

PROTOCOLO PARA ESTUDIO GEOLÓGICO DEL TERRENO (INTEGRADO)

PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE RADIAL RN1 – SARCHÍ NORTE

LOCALIZACIÓN: Provincia: Alajuela Cantón: Naranjo, Grecia y Sarchí Distrito: Sarchí Norte, Sarchí Sur, Bolívar, San Roque, Grecia, Puente de Piedra, El Rosario, San Miguel y Naranjo

DESARROLLADOR: CONAVI

PROFESIONAL QUE ELABORA EL ESTUDIO: Profesional Geología

Nombre del profesional: Xinia Jimenez Zumbado

Número de cédula: 6 0186 0828 **Número de colegiado:** 267 CGCR

Registro SETENA: CI-070-2002 Vigencia: 19-12-2019

DOCUMENTO DE RESPONSABILIDAD PROFESIONAL

El / La suscrito (a) **Xinia Jiménez Zumbado**, portador(a) de la cédula de identidad número, seis cero ciento ochenta y seis cero ochocientos veintiocho, profesional en **GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGIA**, manifiesto ser responsable directo de la información técnica científica que se aporta en el presente documento, la cual se elaboró para el proyecto denominado: **Construcción Radial RN1-Sarchí Norte**, el cual se desarrollará en el plano catastrado numero: **No aplica**, finca número: **No aplica**

En virtud de ello, someto el presente Estudio de Geología Básica del Terreno al conocimiento de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), como autoridad en materia de Evaluación de Impacto Ambiental del Estado costarricense, con el objetivo que sea analizado y se constate que el mismo ha cumplido con los lineamientos técnicos y normativos establecidos. Tengo presente que en apego al artículo 5 del Decreto Ejecutivo 32712-MINAE, la información contenida en este estudio se presenta bajo el concepto de Declaración Jurada, a conocimiento y conciencia de que dicha información es actual y verdadera y que, en caso contrario, pueden derivarse consecuencias penales del hecho. Por lo cual, manifiesto que, de encontrarse alguna irregularidad en la información, seré responsable no sólo por esta falta, sino también por las consecuencias de decisión que a partir de la información suministrada pudiera incurrir la SETENA y el desarrollador.

Atentamente.



Firma del profesional o profesionales responsables.

Fecha de emisión : 27-11-2019

Tabla de contenido

1. Resumen.....	5
Resumen de resultados.....	5
Resumen de conclusiones técnicas.....	5
2. Introducción.....	5
Datos sobre la finca estudiada.....	5
Coordinación profesional realizada.....	5
Objetivos del estudio.....	5
Metodología aplicada para llevarlo a cabo.....	5
Unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior, descripción básica de las unidades y sus atributos litopetroficios fundamentales.....	5
Formación Depósitos de Avalancha Ardiente (o Fm. Tiribí).....	6
Unidad Tobas de Lapilli del Poás y Unidad Bajos del Toro.....	6
Descripción espacial de las unidades geológicas locales y descripción de parámetros físicos fundamentales.....	8
Formación Depósitos de Avalancha Ardiente (o Fm. Tiribí).....	8
Espesor y geometría.....	8
Textura (granulometría, fabrica, selección), composición, grado de alteración.....	8
Porcentaje de arcillas en la unidad.....	8
Consistencia geotécnica y cohesión.....	9
Fracturación y diaclasamiento.....	9
Estratificación.....	9
Porosidad y permeabilidad.....	9
Unidad Tobas de Lapilli del Poás y Unidad Bajos del Toro.....	9
Espesor y geometría.....	9
Textura (granulometría, fabrica, selección), composición, grado de alteración.....	9
Porcentaje de arcillas en la unidad.....	9
Consistencia geotécnica y cohesión.....	9
Fracturación y diaclasamiento.....	9
Estratificación.....	10
Porosidad y permeabilidad.....	10
Integración con los datos del estudio geotécnico.....	10
Contextualización rápida respecto a los datos geológicos regionales relevantes.....	10
Datos geomorfológicos relevantes procesos de erosión – sedimentación, datos de geodinámica externa relevantes.....	10
Unidades de pendiente.....	11
Rasgos geomorfológicos más conspicuos.....	11

Cauces en el AP identificar y delimitar el cauce mayor y sus terrazas de inundación (valle de inundación)	11
Procesos geológicos geodinámica externa,	11
Evidencias o indicios de los procesos de erosión y sedimentación (surcos, canales, cúmulos sedimentarios naturales o artificiales, meteorización, erosión del perfil de suelo).	11
Síntesis de resultados y conclusiones geológicas	12
Síntesis de la condición geológica básica del terreno y mapa local de las unidades,.....	12
Sintetizar los datos obtenidos de la geología y geomorfología del terreno.....	12
Mapa local con el croquis explicativo	12
Discusión sobre las limitantes de incertidumbre y alcance del estudio	12
Aplicabilidad de los resultados.	12
Tareas pendientes para fases posteriores de la actividad, obra o proyecto.....	12
Incertidumbres no resultas	13
Conclusión general sobre la viabilidad geológica del terreno en virtud de la obra a desarrollar.	13
DATOS SOBRE LA HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL	13
Datos hidrogeológicos del entorno inmediato.....	13
Resumen de los datos hidrogeológicos disponibles para la subcuenca o microcuenca hidrogeológica en la que se localiza el terreno.	13
Datos de publicaciones científicas o mapas hidrogeológicos disponibles.	13
Datos hidrometeorológicos, registros de pozos y manantiales	13
Clima.....	13
Condiciones hidrogeológicas locales y caracterización básica del acuífero subyacente, así como propiedades básicas del acuífero subyacente.	15
Identificación y descripción básica de las unidades hidrogeológicas del terreno	15
Relación con datos de unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior.	15
Características petrográficas, estructurales y físicas y su comportamiento hidrogeológico.	16
Realización de ensayos de porosidad y permeabilidad para las unidades aflorantes (según criterio del profesional responsable).	17
Descripción de las propiedades básicas del acuífero más superior y cercano a la superficie del suelo que se encuentra bajo el terreno.....	17
Profundidad del nivel freático.	17
Extensión aproximada del acuífero	18
Propiedades hidráulicas básicas obtenidas de datos, incluyendo dirección de flujo y gradiente hidráulico del agua subterránea.	18
Identificación y caracterización de manantiales cercanos al terreno (dentro del AP o en los linderos de la misma.	18
Síntesis de resultados y conclusiones hidrogeológicas, análisis de vulnerabilidad a la contaminación basado en el modelo hidrogeológico local.....	19

Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero y evaluación del tiempo de tránsito del agua subterránea.....	19
Modelado básico de vulnerabilidad a la contaminación utilizando como guía, la metodología GOD y la ficha que se señala en la Sección VII del presente Anexo 6.	19
Aplicación de la metodología para evaluación de tiempos de tránsito de contaminantes.	19
Determinación, en caso necesario, de los tubos de flujo del agua subterránea en pozos y manantiales identificados dentro del AP o sus linderos.	23
Identificación de fuentes potenciales de contaminación de agua subterránea dentro del AP o sus linderos.	24
Modelado hidrogeológico local.....	24
Elaborar un modelo conceptual que incluya la definición del tipo de acuífero.....	24
Discusión sobre las limitantes de incertidumbre y alcance del estudio	26
Aplicabilidad de los resultados	26
Tareas pendientes para fases posteriores de la actividad, obra o proyecto.....	26
Incertidumbres no resueltas.	26
Conclusión general sobre la viabilidad hidrogeológica del terreno en virtud de la obra a desarrollar.....	26
DATOS SOBRE LA CONDICIÓN DE AMENAZAS/RIESGOS NATURALES	27
Evaluación de la amenaza / riesgo por fallamiento geológico, sismicidad y potencial de licuefacción.....	27
Estructura de geología local y susceptibilidad a las amenazas	27
Distribución y geometría de las unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior.	27
Buzamientos y tendencias estructurales.	27
Presencia de fallas geológicas o discontinuidades geológicas que limiten las unidades.	27
Elaboración un perfil geológico que interprete la situación geológica y de estructura de las unidades superficiales y del subsuelo superior.....	27
Fallas Geológicas	27
Caracterizar la falla y calificarla según su potencial inactividad o actividad. Definir área de amortiguamiento (“buffer”) en caso necesario.	29
Sismicidad.....	29
Establecer posible vínculo entre sismicidad y fallamiento geológico local.....	29
Potencial de Licuefacción.....	30
Evaluación de la amenaza / riesgo por estabilidad ladera y actividad volcánica	31
Amenaza riesgo por estabilidad de ladera (taludes)	31
Sección sexta del estudio de geología básica de la finca, específicamente: Datos geomorfológicos relevantes procesos de erosión-sedimentación, datos de geodinámica externa relevantes	32
Amenaza volcánica	32
Potencial de proyección balística	33

Afectación por caída de ceniza	33
Afectación por acidificación	33
Potencial de flujos de lava.....	33
Potencial por flujos piroclásticos	33
Potencial de las oleadas piroclásticas	33
Lahares	34
Establecimiento de medidas preventivas o de ajuste y adaptación del diseño de la obra.	34
Mapa de peligros para el volcán Poás	34
Síntesis de resultados y conclusiones geológicas	34
Discusión sobre las limitantes de incertidumbre y alcance de estudio.	35
Alcance del estudio	35
Aplicabilidad de los resultados	35
Tareas pendientes para las fases posteriores del proyecto	35
Incertidumbres no resueltas	35
Conclusión genera sobre la viabilidad geológica del terreno en virtud de la obra a desarrollar. .	35
Referencias bibliográficas.	36

1. Resumen

Se describen a continuación, los componentes que se indican en los términos de referencia de los D1.

Resumen de resultados

Se pretende desarrollar una radial que una la carretera panamericana con el distrito de Sarchí. Esta obra se va a desarrollar principalmente en las laderas de materiales tobáceos y arcillosos poco o mal soldados. Estas laderas son generalmente inferiores al 30%. La red hídrica ha erosionado cañones en los depósitos volcánicos. El proyecto atraviesa estos cañones por medio de puentes, manteniéndose principalmente en los sectores de menor pendiente. En la información de pozos cercanos no se observa un nivel freático en las formaciones con las que interactúa directamente el proyecto. El proyecto se encuentra en un sector sísmicamente activo.

Resumen de conclusiones técnicas

De acuerdo con la información disponible el proyecto es factible siempre y cuando se tenga un adecuado manejo de las aguas de escorrentía, se tomen las medidas geotécnicas necesarias para evitar la erosión hídrica en los movimientos de tierra y se asegure la estabilidad de los cortes y taludes de la vía diseñada.

2. Introducción

Esta sección al menos debe contener

Datos sobre la finca estudiada

Las obras se van a desarrollar sobre el derecho de vía marcado por el CONAVI, una vez que se identifique la alternativa definitiva se incorporarán los planos que se requieran.

Coordinación profesional realizada

Se realizaron visitas a campo y trabajo de gabinete. Se revisó la bibliografía existente en la base de datos de la biblioteca de la escuela de geología de la Universidad de Costa Rica y se utilizaron informes propios del desarrollador.

Objetivos del estudio

El presente estudio busca describir los elementos del ambiente físico que podrían interactuar con la realización de una radial entre la ruta nacional 1 y la ruta nacional 118. Se describirá la geología local y los principales elementos geomorfológicos. Con base en el análisis de estos datos se determinará de manera preliminar si es o no viable el proyecto desde el punto de vista geológico.

Metodología aplicada para llevarlo a cabo.

Para la realización de este estudio se realizó trabajo de campo y se tomó información de la bibliografía existente así como de los informes específicos realizados para este proyecto como "ANÁLISIS DE RIESGO A DESASTRES PROYECTO RADIAL SARCHÍ" y "ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA PUENTE RÍO COLORADO, PROYECTO VIAL ENTRE LA RN 1 Y RN118". En la bibliografía existente destaca la existencia de la hoja geológica Naranja, escala 1:50.000 donde se tiene el detalle del área del proyecto.

Unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior, descripción básica de las unidades y sus atributos litopetrofícos fundamentales

Formación Depósitos de Avalancha Ardiente (o Fm. Tiribí)

Corresponde con depósitos de ignimbritas que afloran en todo el sector norte y noroeste del Valle Central. Estas rocas fueron descritas por primera vez por Williams (1952). Por lo general, la secuencia está constituida de la base hacia el techo por depósitos de caída de pómez (hasta 3 m de espesor), flujos de cenizas, lapilli y bloques, ignimbritas grises con “fiamas” y coronan la secuencia otros depósitos de caída, para un total aproximado de 150 m de espesor (SENARA-BGS, 1985). Varios autores han propuesto subdivisiones en miembros (Castillo, 1969; Echandi, 1981). Según estudios geoquímicos de Kussmaul (1988), estos materiales no fueron expulsados por los estratovolcanes. Ya Williams (1952), había propuesto erupciones explosivas fisurales. Denyer y Arias (1991), relacionan estas ignimbritas con las de San Gabriel (Formación Grifo Alto) y sugieren que la serie se desarrolló a partir de varios centros de emisión (calderas) ubicadas a lo largo de un eje noroeste-sureste desde San Gabriel a Cerro Minas y hasta Atenas, como emisiones tardías de un antiguo arco volcánico. Esta Formación yace sobre las Formaciones Lavas Intracañon, Pacacua, Peña Negra, Grifo Alto y La Cruz y está sobreyacida por aluviones, Formación Lahares y Cenizas y la Formación Barva. Se le atribuye una edad del Pleistoceno.

En el pozo NA205 ubicado al NO del proyecto, se describe la presencia de un flujo de pómez interactuando con los depósitos de tobas a partir de los 25m de profundidad: material arcilloso con 50% de arena, color blancusco y permeabilidad aparente regular; Material arenoso color blancusco, fragmentos de lava, toba y pómez, permeabilidad aparente regular; Material color blanco, presenta aproximadamente 15% de arcilla, posiblemente se trata de una pómez, permeabilidad aparente regular.

Unidad Tobas de Lapilli del Poás y Unidad Bajos del Toro

En las descripciones de los pozos cercanos al proyecto no se distinguen estas dos unidades, principalmente porque el espesor de las tobas de lapilli del Poás es muy escaso. Los cinco pozos con datos más cercanos al AP y que atraviesan esta litología describen en sus primeros 30 a 40 metros toba de ceniza volcánica meteorizada, arcillosa y plástica, textura terrosa, color marrón de baja permeabilidad aparente.

En el Informe Análisis de Riesgo a desastres – Radial Sarchí el geólogo José Francisco Cervantes L. Hace la siguiente síntesis:

Alvarado & Carr, (1993) describen esta unidad como lavas basálticas y andesíticas intercaladas con flujos piroclásticos y otras rocas piroclásticas. Por su parte, Herrera et al., (1996) caracterizan la unidad por estar compuesta de lavas de composición variable, megabrechas, tobas y depósitos de nube ardiente. Señalan una edad de 0,4 Ma para los horizontes más jóvenes, sin embargo, debido a que esta unidad presenta espesores superiores a los 1 000 m, no se puede generalizar esta edad para toda la secuencia. El valle del río Toro se encuentra cubierto por depósitos de flujos piroclásticos superiores a los 60 m de espesor. Estos depósitos se presentan soldados y raramente se observan clastos pumíceos (Alvarado & Carr, 1993).

