profundidad entre 1 y 15km y la aceleración horizontal máxima 35% de g.

Por las características topográficas y geomorfológicas del terreno del AP, durante un sismo es de esperar que la respuesta sea favorable pues en el AP predomina la baja pendiente y los suelos con un potencial de licuefacción nulo.

El volcán más cercano al AP es el Irazú a unos 20km al este, ha presentado actividad desde 1723 y hasta 1994 de tipo solfatárica a fumarólica, rara vez emisiones de vapor y actividad de tipo vulcaniana, la última explosión en 1994 produjo ceniza, bloques, arena y lodo que se extendieron hasta 22km al oeste del volcán. A corto plazo los peligros del volcán Irazú son caída de cenizas sobre, caída de bloques y lahares, de lo anterior sólo lo primero afectaría al AP directamente. Las obras tendrán soportes suficientes para aguantar acumulaciones de ceniza sobre el techo, sin embargo se recomienda su remoción rápidamente en caso de que ocurriera.

El terreno desde el punto de vista de las amenazas naturales muestra una geoaptitud medianamente favorable ya que existe amenaza natural por la alta sismicidad de la zona y la cercanía al volcán Irazú. Entre las limitantes técnicas está la calidad del suelo del AP, el cual, ante aceleraciones sísmicas, puede producir asentamientos en las obras si las mismas no cuentan con las cimentaciones adecuadas. Por otro lado, el edificio debe tener capacidad para soportar la acumulación de ceniza en caso de un evento del volcán Irazú.

El AP muestra una geoaptitud medianamente favorable para el desarrollo de infraestructura debido a la alta sismicidad que caracteriza al este del Valle Central Occidental y a la influencia directa que tendría una eventual erupción del volcán Irazú como la ocurrida en 1962-65 y 1994. Las limitantes citadas deberán obligar a que los diseños del edificio contemplen los reglamentos



estipulados en el Código Sísmico para este tipo de construcciones. Si se contemplan las medidas de diseño adecuadas entonces las obras son viables.

3.7 Discusión sobre limitantes de incertidumbre y alcance del estudio

El alcance de este apartado está dado por información sísmica y vulcanológica de estudios anteriores realizados en la zona y en el resto del Valle Central así como por observaciones de campo. El terreno se muestra poco complejo y el potencial de amenaza natural es mediano (alta sismicidad y amenaza volcánica latente), se considera incertidumbre el volumen de ceniza que podría caer en un determinado tiempo en el AP ante una eventual actividad del Irazú, ya que podría afectar fuertemente cualquier obra civil de la zona.

Los resultados son aplicables para definir el diseño antisísmico de las obras, tomando en cuenta la sismicidad de la zona con base en las intensidades y magnitudes de eventos históricos que la han afectado, dichos resultados son aplicados para el AP y su AID inmediata, toda vez que las condiciones topográficas no varíen. Se concluye que el proyecto es viable desde el punto de vista geológico y de las amenazas y riesgos naturales de la zona, siempre y cuando se tomen en cuenta los lineamientos del Código Sísmico para la construcción de infraestructura y las recomendaciones que se hagan respecto a esto en el estudio de suelos y siguiendo los lineamientos del Código Sísmico.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, G.E., 1993: Vulcanology and petrology of Irazú volcano, Costa Rica. -261 págs. Univ. de Kiel, Alemania [Tesis Doctorado]
- CAMACHO, D., CHAVEZ, J. & MURILLO, D., 2004: Diagnóstico de la susceptibilidad al deslizamiento e inundación, análisis del contexto sísmico y reconocimiento de peligros volcánicos para el cantón de Montes de Oca: una contribución al plan regulador del municipio. -106 págs. Escuela Centroam. de Geología, Univ. de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica. [Tesis de Lic.]
- BERGOEING, J.P., 1998: Geomorfología de Costa Rica. -1 ed. -409 págs. Instituto Geográfico Nacional, San José, Costa Rica
- DENYER, P. & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica. -Rev. Geol. América Central, 12: 1-59.
- DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G.E., 2003: Atlas tectónico de Costa Rica. -1 ed. - Editorial de la Universidad de Costa Rica, San José, C.R. -79 págs
- FERNÁNDEZ, M. & ROJAS W., 2000: Amenaza Sísmica y por Tsunamis. -En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (comp): Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago. -págs 287-301



- FERNÁNDEZ, M. & MONTERO, W., 2002: Fallamiento y sismicidad del área entre Cartago y San José, valle Central de Costa Rica. –Rev. Geol. de Amer. Central, 26: 25-37.
- KUSSMAUL, S., 1988: Comparación petrológica entre el piso volcánico del Valle Central y de la cordillera Central de Costa Rica. –Ciencia y Tecnol. 12(1-2): 109-116
- KUSSMAUL, S., 2000: Estratigrafía de las rocas ígneas. –En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (comp.): Geología de Costa Rica. –Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago. Págs 63-86.
- KRUSHENSKY, R.D., MALAVASSI, V.E. & CASTILLO, M.R., 1976: Mapa de reconocimiento geológico y cortes transversales de Costa Rica, América Central. –U.S. Geol. Survey-MEIC, Series map. 1-899 (1:100000), Arlington.
- MADRIGAL, R. & SALAZAR, G., 1993: Mapa geomorfológico de la Gran Área Metropolitana, escala 1:200 000. En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (Comp): Atlas geológico del Gran Área Metropolitana. Editorial tecnológica de Costa Rica, Cartago.
- MONTERO, W., DENYER, P., BARQUERO, R., ALVARADO G.E., COWAN, H., MACHETTE, M., HALLER, K. & DART, R., 1998: Maps and data base of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. 33 págs. File Report 98 (481).
- PANIAGUA, S., 1993: Mapa de amenaza volcánica de la Gran Área Metropolitana, escala 1:200 000. En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (Comp): Atlas geológico del Gran Área Metropolitana. Editorial tecnológica de Costa Rica, Cartago
- PERALDO, G. & MONTERO, W., 1999: Sismología histórica de América Central. -347 págs. IPGH, México.
- SALAZAR, L.G., 2000: Geomorfología. –En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (comp.): Geología de Costa Rica. –Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago. Págs 63-86.



5. FIGURAS