Herrera et al. (1996) en un trabajo detallado de la geología del área del Platanar – Porvenir diferenciaron dentro de esta unidad una serie de subunidades, las cuales se describen a continuación:

- Sección La Palmira: Esta subunidad presenta megabrechas compuestas por clastos andesíticos, subredondeados, decimétricos a métricos en una matriz de ceniza color amarillento parcialmente meteorizada y flujos piroclásticos conformados por tobas de ceniza en estratos centimétricos a decimétricos color café claro y pardo- amarillenta con líticos andesíticos – basálticos. Sobreyaciendo estas tobas se presentan depósitos de nube ardiente con un espesor no mayor a los 20 cm. En el contacto entre estas capas se observa una capa rojo ladrillo de unos 20 cm de espesor.

Estratigráficamente, Herrera et al. (1996) mencionan que las megabrechas subyacen a las tobas, las cuales a la vez se encuentran subyaciendo a los depósitos de nube ardiente y sobre la columna se presentan capas de cenizas formando suelos residuales.

- Flujos piroclásticos San José de la Montaña: secuencias de tobas de grano medio a fino, estratificadas con colores de amarillos a rosados. Estas sobreyacen depósitos de nube ardiente compuestos por una brecha escoriácea con fragmentos inferiores a los 2 mm, rojiza con escasa matriz.
- Flujos piroclásticos y lavas río La Vieja: Es una intercalación de tobas y depósitos de nube ardiente en capas centimétricas, todo el paquete es sobreyacido por lavas en bloques de composición andesítica, con textura porfirítica-afanítica con fenocristales de feldespato y piriboles de tamaño milimétrico en una matriz gris oscura, su espesor es de 9 m según indican Herrera et al. (1996).
- Megabrechas Zapote: se compone de clastos andesíticos escoriáceos subangulares con abundante meteorización. Los tamaños de estos clastos se encuentran entre los 5 cm y los 20 cm.
- Lavas Diferenciadas: Herrera et al. (1996) describen una serie de subunidades lávicas según su localidad (Lavas cerro El Siete, lavas Yurro Seco, lavas Lajas y lavas La Quina), sin embargo, se pueden agrupar bajo el nombre de "Lavas Diferenciadas".
- Petrográficamente todas las coladas de lavas representan andesitas con augita y magnetita, a excepción de las lavas Lajas las cuales corresponden con basaltos con augita.

Esta unidad aflora en gran parte del área del proyecto de la Radial Sarchí y la constituyen principalmente tobas con líticos no soldadas o pobremente soldadas. Se encuentra en la parte alta de los cerros.

La totalidad de las obras (a excepción de los bastiones de los puentes) se van a desarrollar en estas litologías. De acuerdo con la base de datos de pozos del SENARA, en los primeros 30 a 60m de profundidad no hay un acuífero regional. Las formaciones que conforman los primeros metros de suelo son de permeabilidad aparente baja, con mucha arcilla y meteorizadas por lo que no constituyen buenos acuíferos.

Cuadro 1 Pozos con información en las cercanías del proyecto

Pozo	Litología	NE (m.b.n.s.)
NA205	0-15: material arcilloso café de mala permeabilidad aparente. 15-25: Material arcilloso con 50% de arena, color blanusco y permeabilidad aparente regular. 26-34: Material arenoso color blanusco, fragmentos de lava, toba y pómez, permeabilidad aparente regular. 34-48: Material color blanco, presenta aproximadamente 15% de arcilla, posiblemente se trata de una pómez, permeabilidad aparente regular. 48-70: Ignimbrita color gris sana, presenta vidrio volcánico y permeabilidad aparente moderada. 70-75: material tobáceo color marron, presenta pequeños fragmentos de toba color gris, permeabilidad aparente buena (acuífero principal). 75-80 Material arcilloso café, contiene aproximadamente un 10% de fragmentos gruesos, permeabilidad aparente baja, probablemente una toba muy alterada.	70 (11)

NA517	0-42: Toba meteorizada, arcillosa y plástica, color marrón de baja permeabilidad. 42-66: Ignimbrita sana, un poco fracturada. Coloración gris oscuro a negro con obsidiana. 66-86- Toba meteorizada pero no presenta características arcillosas, con mucha pómez. Permeabilidad aparente alta. 86-106: Toba arenosa, meteorizada pero no arcillosa. Alta permeabilidad aparente. Contenido de pómez casi nulo. Hacia el final se hace más arcillosa. 106-112: toba arenosa, sana, permeabilidad aparente de baja a media. Algunas partes oxidadas. 112-119: Toba sana, soldada con características ignimbríticas.	66
NA521	0-60: toba meteorizada de color marrón, con fragmentos líticos de 1 a 2mm y algo de pómez, textura terrosa. 60-80: Ignimbrita sana, textura arenosa, color negro con partes escoriáceas y pumíticas. 80-95: Toba color crema claro con mucha pómez. 95-100: Material meteorizado no arcilloso. Pareciera una toba de textura arenosa gruesa. Permeabilidad aparente alta.	62.7
NA575	0-35: Toba formada principalmente por ceniza volcánica de color café claro, moderadamente alterada por meteorización y con poca permeabilidad aparente. 35-85: Lavas andesíticas de colores desde gris claro hasta negro. Grupo Aguacatem textura porfirítica con fenocristales de plagioclasas y piríboles.	54
NA605	0-15: Toba de ceniza volcánica de color café claro con baja permeabilidad aparente. 15-40: Toba de ceniza volcánica de color café claro, muy arcillificada por meteorización. Baja permeabilidad aparente. 40-48: Toba de ceniza volcánica de color café oscuro con un horizonte de pómez de color negro. Relativamente sana, suave y porosa. Buen acuífero. 48-62: Lava de color gris, composición andesítica y textura ligeramente porfirítica, con fenocristales de plagioclasas. Relativamente sana. Buena porosidad y permeabilidad aparente. 60-76: Toba de pómez de color blanco amarillento con coloración café claro por oxidación en el techo. Sana, bien soldada, muy porosa. Acuífero principal.	32

Fuente: GAPRO S.A. con base en SENARA 2018

Descripción espacial de las unidades geológicas locales y descripción de parámetros físicos fundamentales.

Formación Depósitos de Avalancha Ardiente (o Fm. Tiribí)

Espesor y geometría

Su extensión sobrepasa los 40 km al N y al NW del Valle Central. Su forma es bastante tabular acunándose al este. Su espesor máximo es de 150m.

Textura (granulometría, fabrica, selección), composición, grado de alteración.

Depósitos de pómez de caída de hasta 3m de espesor, flujos de ceniza, lapilli y bloques. Ignimbritas grises con "fiammes" de obsidiana y pómez. Debido a la diversidad de productos se observan también varias texturas pero la más presente es la piroclástica.

Porcentaje de arcillas en la unidad.

De acuerdo a los estudios realizados, en esta unidad hay presencia de limos arcillosos algo arenosos de alta plasticidad con fragmentos de rocas volcánicas andesíticas y basálticas aisladas, presentando coloraciones pardas con tonos anaranjados y rojizos.

Consistencia geotécnica y cohesión.

Se trata de materiales eminentemente ripables, aunque localmente se podría llegar a ripabilidad marginal, erosionables y alterables (presencia de los de alteración de gran desarrollo horizontal y vertical). Respecto a la capacidad de carga, en el material intacto a débilmente alterado ésta varía entre media-alta, mientras que en la zona superior de alteración ésta va a ser baja, siendo estos últimos materiales poco estables para el apoyo de grandes terraplenes, siendo posiblemente necesarias actuaciones previas para su estabilización con el fin de evitar los efectos de asentamientos diferenciales destacables de corta a media duración.

Sobre estos materiales se han observado pequeñas inestabilidades debido a deslizamientos superficiales y reptaciones (nivel 1: movilización de materiales <100 m³) y asociados a ellos pequeños procesos erosivos que van a afectar eminentemente a las cunetas de drenaje obstruyéndolo.

Fracturación y diaclasamiento.

Existe fisuración prismática

Estratificación.

Se trata de una serie de depósitos volcánicos tabulares.

Porosidad y permeabilidad.

Hidrogeológicamente se trata de materiales con baja porosidad intergranular con lo que presentan una porosidad baja a media, tratándose de materiales impermeables (limos y tobas finas) a semipermeables (tefras y tobas gruesas), presentando un drenaje profundo por lo general dificultoso, transmitiendo el agua por infiltración a las formaciones infrayacentes.

Se trata de una capa poco permeable que sirve de filtro a los acuíferos inferiores. Desde el punto de vista hidrogeológico esta formación se considera como un acuitardo y según algunos autores como acuífero y se le asignan valores de permeabilidad entre $1,16-2,72 \cdot 10^{-4}$ metros por día.

Unidad Tobas de Lapilli del Poás y Unidad Bajos del Toro

Espesor y geometría

Se trata de depósitos provenientes del volcán Poás, de acuerdo con la base de datos del sensor el espesor en la zona de estudio tiene un promedio de 45m.

Textura (granulometría, fabrica, selección), composición, grado de alteración.

Se trata de depósitos de toba de ceniza volcánica meteorizada, arcillosa y plástica de textura terrosa con líticos de lavas, ignimbritas y pómez.

Porcentaje de arcillas en la unidad.

En el pozo NA205 se menciona un 15% de arcilla en uno de los sectores alterados de esta unidad.

Consistencia geotécnica y cohesión.

No se tienen resultados de geotecnia para esta unidad sin embargo se trata de materiales erosionables y susceptibles de generar inestabilidades en cortes y taludes.

Fracturación y diaclasamiento.

Esta unidad no presenta fracturación ni diaclasamiento

Estratificación.

Se trata de una serie de flujos y depósitos volcánicos que presentan una clara estratificación.

Porosidad y permeabilidad.

Se trata de una unidad de baja permeabilidad aparente y que constituye un acuífero muy pobre.

Integración con los datos del estudio geotécnico.

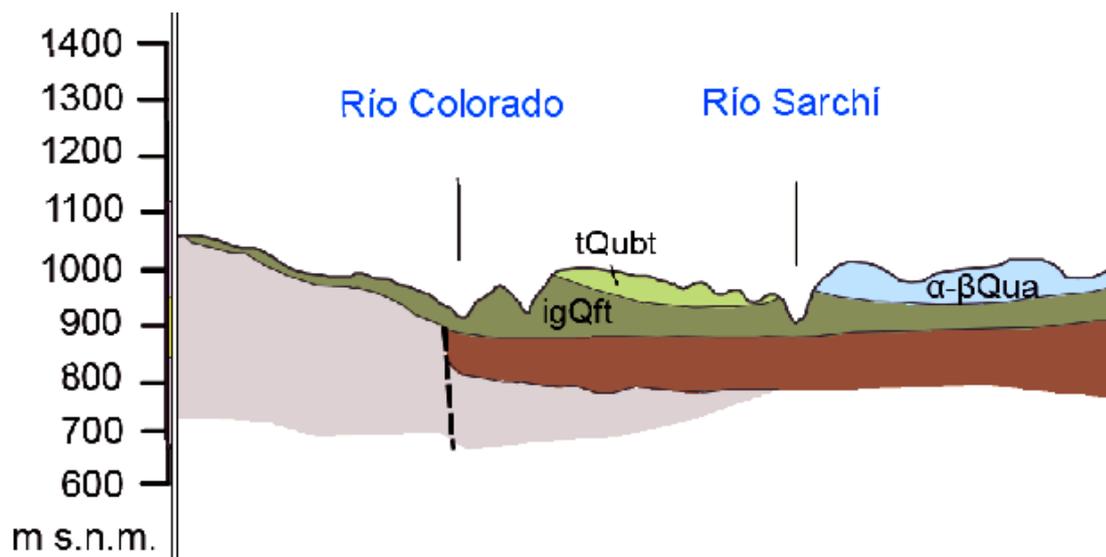
Este punto se llevará a cabo en el EslA correspondiente

Contextualización rápida respecto a los datos geológicos regionales relevantes

El Cantón de Valverde Vega se encuentra en las faldas Sur-Suroeste de la Cordillera Volcánica Central, donde predominan mayoritariamente depósitos volcánicos provenientes ya sea de las estructuras volcánicas existentes o de estructuras antiguas. Los depósitos se dan en un sector con un ambiente tectónico activo con varios sismos registrados a lo largo del tiempo.

De acuerdo a lo observado en la hoja geológica Naranja 1:50.000 (DGM, , el basamento local está constituido por las andesitas basálticas con diques y brechas del Grupo Aguacate, lo sobreyacen las andesitas de la Formación Colima, sobre las mismas se ubican las ignimbritas grises con escorias, vidrio volcánico, líticos lávicos y pocas pómez de la Formación Tiribí. Sobre esta Formación se ubican las tobas con líticos no soldada de la Unidad Bajos del Toro y las tefras y tobas de lapilli del Poás.

Ilustración 1 Perfil geológico de la zona del proyecto



Fuente: GAPRO S.A. Adaptado de Huapaya y Rojas (2012)

Datos geomorfológicos relevantes procesos de erosión – sedimentación, datos de geodinámica externa relevantes

Geomorfología local de terreno y su entorno inmediato, para lo cual deberá hacer una identificación y caracterización básica de unidades geomorfológicas identificadas; que incluya al menos los siguientes elementos de análisis:

El proyecto se ubica en las laderas al suroestes del Volcán Poás. La unidad geomorfológica que predomina es de origen denudacional volcánico, específicamente laderas con materiales volcánicos (lavas y piroclastos principalmente) con pendiente entre moderada (16° - 35°) y baja ($<10^{\circ}$). Las zonas más planas con pendiente entre 0° a 4° se encuentran en las cúspides de las laderas y están compuestas en su mayoría por material clástico y coladas de lava cubiertas por cenizas, que conforman una espesa capa de suelo regolito en algunos casos de varios metros de espesor. Las laderas de pendiente moderada se encuentran disectadas por ríos y quebradas que constituyen el sistema de drenaje de la zona. (Ruiz y Suarez, 2017).

Se adjunta mapa de pendientes.

Unidades de pendiente.

La totalidad del AP está compuesta por las laderas denudacionales de las coladas de lava recientes. En estas laderas, la red hídrica viene a entallar cañones que atraviesan las litologías de la región. Las laderas denudacionales corresponden con las pendientes de 30% o menos fuera de los cauces de los ríos y los cañones corresponden con las pendientes de más de 30% en el mapa de pendientes.

Rasgos geomorfológicos más conspicuos

Los rasgos geomorfológicos más importantes son los cañones de los ríos Colorado, Pilas y Trojas. Las laderas de los ríos Pilas y Colorado son moderadas hasta la unión de ambos ríos donde las paredes del cañón del río Colorado se vuelven más abruptas. El trazo más al norte del diseño discurre por una fila de orientación SSO-NNE que se ubica entre los cañones de los ríos Colorado y Trojas.

Otros rasgos observables son las expresiones geomorfológicas de las fallas de Zarcero (N-S) y Alajucla (aproximadamente E-O). El río Colorado en la zona estudiada sigue el trazo de la falla Zarcero mientras que el río Sarchí (a menos de 2km al este del proyecto) se ve desplazado por la falla de Alajucla. La quebrada Barquero, sobre la cual también pasa el diseño, podría estar alineada con esta falla.

Cauces en el AP identificar y delimitar el cauce mayor y sus terrazas de inundación (valle de inundación)

Por tratarse de ríos de considerable caudal en laderas de materiales recientes y poco consolidados, se han generado cañones y por ende no se tienen terrazas de inundación fuera de los mismos. El canal principal y sus terrazas se encuentran dentro de los cañones de los ríos Colorado y Pilas. El flujo de las crecidas de los ríos se circunscribe al área de sus respectivos cañones.

Procesos geológicos geodinámica externa.

(para lo cual deberá hacer una identificación y descripción y localización espacial de los procesos de geodinámica externa más relevantes; que incluya al menos el siguiente elemento de análisis.

Evidencias o indicios de los procesos de erosión y sedimentación (surcos, canales, cúmulos sedimentarios naturales o artificiales, meteorización, erosión del perfil de suelo).

Actualmente el sitio en que se pretende desarrollar el proyecto tiene un uso del suelo de plantaciones de café y caña de azúcar en sus partes planas y de bosque ripario en los cañones de los ríos. No se observan inestabilidades. Al momento de realizar cortes se estarán interviniendo litologías de tobas no soldadas o pobremente soldadas. Por este motivo es imperativo contar con un adecuado diseño de taludes y manejo de aguas debidamente adaptado a estas litologías con el fin de evitar inestabilidades o erosión.

Síntesis de resultados y conclusiones geológicas

Este apartado debe incluir una discusión sobre la condición de geoaptitud natural del terreno, respecto a sus limitantes técnicas y atributos técnicos positivos para el desarrollo de la AOP que se plantea. Para lo cual, debe incluir al menos:

Síntesis de la condición geológica básica del terreno y mapa local de las unidades,

(incorporar un resumen del modelo geológico del terreno y mapa geológico del terreno y mapa de geología local (escala 1:5.000, o menos a criterio del profesional responsable), debe contener al menos los siguientes elementos de análisis):

Sintetizar los datos obtenidos de la geología y geomorfología del terreno.

El proyecto consiste en la construcción de una Radial que permita un acceso más expedito al Distrito de Sarchí (sector Norte), Cantón de Valverde Vega, desde la Carretera Panamericana (Ruta Nacional 1). La totalidad del proyecto se va a desarrollar sobre depósitos volcánicos provenientes del Volcán Poás, principalmente depósitos de tefras y tobas poco o mal consolidadas. En los pozos cercanos se describen estas litologías como meteorizadas, con mucha arcilla y de permeabilidad aparente baja. Estos depósitos generan laderas con pendientes moderadas, inferiores al 30%, en las cuales se han erosionado los cañones de los ríos de la zona. En el caso del proyecto el diseño atraviesa dos cañones principales que son el del Río Pilas y el del Río Colorado, aguas abajo de la unión de ambos ríos el cañón del río Colorado se vuelve más profundo y sus paredes más abruptas como reflejo del aumento de la capacidad erosiva del mismo. El trazo más al norte del diseño discurre por una fila de orientación SSO-NNE que se ubica entre los cañones de los ríos Colorado y Trojas. El río Colorado en la zona estudiada sigue el trazo de la falla Zarceró mientras que el río Sarchí (a menos de 2km al este del proyecto) se ve desplazado por la falla de Alajuela. Se trata de un sector sísmicamente activo con varios sismos registrados en las cercanías del proyecto.

Al momento de realizar cortes se estarán interviniendo litologías de tobas no soldadas o pobremente soldadas. Por este motivo es imperativo contar con un adecuado diseño de taludes y manejo de aguas debidamente adaptado a estas litologías con el fin de evitar inestabilidades o erosión.

Mapa local con el croquis explicativo

Se presenta el mapa de geología local del proyecto.

Discusión sobre las limitantes de incertidumbre y alcance del estudio

Esta sección al menos debe incluir:

Aplicabilidad de los resultados.

El sitio en que se encuentra el proyecto ha sido bien estudiado anteriormente, se cuenta con varios artículos sobre la sismicidad y la litología de la zona, la información de pozos cercanos, se cuenta con topografía de detalle y se tiene la hoja geológica oficial de Naranjo a escala 1:50.000 de la DGM.

Los resultados de este estudio se consideran ciertos, a una escala adecuada y bien respaldados por el trabajo de campo.

Tareas pendientes para fases posteriores de la actividad, obra o proyecto

La zona es sumamente bien conocida, se tienen informes específicos para este proyecto sobre "Análisis de riesgo a desastres proyecto radial Sarchí" y "estudio de amenaza sísmica puente Río Colorado, proyecto vial entre la rn 1 y m118" que se adjuntan a este informe. Como tarea

pendiente faltaría desarrollar el instrumento de evaluación ambiental que determine SETENA con la información ya disponible.

Incertidumbres no resultas

Al momento de realizar este informe no se tienen incertidumbre no resueltas.

Conclusión general sobre la viabilidad geológica del terreno en virtud de la obra a desarrollar.

De acuerdo con la abundante información disponible el proyecto es factible siempre y cuando se tenga un adecuado manejo de las aguas de escorrentía, se tomen las medidas geotécnicas necesarias para evitar la erosión hídrica en los movimientos de tierra y se asegure la estabilidad de los cortes y taludes de la vía diseñada. Adicionalmente se deben de seguir las recomendaciones de diseño de puentes del “ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA PUENTE RÍO COLORADO, PROYECTO VIAL ENTRE LA RN 1 Y RN118”. En cuanto se sigan estas premisas el proyecto se considera viable.

DATOS SOBRE LA HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL

Datos hidrogeológicos del entorno inmediato

Resumen de los datos hidrogeológicos disponibles para la subcuenca o microcuenca hidrogeológica en la que se localiza el terreno.

En la zona de estudio se cuenta con publicaciones geológicas, mapas geológicos y un registro de pozos para ayudar a desarrollar el contexto hidrogeológico local.

En la publicación de Vargas y Fernández del 2002 se realiza una descripción de la hidrogeología de la zona de Grecia, Alajuela. Gracias a los datos de los pozos, la columna estratigráfica de esta publicación y a los cortes presentes en el mapa Naranja 1:50.000 se puede lograr la interpretación del contexto hidrogeológico de la zona del proyecto.

Datos de publicaciones científicas o mapas hidrogeológicos disponibles.

Cómo se mencionó en el apartado anterior existen varias publicaciones relacionadas con el área de estudio, entre ellas destacan “CONTRIBUCIÓN A LA HIDROGEOLOGÍA VOLCÁNICA DE GRECIA, VALLE CENTRAL OCCIDENTAL DE COSTA RICA” de Vargas y Fernández (2002), el Mapa geológico de la Hoja Naranja 1:50.000 de Huapaya y Rojas (2012) y el registro de pozos del SENARA. Con base en estos insumos, además de los trabajos citados en estas publicaciones, se ha logrado sintetizar la información hidrogeológica del área de estudio.

Datos hidrometeorológicos, registros de pozos y manantiales

(localizados en un radio de 200 metros de los linderos del AP, incluyendo: ubicación en coordenadas, elevación topográfica, profundidad del nivel o niveles de agua, caudales y otros datos existentes).

De acuerdo con la base de datos del SENARA y de la Dirección de Aguas, no existen pozos ni manantiales en el tramo de 200m, existen sin embargo algunas concesiones dentro del rango de los 200m a la línea de centro del trazo de la nueva carretera.

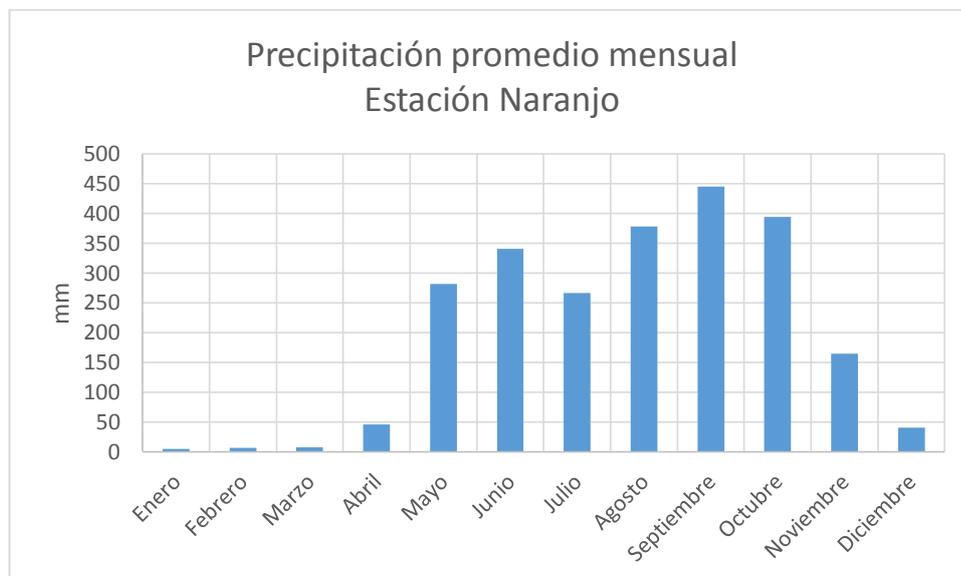
Clima

El sector de Sarchí muestra una cantidad de lluvia moderada a alta, en comparación con otros

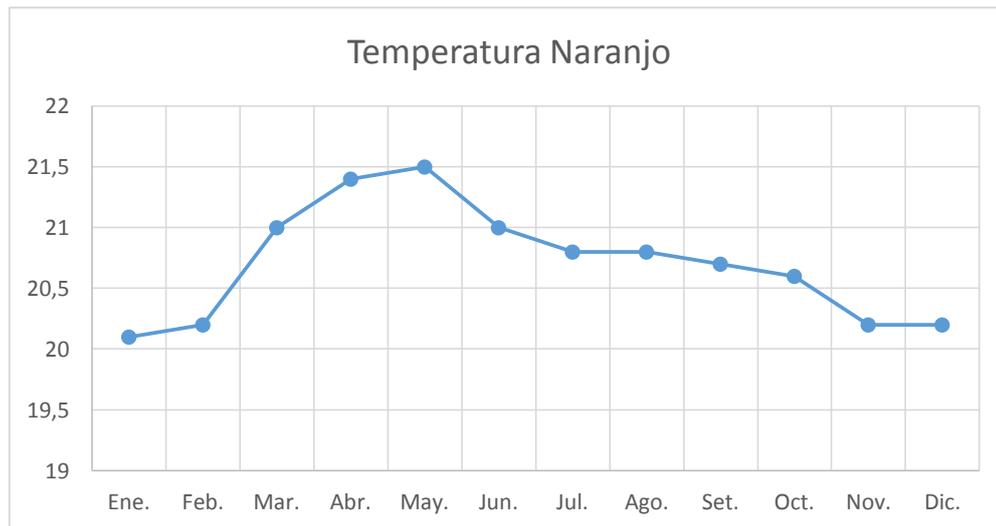
sectores del país. Los meses más lluviosos, al igual que en la mayoría del resto del país son, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre (cuadro 1). El mes más lluvioso es octubre (promedio 431 mm) y el mes más seco es febrero (8 mm).

El sector del proyecto Radial Sarchí no muestra cambios abruptos en la precipitación, los incrementos son paulatinos, excepto entre los meses de abril y mayo.

Precipitación promedio mensual para la zona de estudio												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Grecia												
(1935-1967)	4,55	11,36	11,21	66,17	366,45	388,31	361,04	401,34	534,13	558,94	254,74	35,73
Naranjo												
(1940-2000)	4,7	6,6	7,1	45,9	281,6	340,5	266,8	378,2	445,7	394,7	164,2	40,6



Temperatura promedio mensual para el área de estudio												
Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
Coopenaranjo (1971-2000)	20,1	20,2	21	21,4	21,5	21	20,8	20,8	20,7	20,6	20,2	20,2



Fuente: IMN 2019

Condiciones hidrogeológicas locales y caracterización básica del acuífero subyacente, así como propiedades básicas del acuífero subyacente.

Identificación y descripción básica de las unidades hidrogeológicas del terreno (superficiales y del subsuelo superior),

Relación con datos de unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior.

Se tiene amplia información sobre las unidades presentes y su correlación con la hidrogeología. De acuerdo con el estudio realizado en el apartado de geología sabemos que el proyecto se va a desarrollar principalmente en la Unidad Tobas de Lapilli del Poás y Unidad Bajos del Toro. Tal y como se mencionó en apartados superiores, de acuerdo con la base de datos de pozos del SENARA, en los primeros 30 m de profundidad no hay un acuífero regional. Las rocas que conforman los primeros metros de suelo son de permeabilidad aparente baja, con mucha arcilla y meteorizadas por lo que no constituyen buenos acuíferos.

Esto está ratificado en la profundidad del nivel estático medida en los 5 pozos más cercanos al proyecto, perforados sobre las unidades de tobas y Bajos de Toro y que además contienen información.

Pozo	NE (m.b.n.s.)
NA205	70 (11)
NA517	66
NA521	62.7
NA575	54
NA605	32

Los pozos cercanos al AP describen litologías compuestas por tobas arcillosas de permeabilidades entre bajas a regulares, el acuífero se encuentra en las ignimbritas o en las lavas que las subyacen.

De acuerdo con el perfil observado en el mapa geológico de la hoja Naranjo, se observa que las ignimbritas floran por debajo de las unidades superficiales a ambos lados del río Sarchí, es decir, esta unidad es común al AP y al estudio de Vargas y Fernández 2002.

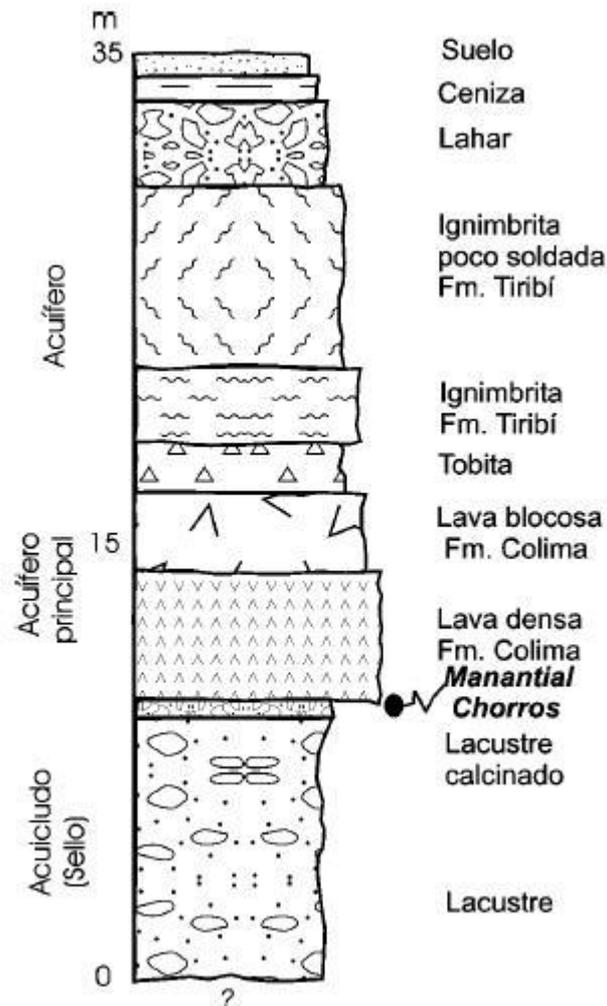
Características petrográficas, estructurales y físicas y su comportamiento hidrogeológico.

Con respecto a las tobas superficiales, Vargas y Fernández (2002) indican que las unidades de tobas presentan permeabilidades bajas a muy bajas, comportándose como acuitardos; no obstante, son captadas por los pozos solo en sectores arenosos. Esto se en las cercanías del AP dónde los pozos NA 205, NA 517 y NA 605 miden un nivel estático dentro de litologías tobáceas. El pozo NA 521 capta el agua en ignimbritas y el NA 575 en lavas.

De acuerdo con Vargas y Fernández 2002, la unidad de ignimbritas que subyace a las tobas, tiene una permeabilidad variable, ya que existen subunidades. Por ejemplo, en Puente de Piedra de Grecia tiene una permeabilidad aparente alta, no obstante lo anterior, es poco frecuente observar afloramientos con brotes de agua subterránea. Hay dos condiciones que modelan la permeabilidad. Dentro de los bloques de forma columnar el nivel de soldadura es tan alto que no permite el paso efectivo del agua. Por su parte las fracturas entre las columnas proporcionan vías para el tránsito expedito del agua, pero las condiciones de confinamiento y orientación de las fracturas no propician un almacenamiento efectivo. Por lo tanto esta subunidad de las ignimbritas no debería considerarse como un acuitardo ya que tiene buen grado de fracturamiento y escaso almacenamiento.

Tal y como se observa en la ilustración 1 del apartado de geología, las ignimbritas son comunes al área de estudio de Vargas y Fernández y al AP y por lo tanto tienen el mismo comportamiento hidrogeológico.

En función de la información recolectada se puede observar la siguiente columna estratigráfica para el AP:



Columna estratigráfica para el sector de Grecia, Vargas y Fernández 2002.

En el caso del AP la unidad de Lahar superior de la columna estratigráfica se reemplaza con tobas de permeabilidad baja a regular. Para el AP se cuenta con entre 35 y 60 m de tobas y en promedio 45m. En algunos casos se capta un nivel freático en los facies arenosos de las tobas sin embargo los acuíferos a nivel regional se encuentran en las ignimbritas y en las lavas, siendo estas últimas dónde se encuentra el acuífero principal (Formación hidrogeológica Colima).

Realización de ensayos de porosidad y permeabilidad para las unidades aflorantes (según criterio del profesional responsable).

Dado a que se cuenta con información suficiente, se considera que este paso no es necesario

Descripción de las propiedades básicas del acuífero más superior y cercano a la superficie del suelo que se encuentra bajo el terreno.

Profundidad del nivel freático.

De acuerdo con los datos de los pozos cercanos al AP el nivel freático se encuentra entre 30 y 70m de profundidad, ubicándose en promedio por debajo de los 50m de profundidad.

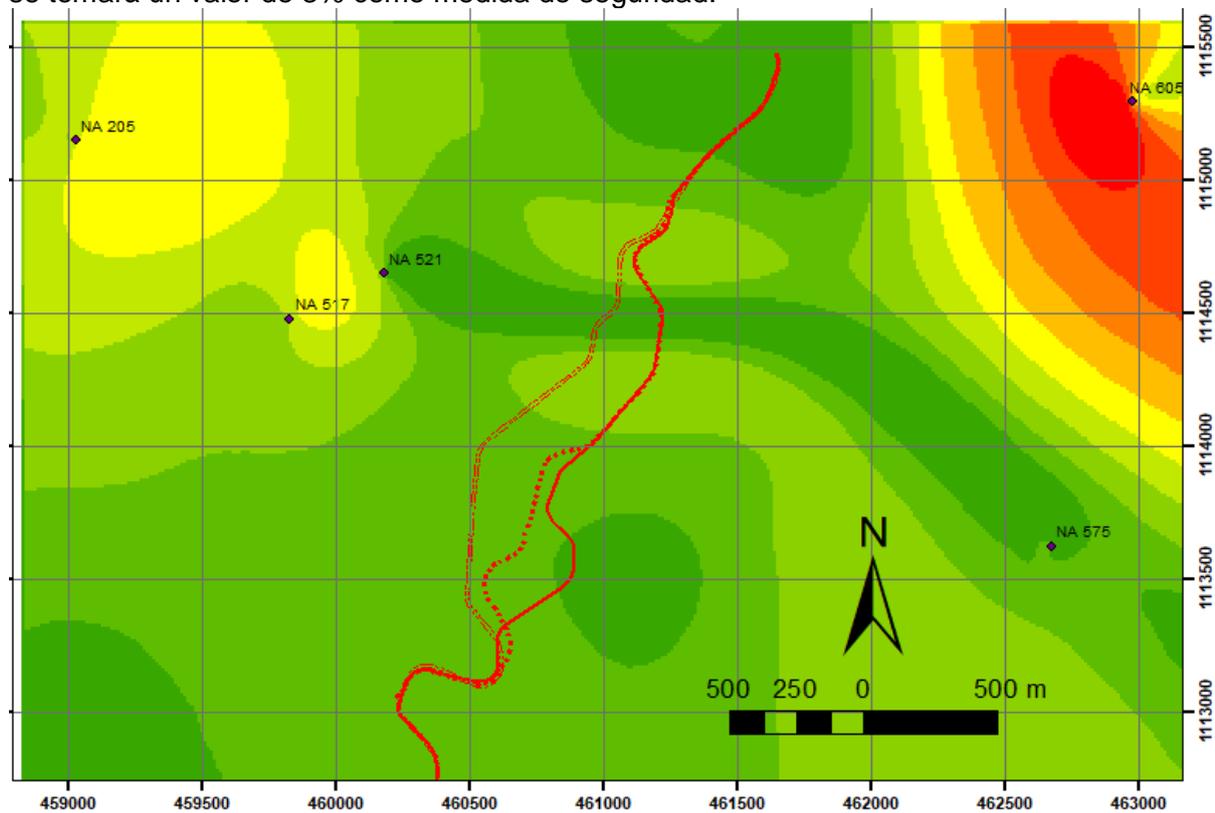
Existe la posibilidad de que existan acuíferos colgados de pequeña dimensión en las tobas superficiales siempre y cuando dentro de las mismas se encuentren estratos arenosos.

Extensión aproximada del acuífero

Se pueden encontrar varios tipos de acuíferos en la zona de estudio. Los más cercanos a la superficie se desarrollan en faciés arenosas de las tobas superficiales y son de carácter local y de poca extensión, estos abarcan todo el AP. Los acuíferos que se desarrollan en las ignimbritas son de carácter regional y los que se desarrollan en las lavas son de carácter regional y parte de la Formación Hidrogeológica Colima, uno de los principales acuíferos explotados a nivel del GAM.

Propiedades hidráulicas básicas obtenidas de datos, incluyendo dirección de flujo y gradiente hidráulico del agua subterránea.

En la zona de estudio el flujo de agua subterránea tiene una dirección de NE hacia SO, la cual es casi paralela a la dirección de los ríos principales de la zona (Vargas y Fernández, 2002). Esta publicación no informa sobre el gradiente hidráulico ya que al parecer el mismo se vería afectado por las estructuras presentes en el área. Con base en la información de pozos relevante para el área de estudio se ha generado un mapa de gradiente a partir del nivel estático tomando en cuenta la topografía. Para el sector del AP está mejor representada la zona norte porque presenta mayor cantidad de información, el valor máximo del gradiente hidráulico es de 2.8% sin embargo se tomará un valor de 3% como medida de seguridad.



Mapa de gradiente hidráulico con base en los pozos con información del nivel estático, en rojo las opciones de proyecto. GAPRO S.A. 2019

Identificación y caracterización de manantiales cercanos al terreno (dentro del AP o en los linderos de la misma).

De acuerdo con la información del AP no existen manantiales registrados o captados en las cercanías del AP.

Síntesis de resultados y conclusiones hidrogeológicas, análisis de vulnerabilidad a la contaminación basado en el modelo hidrogeológico local

Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero y evaluación del tiempo de tránsito del agua subterránea.

(para: tanques sépticos, fugas de alcantarillado sanitario, pozos y manantiales, para lo cual debe contener los siguientes elementos de análisis:

Modelado básico de vulnerabilidad a la contaminación utilizando como guía, la metodología GOD y la ficha que se señala en la Sección VII del presente Anexo 6.

A continuación se evalúa para el proyecto el grado de vulnerabilidad del acuífero más somero presente bajo del AP utilizando el método GOD¹ (Foster, 1987; Foster & Hirata, 1988). Este método 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
- Con base en estos dos factores, la vulnerabilidad de un acuífero está caracterizada por tres parámetros:

- Grado de confinamiento hidráulico del acuífero
- Ocurrencia del substrato suprayacente
- Profundidad de la tabla de agua.

El *grado de confinamiento hidráulico* está evaluado con una escala que varía de 0.0 a 1.0. Según esta escala los acuíferos artesianos o confinados son menos vulnerables de un acuífero freático. En el caso objeto de estudio se asignó a este parámetro un valor **1.0**, considerado un valor típico de un acuífero no confinado superficial.

Las características del *substrato suprayacente* a la zona saturada del acuífero viene evaluada por su grado de consolidación y por su tipo de litología. Para este parámetro la escala varía de 0.4 a 1.0. En el caso específico el terreno que sobreyace a la zona saturada está conformado por depósitos de tobas y una capa de suelo residual, en la metodología se le asigna un valor de **0.6** a las tobas volcánicas.

La profundidad del nivel estático del agua (acuíferos no confinados) o del techo del acuífero (acuíferos confinados) tiene una escala que varía de 0.6 a 1.0. En este caso se asignó el valor de **0.7**, según cuanto recomendado por Foster para profundidades de entre 20 y 50 m b.n.s. El índice de vulnerabilidad de acuíferos GOD es el resultado del producto de los valores asignados a los tres parámetros antes mencionados. Por lo tanto en el caso objeto de estudio es:

$$G \times O \times D = 1.0 \times 0.6 \times 0.7 = \mathbf{0.42}$$

Considerando que según la escala de valores de la vulnerabilidad del método GOD el valor obtenido para las tobas cae en la clase de **vulnerabilidad media** ($0.3 < \text{GOD} < 0.5$).

Aplicación de la metodología para evaluación de tiempos de tránsito de contaminantes.

(a partir de tanques sépticos, tanto para evaluar la posible contaminación en el acuífero, como en manantiales y pozos, según criterio del profesional).

A efecto de evaluar la capacidad de infiltración de los suelos para valorar la factibilidad técnica de

¹ Por sus iniciales en inglés: **Ground hydraulic confinement, Overlaying Strata, Depth to groundwater table**

instalar tanques sépticos, se tomó en cuenta una prueba de infiltración en sitio y una prueba de porosidad realizada en un lote cercano al proyecto. De acuerdo con dicha prueba se tiene una tasa de infiltración de **4,3 m/día**. En el **Cuadro 1** se incorpora la memoria de cálculo de la prueba.

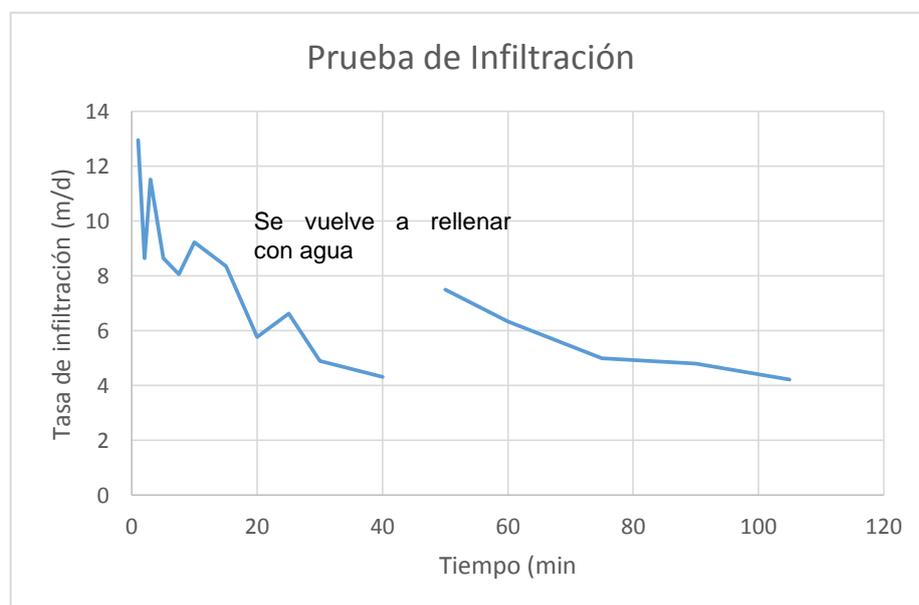
Cuadro 2 Prueba de Infiltración en sitio

d (cm)	t (min)	delta d (cm)	delta t (min)	cm/min	min/cm	m/d
29	0					
28.1	1	0.9	1	0.9	1.11111111	12.96
27.5	2	0.6	1	0.6	1.66666667	8.64
26.7	3	0.8	1	0.8	1.25	11.52
26	4	0.7	1	0.7	1.42857143	10.08
25.4	5	0.6	1	0.6	1.66666667	8.64
24	7.5	1.4	2.5	0.56	1.78571429	8.064
22.4	10	1.6	2.5	0.64	1.5625	9.216
19.5	15	2.9	5	0.58	1.72413793	8.352
17.5	20	2	5	0.4	2.5	5.76
15.2	25	2.3	5	0.46	2.17391304	6.624
13.5	30	1.7	5	0.34	2.94117647	4.896
10.5	40	3	10	0.3	3.33333333	4.32
Se vuelve a llenar con agua						
22.8	50	5.2	10	0.52	1.92307692	7.488
18.4	60	4.4	10	0.44	2.27272727	6.336
13.2	75	5.2	15	0.34666667	2.88461538	4.992
8.2	90	5	15	0.33333333	3	4.8
3.8	105	4.4	15	0.29333333	3.40909091	4.224

Más de 12 min/cm es inadecuado para pozos de filtración

Más de 24 min/cm es inadecuado para sistemas de absorción

Fuente: GAPRO 2018



Fuente GAPRO 2018



Fotografías 1 y 2: excavación para la prueba tipo Porchet.

El análisis del riesgo de contaminación bacteriana por el vertido de aguas residuales desde los drenajes de los tanques sépticos, se hace con base en las “Normas para el cálculo de tiempo de tránsito entre los drenajes de tanques sépticos y las fuentes de agua subterránea” (Rodríguez, 1994). El método de análisis se basa en los siguientes supuestos:

- El tiempo de residencia máxima de las bacterias en el subsuelo es de 70 días (Lewis, Foster y Drassar, 1982), para un medio poroso.
- Si en la zona saturada el flujo es predominantemente fisural como en las lavas, el tiempo total (vertical más horizontal) requerido como mínimo para aceptar tanques sépticos será de 100 días.

En el caso del presente Proyecto, el estudio se hizo basándose en las siguientes premisas hidrogeológicas:

- La *permeabilidad "k"* se estimó de **4,3 m/día** con base en las pruebas de infiltración realizadas en sitio (**Cuadro 1**).
- El *gradiente hidráulico "i"* del agua subterránea en el Área del Proyecto se estimó en **3%**, con base en la información de pozos para el área de estudio.
- La profundidad del *agua subterránea "b"* se establece en **30 m** con base en la información de los pozos cercanos al AP.
- La *porosidad "n"* del medio se calculó en **58%** con base en el estudio de Mora para los materiales del Valle Central (Mora, 1998).

Estas premisas de cálculo son conservadoras y se ubican en el lado de la seguridad.

Flujo vertical: tiempo de tránsito en el medio no saturado: los suelos residuales que se encuentran sobre el nivel freático, corresponden con un medio no saturado y en consecuencia, el flujo es vertical. El tiempo de tránsito se calcula por la expresión:

$$t_1 = \frac{b \times n}{k}$$

$$T1=30 \times 0,58 / 4,3 = 4,04$$

Entonces utilizando los valores antes mencionados de *b*, *n* y *k*, se tiene que el valor del tiempo de tránsito por flujo vertical en los suelos es $t_1 = 4,04$ días.

Flujo horizontal: Distancia recorrida para completar 70 días

El tiempo de tránsito de las bacterias para completar los 70 días, por cuanto se trata de un medio poroso, se calcula con la diferencia de la suma de los tiempos calculados anteriormente, es decir:

$$t_2 = 70 - t_1 = 70 - 4,04 = \mathbf{65,95 \text{ días}}$$

La distancia de tránsito del contaminante dentro del acuífero desde el punto de vertido, se calcula con base en la siguiente expresión:

$$d = \frac{t \times k \times i}{n}$$

donde,

d = Distancia de tránsito del contaminante, en metros

t = Tiempo de tránsito del contaminante, correspondiente a **65,95** días.

k = Coeficiente de permeabilidad de la zona saturada, con un valor de **4,3 m/día** con base en pruebas de campo.

i = Gradiente hidráulico del acuífero, adimensional, **3%**

n = Porosidad de **58%**

$$d = 65,95 \times 4,3 \times 0,03 / 0,58 = \mathbf{14,66 \text{ m}}$$

Con los valores indicados, la distancia de tránsito del contaminante desde el punto de emisión es de **14,66 m**. Se considera esta distancia horizontal ampliamente manejable dentro del AP.

Conclusión: De acuerdo con la prueba realizada, de utilizarse un sistema de aguas negras con tanque séptico tradicional, el contaminante podría llegar al nivel freático en 4 días (cálculo conservador). Es por este motivo que el sistema que se propone es un tanque séptico mejorado (tanque séptico no convencional, tipo FAFA o similar) que está compuesto por dos unidades de tratamiento para mejorar la calidad del agua.

Se coloca primero el tanque sedimentador/biodigestor y sus efluentes se llevan a un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) para continuar con el mejoramiento de la calidad del agua, previo a su contacto con el medio inmediato. El sistema de tanque séptico mejorado tipo FAFA consiste en un sistema que posee un tratamiento primario que es la unidad de tanque séptico prefabricado el cual logra una eficiencia cercana al 70% en la remoción de DBO y un tratamiento secundario que consiste en un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) también prefabricado en plástico reforzado con fibra de vidrio donde llegan los líquidos con materia orgánica disuelta proveniente del primer paso de tratamiento con valores de eficiencia dentro del rango 70-80% adicional. El diseño asegura un tratamiento apropiado de los desechos dejando un efluente bajo la calidad y estándar establecidos por el Ministerio de Salud y sin peligro de contaminación de aguas subterráneas, pues brinda eficiencias de remoción de DBO del 80%.² En el mercado existen

² ("Tanques Sépticos Conceptos Teóricos Base y Aplicaciones", Elías Rosales Escalante, ITCR y CIVCO, Febrero 2003)

también sistemas similares con eficiencias de remoción similares (Tanque Diez, La Casa del Tanque, etc.). Para mayor aclaración se presenta las Figuras 2 y 3.

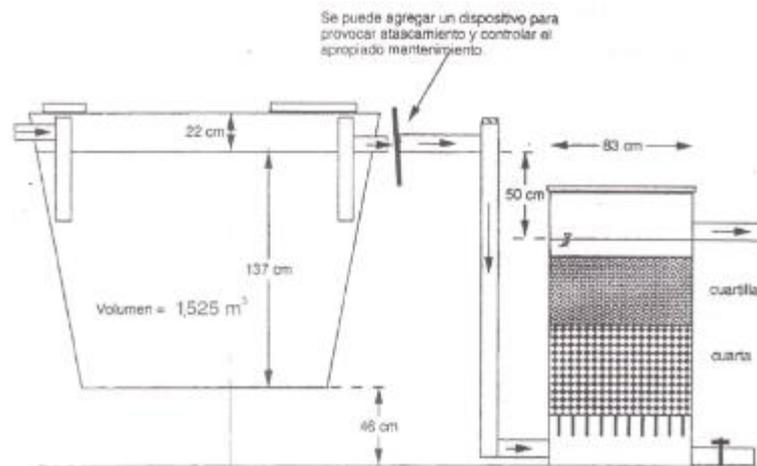


Figura 2. Diagrama de un sistema de tanque séptico mejorado tipo Fafa.
Fuente: Elías Rosales, ITCR y CIVCO, 2003.

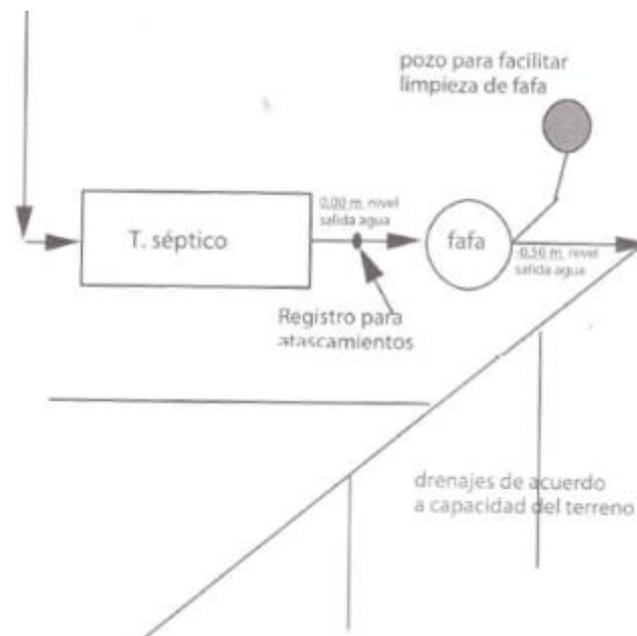


Figura 3. Vista en planta de un sistema de tanque séptico mejorado tipo Fafa.
Fuente: Elías Rosales, ITCR y CIVCO, 2003.

Determinación, en caso necesario, de los tubos de flujo del agua subterránea en pozos y manantiales identificados dentro del AP o sus linderos.

No se han identificado pozos ni manantiales dentro del lindero de la obra.

Identificación de fuentes potenciales de contaminación de agua subterránea dentro del AP o sus linderos.

Actualmente varios de los sitios en los que se va a realizar la vía presentan un uso del suelo agrícola o de vivienda de baja y mediana densidad. Las principales fuentes de contaminación del agua subterránea actualmente son por fertilizantes, plaguicidas y aguas negras y grises.

Modelado hidrogeológico local;

Debe incluir mapas y perfiles del suelo y subsuelo superior con interpretación geológica e hidrogeológica ambiental, así como un resumen de la condición hidrogeológica del terreno y conclusión sobre su potencial para el uso en el desarrollo de infraestructura, al menos debe incluir el siguiente elemento de análisis:

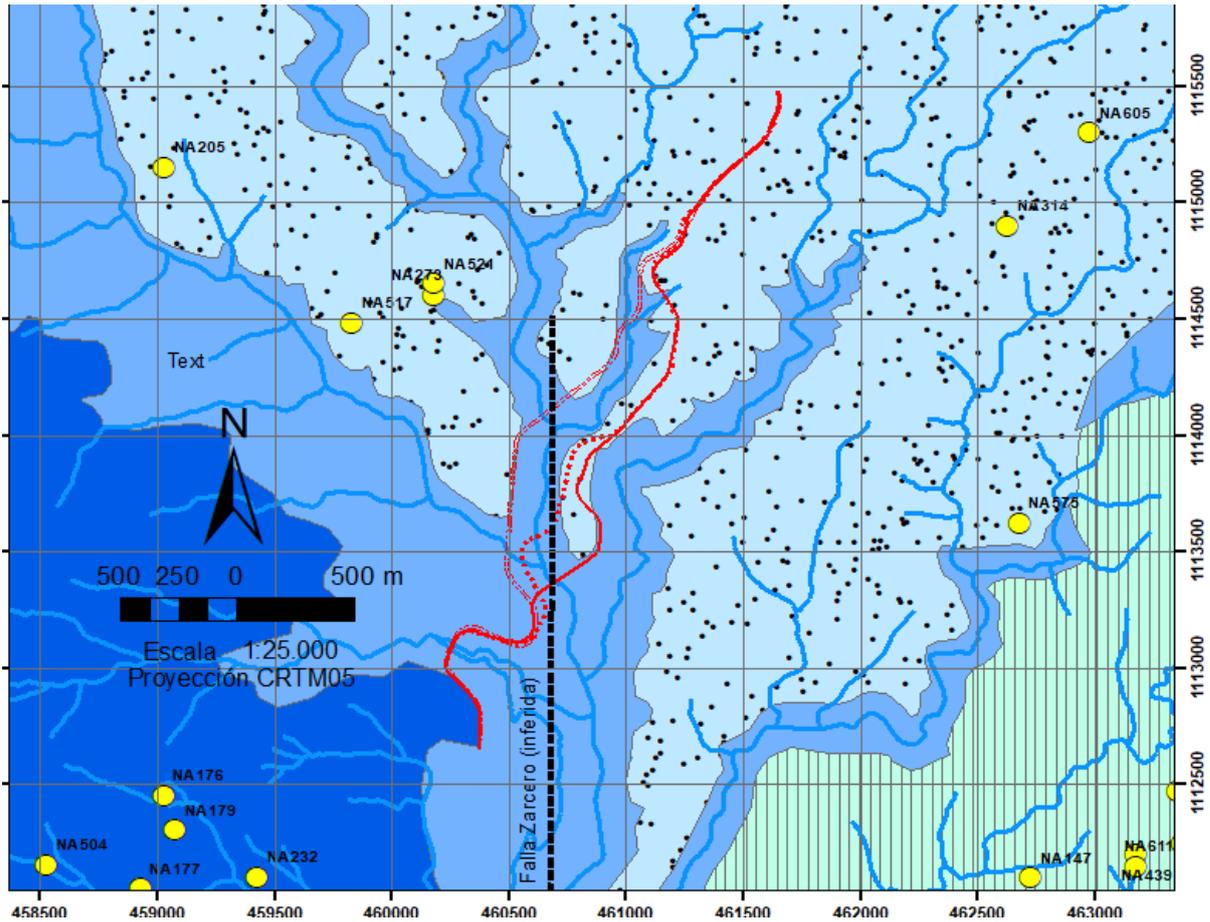
Elaborar un modelo conceptual que incluya la definición del tipo de acuífero.

(propiedades hidráulicas básicas, posible comunicación hidráulica con ríos y/o acuíferos existentes cercanos, representación de mapas y perfiles hidrogeológicos locales y su correlación para el terreno, incluyendo la ubicación de manantiales y pozos, profundidad del nivel freático, dirección de flujos de aguas subterráneas y delimitación de áreas de protección en caso requerido).

De acuerdo con los estudios realizados y las publicaciones consultadas, en el AP se desarrollan tres acuíferos. El primero, más somero y conformado por lentes aislados, se desarrolla en las facies arenosas de las tobas superficiales que abarcan al menos los primeros 45m de profundidad. Por debajo de las tobas se presentan las ignimbritas asociadas a la Formación Tiribí, en estas ignimbritas se desarrolla un acuífero de relevancia regional. Subyaciendo a las ignimbritas encontramos las lavas de la Formación Colima que representa una de las principales fuentes de agua para la GAM.

Según Mora (1995), por la presencia de vacuolas, el intenso fracturamiento y por la presencia de brechas principalmente en la parte superior, la unidad Colima tiene una alta capacidad de transmitir agua y en determinadas condiciones también almacenamiento. La unidad de ignimbritas, tiene una permeabilidad variable, ya que existen subunidades. Hay dos condiciones que modelan la permeabilidad. Dentro de los bloques de forma columnar el nivel de soldadura es tan alto que no permite el paso efectivo del agua. Por su parte las fracturas entre las columnas proporcionan vías para el tránsito expedito del agua, pero las condiciones de confinamiento y orientación de las fracturas no propician un almacenamiento efectivo. Las unidades de tobas presentan permeabilidades bajas a muy bajas, comportándose como acuitardos; no obstante, son captadas por los pozos solo en sectores arenosos (Vargas & Fernandez, 2002).

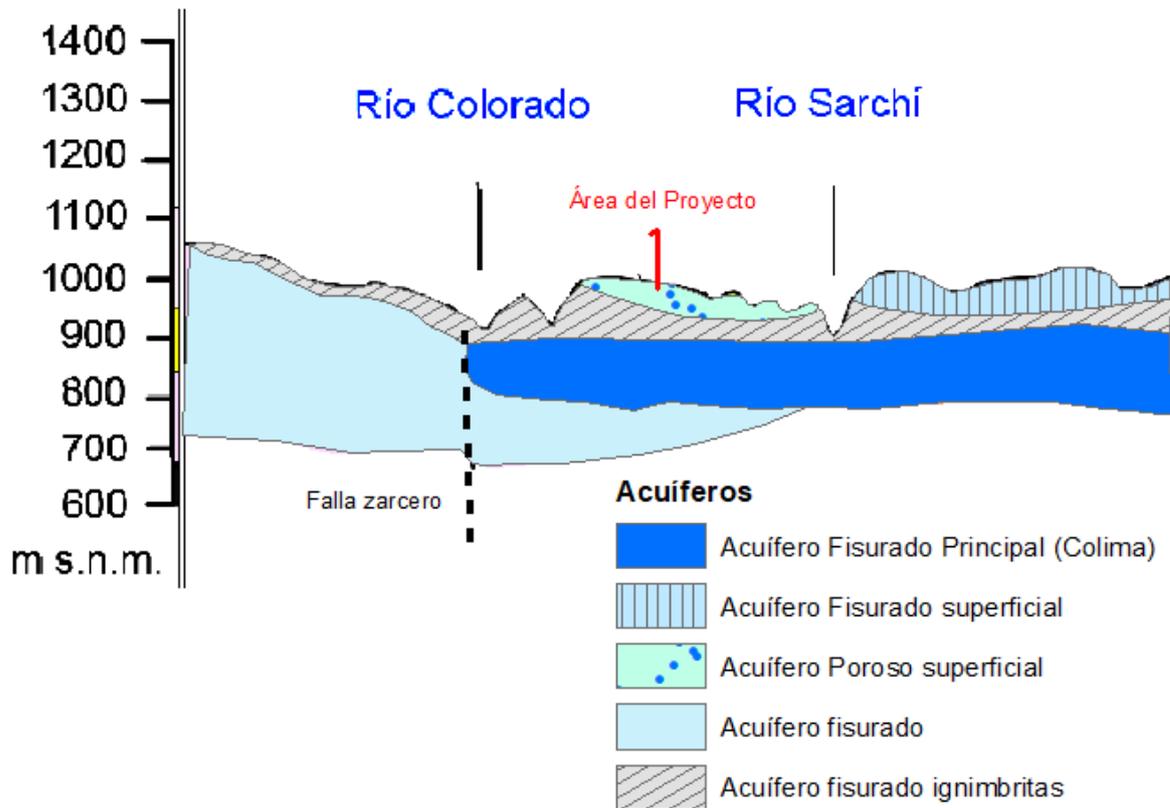
Por la capacidad de infiltración de los materiales de la zona, la abundante precipitación, la existencia de ríos influentes y la permeabilidad de las rocas del subsuelo, la vertiente sur de la cordillera Volcánica Central, comprendida entre los volcánes Barba y Poás, cuenta con un potencial de agua subterránea superior al sector ubicado al sur del Valle Central. En esta zona abundan rocas volcánicas, entre ellas lavas e ignimbritas fracturadas que permiten el almacenamiento y la transmisión de agua que es descargada por medio de manantiales de gran caudal como Ojo de Agua, La Libertad y los Chorros entre otros (Vargas y Fernandez, 2002).



Mapa de elementos Hidrogeológicos



Perfil Hidrogeológico del AP



GAPRO S.A. 2019.

Discusión sobre las limitantes de incertidumbre y alcance del estudio

Aplicabilidad de los resultados

Se considera que los resultados son coherentes con lo observado en campo y están ampliamente sustentados en información científica reciente, por lo tanto se pueden aplicar sin reservas.

Tareas pendientes para fases posteriores de la actividad, obra o proyecto.

Se recomienda realizar perforaciones hasta 10m por debajo de la cota mínima del diseño de la vía cada 500 a 700m sobre el trazado para verificar la presencia de nivel freático y el tipo de material. Las tobas que componen los primeros metros del terreno en esta zona pueden tener diferentes facies y propiedades hidrogeológicas diferentes.

Incertidumbres no resueltas.

Se considera que se tiene un buen conocimiento de la zona de estudio.

Conclusión general sobre la viabilidad hidrogeológica del terreno en virtud de la obra a desarrollar.

Desde el punto de vista hidrogeológico se considera viable el desarrollo de la obra planteada. Se deberá de prestar especial atención con el manejo de hidrocarburos y aguas residuales durante la construcción. Se recomienda tener planes de prevención de derrames y protocolos de acción en caso de que se presenten derrames o goteos de hidrocarburos. Se recomienda el uso de cabinas sanitarias.

DATOS SOBRE LA CONDICIÓN DE AMENAZAS/RIESGOS NATURALES

Evaluación de la amenaza / riesgo por fallamiento geológico, sismicidad y potencial de licuefacción.

De conformidad a los lineamientos aplicables a criterio del profesional responsable, esta sección debe contener

Estructura de geología local y susceptibilidad a las amenazas

Esta sección debe contener una descripción breve de la estructura que presentan localmente las unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior en el AP y su AID, haciendo vínculo respecto a lo descrito para el entorno inmediato y regional en que se circunscribe.

Sobre la base de esta introducción se deben enlistar las amenazas naturales que podrían presentarse en el AP y su AID, para lo cual debe analizar:

Distribución y geometría de las unidades geológicas superficiales y del subsuelo superior.

Este tema ha sido ampliamente desarrollado en el apartado de geología.

Buzamientos y tendencias estructurales.

Las litologías que componen el área de estudio son depósitos de origen volcánico del Pleistoceno, se trata de materiales recientes que no presentan buzamientos. Las ignimbritas de la Formación Tiribí presentan fracturas columnares de enfriamiento.

Presencia de fallas geológicas o discontinuidades geológicas que limiten las unidades.

De acuerdo con la información disponible no hay discontinuidades geológicas que limiten las unidades

Elaboración un perfil geológico que interprete la situación geológica y de estructura de las unidades superficiales y del subsuelo superior.

En el apartado de "Contextualización rápida respecto a los datos geológicos regionales relevantes" se presenta un perfil geológico en el cual se observa la presencia de la Falla Zarcero y las unidades geológicas presentes en el AP.

Fallas Geológicas

Esta sección debe identificar y delimitar las fallas geológicas presentes en el AP y su AID y caracterizarlas de forma básica, en particular debe indicarse si se trata de una falla inactiva, potencialmente activa o activa.

Describir si en virtud de estudios geológicos previos en los que se circunscriba el AP y su AID se han delimitado fallas geológicas. En caso de que si, hacer resumen corto (1 página).

Existen varias fallas presentes en el contexto regional del proyecto las principales son mencionadas en Montero 2001 y cartografiadas en Denyer et al 2003. A continuación las descripciones de las fallas cercanas al AP de acuerdo con Montero (2001).

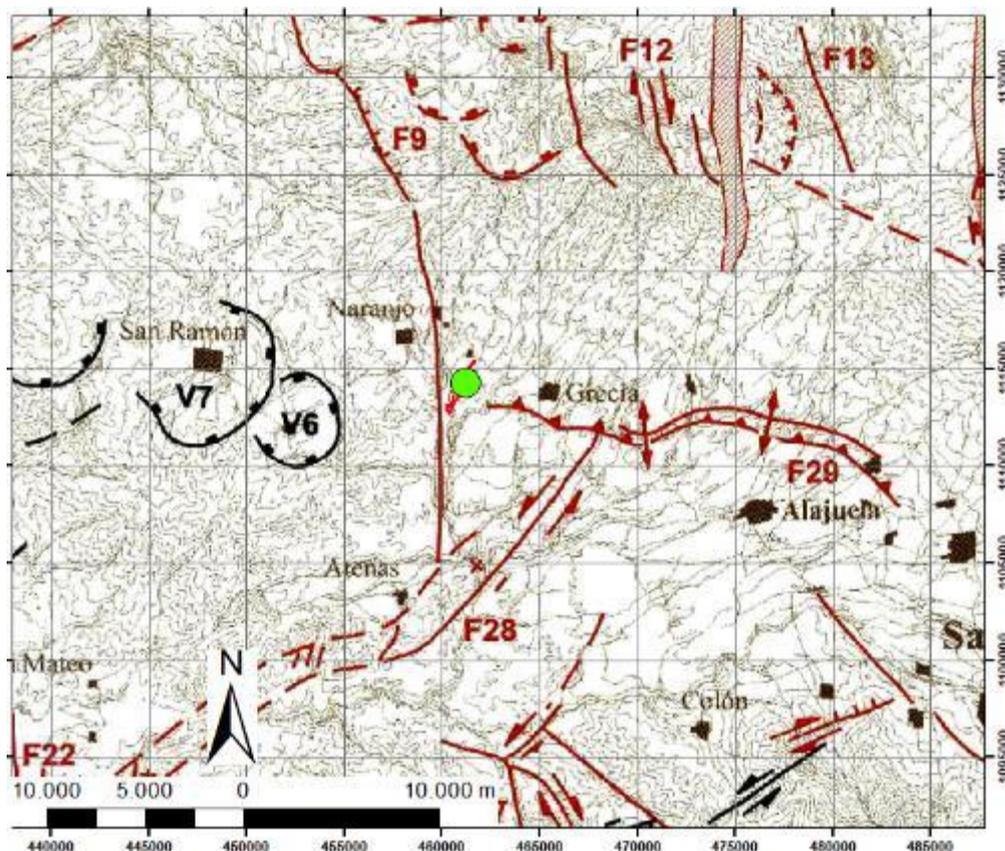
Falla Zarcero: Falla de importante extensión, de un rumbo oscilante NNW, Denyer et al ubican esta falla al oeste del AP mientras que en el mapa de Huapaya y Rojas esta falla se encuentra dentro del AP en el cañón del río Colorado. Cerca de la población de Zarcero, los contraescarpes originaron represamientos de drenaje y paleolagos. En su sector central se divide en dos ramales, ambos con escarpes que miran al este y bastante juveniles. Estos ramales se unen nuevamente al NNW y luego la falla se continua como una sola traza hasta terminar cerca de la unión entre el frente montañoso y la llanura aluvial. Cerca de Zarcero, la falla desplaza normalmente depósitos volcánicos cuaternarios. El 4 de setiembre de 1998 fue localizado un

temblor de magnitud 4,0 a 20 km de profundidad, muy cerca de la traza de la falla Zarcero. El mecanismo focal para este evento es de falla normal y el plano nodal que se inclina al noreste es de rumbo similar a la falla Zarcero, por lo cual se asocia con esta falla.

Falla Alajuela: Tiene un rumbo oscilante cercano al WNW y se extiende por unos 20 km. Geomorfológicamente, se caracteriza por levantamientos sublineales largos, con escarpes frontales facetados al sur, con uno o dos quiebres de pendiente. La parte trasera presenta contraescarpes de pendiente suave e inclinación al norte. Los levantamientos tienen un relieve entre 50-200 m, un ancho entre 200-400 m, forman un patrón festoneado y su topografía muestra frecuentes saltos en escalera al cruzar los ríos. Estos se asocian con un pliegue relacionado con una falla de propagación inversa, que afecta rocas del Cuaternario Tardío y probablemente del Holoceno. Los sismos destructivos del 15 de febrero de 1772 y del 30 de diciembre de 1888, fueron asociados con esta falla y enjambres de temblores con magnitudes inferiores a 4,0, han ocurrido al norte del escarpe. Entre estos destaca uno en noviembre de 1989, en el extremo este de esta falla y que fue asociado con una falla de rumbo NE. Esta última falla probablemente relacionada con la falla Alajuela.

Falla Garita: En el cañón del río Grande, el sistema de fallas de Tárcoles se continúa con la falla La Garita, de rumbo NE y que termina al norte en la falla de Alajuela. Geomorfológicamente, la falla presenta valles lineales y sillas de falla. Esta falla corta los depósitos ignimbríticos cuaternarios. Las estrías observadas en fallas paralelas muestran que es una falla de desplazamiento siniestral. Existen autores que sugieren que también tiene componente normal.

Se presenta el mapa de elementos tectónicos en el cual se puede observar la ubicación de estas fallas con respecto al AP



Mapa de elementos tectónicos. El proyecto está representado por un círculo verde. F28: Falla Garita. F29: Falla Alajuela. F9: Falla Zarcero. Modificado de Denyer et al 2003.

Indicar si por criterios directos de campo (geo y neotectónicos) o por fotointerpretación ha sido posible corroborar la existencia y posición de las fallas geológicas. En caso de que el terreno sea plano y en virtud de las características del Proyecto podría recurrirse a métodos de investigación complementarios tales como trincheras de exploración o métodos geofísicos.

Como se ha indicado en el apartado anterior, el proyecto cruza el cañón del Río Colorado que sigue la traza N-S de la falla Zarcero aunque hay autores que la colocan fuera del área de estudio. El trazo de la falla de Alajuela se encuentra a unos 5 km al este del AP. Existen otros alineamientos que podrían indicar fallas en el AP y sus cercanías. Todos estos factores deben de ser tomados en cuenta a la hora de diseñar los elementos de la obra.

Caracterizar la falla y calificarla según su potencial inactividad o actividad. Definir área de amortiguamiento (“buffer”) en caso necesario.

En el apartado anterior se ha descrito la falla activa Zarcero, la más cercana al AP y la falla activa Alajuela, cercana al AP.

Colocar la información obtenida en el mapa de amenaza local y señalar las limitantes al método aplicado.

Sismicidad

Esta sección de desarrolla considerando los datos de la geológica básica del AP establecer el tipo de suelo a que pertenece el AP respecto a la tabla guía que contiene el Código Sísmico de Costa Rica. Aportar datos complementarios de sismología local cuando la obra de infraestructura así lo amerite o bien cuando la geológica del terreno lo haga necesario, para lo cual debe analizar:

Establecer posible vínculo entre sismicidad y fallamiento geológico local.

Tal como fue mencionado en el apartado anterior, tanto la falla Zarcero como la falla Alajuela son fallas activas en las cuales se han registrado sismos.

Falla Zarcero: Rojas (2011) Cataloga a la falla Zarcero como una falla activa, basado en el desplazamiento de horizontes piroclásticos holocénicos.

Por su parte, Montero (2001) relaciona esta falla con un sismo ocurrido el 4 de setiembre de 1998 con una magnitud de 4,0 y 20 km de profundidad. El mecanismo focal presentado por el autor para este evento exhibe un plano nodal similar al de la falla Zarcero, inclinado hacia el noreste y con un fallamiento normal.

Rojas (2011) presenta una muestra de sismos ocurridos entre 1997 y 2009 presumiblemente cercanos a la falla Zarcero, no obstante, solo dos de ellos (en el 2003 y 2009) se ubican contiguos a la traza de la falla.

Asumiendo una longitud alrededor de 15 km y empleando las relaciones empíricas de Wells & Coppersmith (1994), presenta una potencial capaz de concebir sismos cercanos a 6,8 (Mw).

Según Astorga (2014), la Falla Zarcero forma parte de un patrón de fallas geológicas similares que corta la cordillera Volcánica Central y separan los estratovolcanes de la misma. La génesis de ese sistema de fallamiento geológico se vincula a patrones de esfuerzos tectónicos regionales que afectan la Cordillera Volcánica Central cuya edad es del Cuaternario, particularmente durante los últimos 500.000 años.

Falla Alajuela: Se asocian con este sistema de falla, dos sismos destructivos: el terremoto de Barba del 15 de

febrero de 1772 (Peraldo & Montero, 1994) y de Fraijanes del 30 de diciembre de 1888 (Alvarado et al., 1988) y enjambres de temblores con magnitudes inferiores a 4,0 que han ocurrido al norte del escarpe. Entre estos destaca uno en noviembre de 1989.

Es una falla activa, pues las rocas que han sido deformadas tienen edades del Pleistoceno Tardío y probablemente del Holoceno (Montero et al 2010). Por su geometría, extensión y sismos históricos, ésta puede generar terremotos de foco muy superficial, de magnitudes hasta de 6,2 Mw (Rojas et al 2004).

Interpretar desde el punto de vista geológico el efecto sísmico que puede tener la condición del terreno, respecto a la disposición de unidades de roca y su estructura, incluyendo datos sobre los efectos de la morfología del terreno.

De acuerdo a los registros históricos, en la zona del proyecto se han sentido una diversidad de sismos con intensidades muy variables. La intensidad Mercalli Modificada (MM) mayor registrada en este sector ha sido de VII, seguido por algunos con intensidad de VI y el resto de menor magnitud. Se han registrado 5 sismos en la zona con la intensidad MM de VII, aspecto que debe ser tomado en cuenta en el diseño del proyecto.

Los sismos de mayor magnitud pueden generar inestabilidades en laderas, taludes e infraestructura por lo que todas las obras del proyecto deben de tomar en cuenta esta amenaza.

Potencial de Licuefacción

Esta sección se debe desarrollar sobre la base de los datos sobre la extensión y características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas de las unidades superficiales (no consolidadas) y del subsuelo superior, interpretar la situación respecto al potencial de licuefacción que puede presentar el terreno ante una sollicitación sísmica, para la cual debe analizar:

Realizar breve análisis de interacción de datos sobre características físicas e hidrogeológicas de las unidades geológicas superficiales (no consolidadas) identificadas en el AP.

De acuerdo con González de Vallejo (2002), la licuefacción se produce cuando determinados tipos de suelos afectados por terremotos, desarrollan elevadas presiones intersticiales de forma rápida (sin drenaje), dando a lugar a una pérdida de la resistencia al corte y a la rotura del suelo, que se comporta como si fuera un líquido. Este fenómeno provoca el fallo de cimentaciones, roturas de taludes y deslizamientos. Los suelos susceptibles de perder gran parte de su resistencia ante sollicitaciones dinámicas son las arenas finas y flojas y las arenas y limos mal graduados. Otra de las condiciones necesarias para que tenga lugar la licuefacción es que el nivel freático esté alto, cerca de la superficie y que el grado de compactación sea bajo. Para que una zona sea considerada como vulnerable ante la licuefacción debe reunir las características siguientes:

- En la zona debe de existir la posibilidad de que se generen terremotos de magnitud superior o igual a 5,5
- La licuefacción se da en los primeros 15 metros de material, por lo que estos primeros 15 metros deben de estar constituidos en de arenas finas y flojas y las arenas y limos mal graduados
- El nivel freático debe de ser superficial, por lo menos a 3 m de profundidad
- Por debajo de los 5 metros de profundidad de nivel freático la susceptibilidad de licuefacción es muy baja

En la zona en que se ubica el proyecto se han generado varios sismos de magnitud superior a 5,5. Los primeros 20 metros presentan presentan tobos con algunos facies arenosos. El nivel freático es inferior a los 30m. Por lo tanto se considera que no existe amenaza de licuefacción para el AP.

Interpretar y calificar el potencial de licuefacción que pudiese tener esas unidades geológicas dentro del AP ante la aplicación de cargas significativas o bien de sollicitaciones sísmicas. Interaccionar los datos con los resultados del Estudio de Ingeniería del terreno.

Se considera que no hay amenaza por licuefacción en el AP.

Representar los datos en el mapa del AP y señalar las limitantes al método aplicado.

Evaluación de la amenaza / riesgo por estabilidad ladera y actividad volcánica

Esta sección debe identificar y delimitar los volcanes y las laderas de montañas y colinas presentes en el AP y su AID.

Amenaza riesgo por estabilidad de ladera (taludes)

Esta sección debe realizarse con base en:

La sección de la estabilidad de taludes, del apartado Geotécnico, la cual debe haber considerado lo establecido en la Ley de Planificación Urbana y su reglamento, (en el caso que el AP se localice sobre un terreno cuya pendiente promedio es igual al 15%, o en su defecto, y a criterio de experto del profesional responsable, se encuentre en la zona inmediatamente adyacente a la base o parte superior de un talud natural o artificial cuya pendiente sea igual o superior al 15%, deberá integrar como parte del estudio de suelos una evaluación de estabilidad de taludes y como consecuencia del mismo definirá las recomendaciones sobre el tipo de obras de prevención y mitigación que deberán aplicarse).

Por aspectos de estabilidad de laderas y riesgo a deslizamiento, la ruta Opción A muestra condiciones geológicas más favorables, seguido por la Opción B y por último la Opción C.

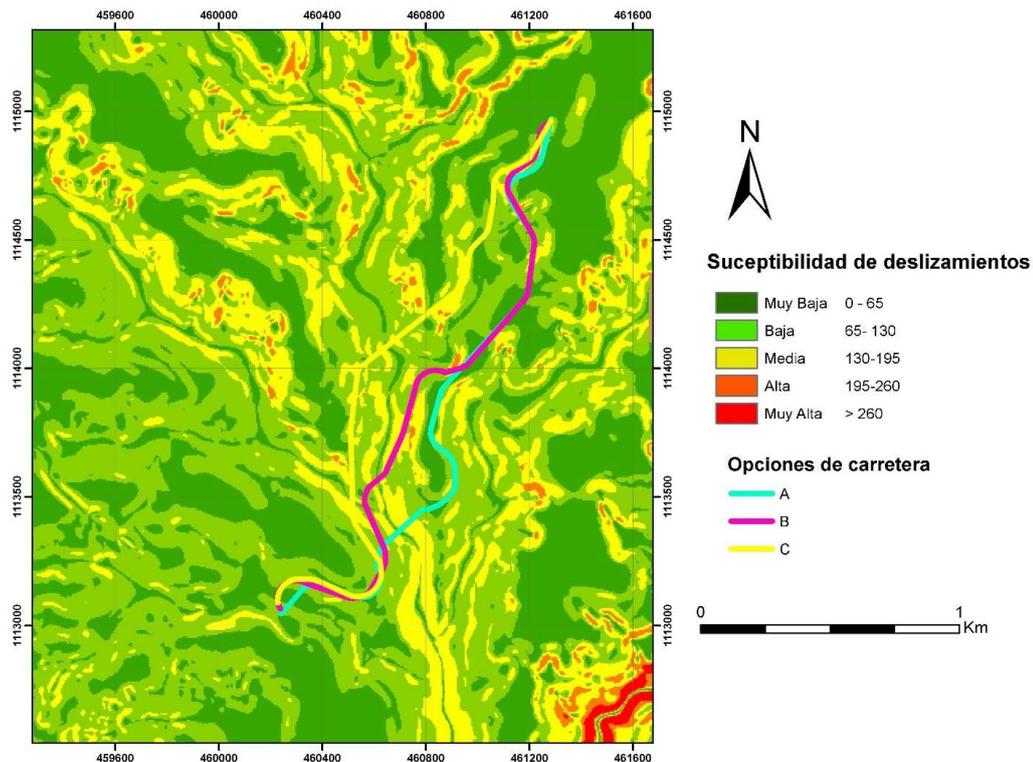
Para el análisis de riesgo por deslizamiento se utilizó el modelo de Mora-Vahrson (1991), según cartel de licitación. Sin embargo, cabe mencionar que este método es recomendado como una herramienta de macrozonificación y es útil a nivel regional. A nivel local, en áreas relativamente pequeñas tiene limitaciones debido a la escala de la información disponible y el objetivo mismo del método.

Los resultados en la aplicación del método Mora-Vahrson indican que, en condiciones críticas de sismo y lluvia, las laderas muestran un riesgo bajo a medio en cuanto a susceptibilidad a deslizamiento, con tramos muy cortos que clasifican con riesgo alto. Estos últimos se encuentran cercanos a los valles de los ríos, donde las pendientes de las laderas se verticalizan.

Las rutas opción A y B brindan resultados similares, aunque en general a lo largo de la ruta opción A se presenta una susceptibilidad al deslizamiento más favorable, con un potencial de muy baja a media, y escasos tramos cortos de susceptibilidad alta. A lo largo de la opción B se incrementa ligeramente el potencial de susceptibilidad al deslizamiento media comprada con la opción A.

En la opción C se presentan con mayor frecuencia susceptibilidad media, y en menor proporción baja a muy baja.

La siguiente figura muestra el mapa de susceptibilidad ante deslizamientos.



Mapa de susceptibilidad a deslizamiento del área de estudio.

Fuente: Cervantes, 2017.

Estudios geológicos y geotécnicos de detalle con exploración directa (cartografiado a escala 1:5000, perforaciones, muestreo y geofísica) son requeridos para el diseño final de las cimentaciones y cortes de las laderas, aspectos que deben ser contemplados en la fase de diseño final.

Si bien a nivel global no se observan problemas de estabilidad de las laderas, en estudios de detalle se deben descartar caída de bloques y desprendimientos rocosos menores en los valles de los ríos, cercanos a las cimentaciones de las pilas del puente. Así mismo, deslizamiento de la capa de suelo y de poco espesor que no son identificados por el método Mora-Vahrson.

Sección sexta del estudio de geología básica de la finca, específicamente: Datos geomorfológicos relevantes procesos de erosión-sedimentación, datos de geodinámica externa relevantes.

Este punto ya está desarrollado en el apartado de geología local.

Amenaza volcánica

Esta sección se desarrolla solo si el AP se localiza a menos de 30 Km de distancia de un centro de emisión volcánico activo o potencialmente activo deberá indicarse, tomando en consideración información previamente publicada para la zona y datos de geología local el tipo de amenaza volcánica que podría presentar el AP, para lo cual debe analizar:

Potencial de afectación del AP, por: flujos piroclásticos (“surges”, “lateral blasts” y nubes ardientes), flujos de lavas, caídas de cenizas, flujos de lodo (lahares primarios o secundarios), caída de “bombas” de lava, lluvia ácida.

La mayor amenaza volcánica a la zona del proyecto es debido al Volcán Poás, en las siguientes subsecciones se describen sus principales riesgos.

Potencial de proyección balística

El cráter del volcán Poás se encuentra a una distancia de 18 km del sitio del proyecto Radial Sarchí, por lo tanto, no existe riesgo por el lanzamiento o proyección balística.

Afectación por caída de ceniza

La distribución de la tefra de caída está fuertemente influenciada por la dirección del viento, así como por la masa de ceniza emitida. Por esta razón, se consideran las principales direcciones del viento, así como la intensidad de la erupción como indicador del volumen de la ceniza.

La zona del proyecto presenta un riesgo moderado a bajo por la caída de cenizas, lo cual debe ser tomado en cuenta en el diseño final.

Afectación por acidificación

Las zonas de peligro se establecieron, de forma similar, a los procedimientos seguidos con la ceniza; sin embargo, en este caso solo se consideraron los vientos predominantes en la capa de la atmósfera correspondiente a la altura del volcán pues, generalmente, la columna de gases se levanta menos de un kilómetro.

De acuerdo con el modelo utilizado, la zona del proyecto no sería afectada, aunque se encuentra cerca del límite de afectación baja.

Potencial de flujos de lava

A partir de la topografía se asume que las futuras coladas de lava serán canalizadas por los actuales sistemas fluviales. Para la delimitación de las zonas potencialmente afectadas por flujos de lava, se supone que la siguiente erupción puede tener lugar en cualquier punto de las áreas fuente identificadas por los especialistas. Se creó una superficie de costo que consideró, en primer lugar, la distancia a los ríos, y en segundo lugar, la pendiente. En otras palabras, se parte del supuesto de que la lava fluiría por los cauces actuales y su extensión lateral estaría determinada por las pendientes de los valles.

Los potenciales flujos de lava, los cuales se circunscriben cerca del cono del macizo del Poás, no alcanzan la zona del proyecto, por lo que no existe amenaza.

Potencial por flujos piroclásticos

Existen varias clasificaciones para los flujos piroclásticos, según la modalidad del fluido o el depósito resultante. De acuerdo con su tamaño, los pequeños o moderados son rápidamente conducidos por la topografía, en particular por los valles, en contraposición a los violentos, capaces de sobrepasar las barreras topográficas de tamaño moderado. En el caso de los identificados para el Poás, resultan pequeños, posiblemente relacionados con colapsos de columna eruptiva.

Las distancias que podrían recorrer los flujos piroclásticos ocurridos desde el volcán Poás no afectan el área del proyecto de la Radial Sarchí, de acuerdo al modelo considerado.

Potencial de las oleadas piroclásticas

Las oleadas piroclásticas tienen una duración relativamente corta y su área de impacto se limita a la zona alrededor del cráter o siguiendo el área de flujos piroclásticos; generalmente se trata de menos de unos pocos kilómetros (Nakada 2000). El criterio seguido fue establecer un corredor de 200 m de ancho alrededor de cada zona de peligro establecida para los flujos piroclásticos.

Las distancias que podrían recorrer las oleadas piroclásticas sucedidas desde el volcán Poás no afectan el área del proyecto de la Radial Sarchí, de acuerdo al modelo considerado.

Lahares

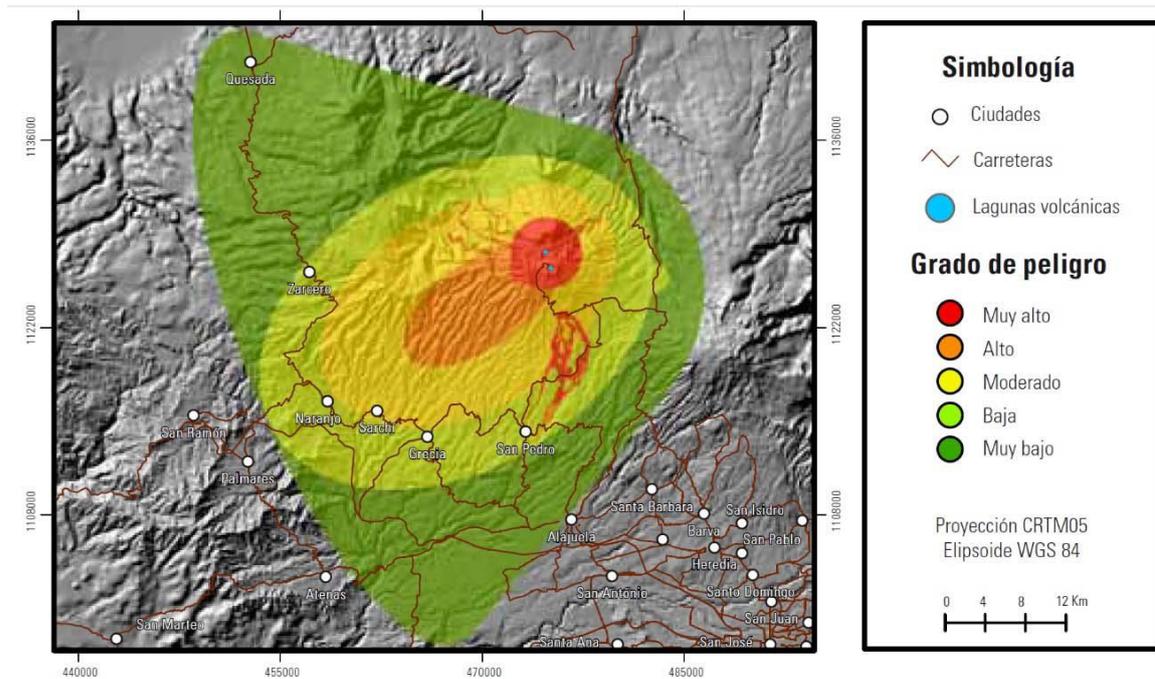
Se asume que los lahares se originarían en la cima, más específicamente, a los alrededores del cráter activo, y que estos serían conducidos por los cauces de montaña.

Las distancias que podrían recorrer los flujos laháricos generados desde la cúspide del volcán Poás no afectan el área del proyecto de la Radial Sarchí, de acuerdo al modelo considerado.

Establecimiento de medidas preventivas o de ajuste y adaptación del diseño de la obra.

Mapa de peligros para el volcán Poás

La categorización para la zona del proyecto es de baja a moderada, donde debe ser de consideración la caída potencial de cenizas y los efectos de lluvia ácida. Si bien para una carretera, estos elementos no son tan significativos, en el diseño se deben de prever las estructuras que no sean afectadas químicamente o establecer los mecanismos de limpieza de ceniza, si es considerado como un problema mayor.



Peligros combinados del volcán Poás.

Fuente: Cervantes, 2017.

Síntesis de resultados y conclusiones geológicas

Esta sección debe incluir una: discusión sobre la condición de geoaptitud por amenazas naturales del terreno, respecto a sus limitantes técnicas para el desarrollo de la actividad, obra o proyecto que se plantea.

De acuerdo con lo analizado, la principal amenaza para el proyecto vendría por eventos sísmicos que se puedan generar en las fallas cercanas. Se tienen dos fallas con trazos cercanos al AP, la Falla Zarcero y la Falla Alajuela, de acuerdo con estudios primera podría generar sismos de hasta 6,8 mientras que la segunda tiene potencial de generar sismos de 6,2 magnitud Mw. Todas las obras y taludes deben de ser diseñados tomando en cuenta esta amenaza.

De acuerdo con el análisis de estabilidad de laderas, no se encontraron señas de inestabilidades a nivel global aunque se recomiendan estudios de detalle al momento de realizar la obra.

No existe amenaza por licuefacción para el AP.

La amenaza volcánica para el AP vendría del volcán Poás y se trata principalmente de amenaza por caída de ceniza y lluvia ácida, las obras deben de tomar en cuenta estas amenazas en su diseño.

Discusión sobre las limitantes de incertidumbre y alcance de estudio.

Esta sección debe analizar al menos:

Alcance del estudio

Este estudio hace referencia al diseño preliminar de la vía entre la RN 1 y RN118. Se considera que se han abarcado las amenazas naturales relevantes de acuerdo con la información existente.

Aplicabilidad de los resultados

Los resultados son aplicables sin reservas al proyecto, se recomienda realizar estudios de estabilidad de taludes en detalle en etapas posteriores

Tareas pendientes para las fases posteriores del proyecto

Se requiere un estudio de detalle de estabilidad de taludes.

Incertidumbres no resueltas

Se considera que se ha abarcado el contexto geológico de manera completa y no existen limitantes que impidan el desarrollo del proyecto. Es importante que todas las obras tomen en cuenta la amenaza sísmica ya que hay fallas capaces de generar sismos de magnitudes Mw superiores a 6. No hay evidencia de inestabilidad de laderas. El nivel freático se encuentra por debajo de los 30m por lo que no hay amenaza por licuefacción.

Conclusión genera sobre la viabilidad geológica del terreno en virtud de la obra a desarrollar.

El área en la que se pretende desarrollar el proyecto es apta para la realización de la obra planteada siempre y cuando se tome en cuenta la amenaza sísmica al momento de diseñar estructuras y taludes.

Referencias bibliográficas.

- Alvarado, G. & Carr, M. 1993: The Platanar-Aguas Zarcas volcanic centers, Costa Rica: spatialtemporal association of Quaternary calc-alkaline and alkaline volcanism. *Bulletin of Volcanology*. 55: 443-453.
- Alvarado, G.E., Morales, L., Montero, W., Climent, A. & Rojas, W., (1988): Aspectos sismológicos y morfotectónicos en el extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica.- *Rev. Geol. Amér. Central*, 9: 75-98.
- Alvarado, Guillermo, Wendy Pérez y Carolina Sigarán. 2000. "Vigilancia y peligro volcánico". En *Geología de Costa Rica*, editado por Percy Denyer y Siegfried Kussmaul, 251-272. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Alvarado, Guillermo. 2000. *Los volcanes de Costa Rica: geología, historia y riqueza natural*. 2ed. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED).
- Alvarado, Luis Fernando y Walter Fernández. 2001. "Climatología de la atmósfera libre sobre Costa Rica". *Tópicos en Meteorología y Oceanografía* 8 (2): 89-115. <http://www.imn.ac.cr/publicaciones/revista/Luis%20Fer%201%20Fin1201.pdf>
- Álvares, Juan y Galina Pridybailo. 2005. "Corrosión atmosférica en el volcán Poás, proyecto TROPICORR". *Tecnología en Marcha* 18 (2): 126-133.
- Astorga, 2014: Estudio neotectónico de la falla Zarcero, para la ciudad de Zarcero y alrededores. Estudio para CNE N° 2013LA. 96 pgs.
- Astorga, Allan. 2008. *Análisis de alcance ambiental del Plan GAM. Parte II*. San José: Gran Área Metropolitana (GAM) del Valle Central de Costa Rica.
- Barrantes, G & Malavassi, E., 2015. Mapas de peligros del Volcán Poás. *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía*. Vol, 24, n° 2, jul-dic 2015. ISSN 0121-215X. Bogotá, Colombia. PP 157-172.
- Barrantes, Gustavo. 2012. "Deficiencias del índice de fragilidad ambiental en la valoración de las amenazas naturales para la planificación territorial". En *Torno a la Prevención* 9:1-9. <http://www.relaciger.org/revista>.
- Borgia, A., Burr, J., Montero, W., Alvarado, G., & Morales, L.D., 1990: Fault propagation folds induced by gravitational failure and slumping of the Costa Rica Volcanic Range: Implications for large terrestrial and Martian edifices.- *Jour. Geophys. Res.*, 95: 14357-14382.
- Casertano, Lorenzo, Andrea Borgia y Corrado Cigolini. 1983. "El volcán Poás, Costa Rica: cronología y características de la actividad". *Geofísica Internacional* 22 (3): 215-236.
- Cepal (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) y BID (Banco Interamericano de CNE (Centro Nacional de Atención y Prevención de Emergencias). 2009. Mapa de amenazas naturales potenciales: hoja Poás. Escala 1: 50.000. San José: CNE. Delmelle, Pierre y John Stix. 2000.
- Código Sísmico de Costa Rica. Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. – 4ª. Ed. – Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2011.
- consideraciones para su prevención". *Geoistmo* 1 (2): 11-24.
- Denyer, P., Montero, W & Alvarado, G.E., 2009: *Atlas tectónico de Costa Rica*.- 79 págs. Ed. Univ. Costa Rica, San José.
- Desarrollo). 2000. *Un tema del desarrollo: la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres*. Escuela Centroamericana de Geología. 2005. *Geología del cantón de Poás y estudios adicionales*. San José: Addendum Convenio AyA-FUNDEVI.
- Escuela de Ingeniería Forestal. 2008. *Atlas digital de Costa Rica*. Base de datos georreferenciada. CDROM. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Gardner, Cynthia, Kevin Scott, Dan Miller, Bobbie Myers, Wes Hildreth y Patrick Pringle. 1995. "Potential Volcanic Hazards from Future Activity of Mount Baker, Washington". Open-File Report 95-498. http://pubs.usgs.gov/of/1995/0498/pdf/of95-498_text.pdf

Gazel, Esteban y Pablo Ruiz. 2005. "Los conos piroclásticos de Sabana Redonda: componente magmático enriquecido del volcán Poás, Costa Rica". Revista Geológica de América Central 33:45- 60. DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v0i33.4235>.

Heinimann Hans, Kurt Hollenstein, Hans Kienholz, Bernhard Krummenacher y Peter Mani. 1998. Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien 85. Berna: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

HERRERA, A., MATA, A., MONROE, R. & SIBAJA, G. 1996: Geología del área Platanar-Porvenir.- 59 págs. Práctica geológica de la Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica [Informe inédito].

Hoyuela, José, Francisca Gómez y Roberto Martínez. 2012. Plan territorial espacial de ordenación para la prevención de riesgos. Madrid: Centro de Observación y Teledetección Espacial (COTESA).

<http://www.revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/view/39263/35702>

http://www.tenerife.es/planes/PTEOPrevRiesgos/adjuntos/Memo_Orden00.pdf

Huapaya, S. & Rojas, V., 2012: Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (3346-III) - Escala 1:50.000, Dirección de Geología y Minas, Laboratorio de Ingeniería Sísmica, San José, Costa Rica.

Informe Análisis de Riesgo a desastres – Radial Sarchí

Informe técnico final, Proyecto FUNDEVI (UCR) No. 1515-01 para el Instituto Nacional de Seguros (INS). Dic. 2004, 178p.

Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica. <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio>.

Kappes, Melanie, Margreth Keiler, Kirsten von Elverfeldt y Thomas Glade. 2012. "Challenges of Analyzing Multihazard Risk: A Review". Natural Hazards 64 (2): 1925-1958. DOI: 10.1007/s11069-012-0294-2.

Keller, Edward y Robert Blodgett. 2004. Riesgos naturales. Madrid: Prentice-Hall. Macías, José Luis y Lucia Capra. 2005. Los volcanes y sus amenazas. México: Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Educación Pública (SEP), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

Malavassi, Eduardo, J. B. Gill y D. Trimble. 1990. "Nuevas dataciones radiométricas del alineamiento volcánico del Poás (Costa Rica): contribución a la evaluación de peligros volcánicos". Resúmenes de ponencias y afiches presentados al VII Congreso Geológico de América Central, 19 al 23 de noviembre, 28-29. Heredia: Universidad Nacional de Costa Rica.

Martínez, María, Eduardo Fernández, Juan Valdés, Vilma Barboza, Rodolfo Van der Laat, Eliécer Duarte, Eduardo Malavassi, Lisseth Sandoval, Jorge Barquero y Tomás Marino. 2000. "Chemical Evolution and Volcanic Activity of the Active Crater Lake of Poás Volcano, Costa Rica, 1993-1997". Journal of Volcanology and Geothermal Research 97 (1-4): 127-141. DOI:10.1016/S0377-0273(99)00165-1.

México: Cepal, BID. <http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/4451/Un%20tema%20del%20desarrollo%3a%20la%20reducci%C3%B3n%20de%20a%20vulnerabilidad%20frente%20a%20los%20desastres.pdf?sequence=1>

Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. 2013. Política nacional de ordenamiento territorial 2012 a 2040. San José: Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos.

- Montero, W., 1999: El Terremoto del 4 de marzo de 1924 (Ms 7,0): ¿Un Gran temblor interplaca relacionado al límite incipiente entre la placa Caribe y la microplaca de Panamá. *Rev. Geol. Amér. Central.*, 22: 25 – 65
- Montero, W., 2001: Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la Microplaca de Panamá.- *Rev. Geol. Amér. Central*, 24: 29-56.
- Montero, W., DENYER, P., BARQUERO, R., ALVARADO, G.E., COWAN, H., MACHETTE, M., HALLER, K. & DART, R., 1998: Map and database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. – Reporte preliminar de USGS.
- Montero, W., Rojas, W., 2001: Estudio de sismicidad y fallamiento activo de obras de readecuación del proyecto hidroeléctrica tacaes Alajuela. Informe a través de FUNDEVI, UCR, para INCOFER.
- Montero, W., Soto, G., Alvarado, G.E. & Rojas, W., (2010): División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del Volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y de sismicidad histórica. *Rev. Geol. A.Ctral*, 43: 13-36.
- Mora, Raúl. 2010. “Peligrosidad volcánica del Poás basada en las principales erupciones históricas de 1834, 1910 y 1953-1955”. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, Heredia.
- Mora, S. & Vahrson, W. (1991). Determinación a priori de la amenaza de deslizamientos sobre grandes áreas, utilizando indicadores morfodinámicos. En: Memoria sobre el Primer Simposio. Bogotá, Colombia. pp. 259-273
- Nakada, Setsuya. 2000. “Hazards from Pyroclastic Flows and Surges”. En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 945-956. San Diego: Academic Press.
- OVSICORI-UNA (Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica). 2003. Mapa de restricciones al uso del suelo y libre tránsito de personas, volcán Arena, Costa Rica. Escala 1:25.000. Heredia: OVSICORI-UNA.
- Paniagua, Sergio y Gerardo Soto. 1986. “Reconocimiento de los riesgos volcánicos potenciales de la Cordillera Central de Costa Rica, América Central”. *Ciencia y Tecnología* 10 (2): 49-72.
- Paniagua, Sergio y Luis Diego Morales. 1987. “Peligro sísmico y volcánico en Costa Rica: Peraldo, G. & Montero, W., 1994: Terremotos coloniales de Costa Rica.- Editorial Tecnológica de Costa Rica, 162 p..
- Peterson, Donald W. y Robert I. Tilling. 2000. “Lava Flow Hazards”. En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 957-972. San Diego: Academic Press.
- Prosser, Jerome T. y Michael J. Carr. 1987. “Poás Volcano, Costa Rica: Geology of the Summit Region and Spatial and Temporal Variations among the most Recent Lavas”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 33 (1-3): 131-146. DOI: 10.1016/0377-0273(87)90057-6.
- PROTTI, R., 1996: Monitoreo de desplazamientos a lo largo de la falla La Garita (Costa Rica) entre marzo y diciembre de 1990. *Rev. Geol. Amér. Central.*, 19/20: 183-185.
- Red Sismológica Nacional, 1994. Catálogo de Mapas de Isosistas de Temblores y Terremotos Importantes de Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad. Dirección de Ingeniería Civil. Departamento de Geología (Inédito).
- Red Sismológica Nacional, 2009. Terremoto de Cinchona del 8 de Enero del 2009. Instituto Costarricense de Electricidad. Sección de Sismología y Vulcanología. Escuela Centroamericana de Geología (Inédito).
- Rojas, M., 2011: Neotectónica del extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central, enfocado en la falla Zarcero, sector oeste del complejo volcánico Platanar-Porvenir.- 90 págs. Univ. Costa Rica, San José [Tesis de Lic.].

Rojas, W., Montero, W., Schmidt, V., Hidalgo, P. & Moya, C. (2004a): Estudio de amenaza sísmica de Costa Rica y respuesta del suelo para las diez ciudades con mayor índice de población del país.

RSN: UCR-ICE (Red Sismológica Nacional). <http://www.rsn.ucr.ac.cr/index.php/vulcanologia/informacion-general/31-poas>.

Saucedo, Ricardo, José Luis Macías, Michael F. Sheridan, Marcus I. Bursik y Jean-Christophe Komorowski. 2005. "Modeling of Pyroclastic Flows of Colima Volcano, Mexico: Implications for Hazard Assessment". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 139 (1-2): 103-115. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2004.06.019.

Scott, William. 1993. "Los peligros volcánicos". En *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos*, editado por Robert Tilling, 9-24. Traducido por Bernardo Beate. Santa Fé: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos.

Soto, Gerardo y Sergio Paniagua. 1992. "Cordillera Volcánica Central (Costa Rica): sus peligros y prevenciones". *Revista Geográfica de América Central* 1 (25-26): 291-304. <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2915> Universidad de Costa Rica. 2014. "Poás".

Vallance, James. 2000. "Lahares". En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 601-616. San Diego: Academic Press.

Van Westen, Cees. 2000. Estudio preliminar de amenazas naturales en la cuenca del río Turrialba, cantón de Turrialba, Costa Rica. Turrialba: International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC).

Vargas & Fernández, 2002. CONTRIBUCIÓN A LA HIDROGEOLOGÍA VOLCÁNICA DE GRECIA, VALLE CENTRAL OCCIDENTAL DE COSTA RICA. *Revista Geológica de América Central*, 27: 27-38, 2002, UCR.

Vargas, Carlos. 1979. *Antología el Volcán Poás*. San José: EUNED. Waythomas, Christopher y Thomas Miller. 1999. Preliminary Volcano Hazard Assessment for Iliamna Volcano, Alaska. Open-File Report 99-373. Reston: United States Geological Survey (USGS). <http://pubs.usgs.gov/of/1999/0373/pdf/of99-373text.pdf>

Wells, D. & Coppersmith, K., (1994): New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement.- *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 4: 974-1002.

Williams, Glyn y Hazel Rymer. 2000. "Hazards of Volcanic Gases". En *Encyclopedia of Volcanoes*, editado por Haraldur Sigurdsson, 997-1004. San Diego: Academic Press.

Williams, S. N. 1986. Reseña de Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions de Russell J. Blong, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 30 (3-4): 379-380. DOI: 10.1016/0377-0273(86)90062-4.

Zárate, Eladio. 1988. "Factores meteorológicos asociados a desastres causados por erupciones volcánicas en Costa Rica". *Ciencia y Tecnología* 12 (1-2): 41-52.

Zárate, Eladio. 1989. Elementos meteorológicos importantes para la toma de decisiones con respecto a las emanaciones contaminantes del volcán Poás. San José: Instituto Meteorológico Nacional.