



INFORME FINAL

ACUEDUCTO DE OROSI

Sub-Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de la Conducción:
El Llano a Tres Ríos, Provincia de Cartago, Costa Rica

Preparado por:

Geomatrix Consultants, Inc.
San Francisco, California

Preparado para:

Pan American Health Organization
Washington, D.C.

Contrato N°: PO 01278 (MK)

- Organización Panamericana de la Salud
San José, Costa Rica
- Instituto Costarricense de
Acueductos y Alcantarillados
San José, Costa Rica

Setiembre 1994
Proyecto No. 2656

Geomatrix Consultants

TABLA DE CONTENIDOS

	<u>Página</u>
LISTA DE TABLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
1.0 INTRODUCCION	1
1.1 Propósito y Objetivos	2
1.2 Alcance y Metodología	2
1.3 Reconocimientos	4
2.0 MARCO GEOLOGICO Y TECTONICO REGIONAL	5
2.1 Marco Tectónico Regional	5
2.2 Marco Geológico y Geomorfológico	7
3.0 RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES	9
3.1 Interpretación de Imágenes de Radar y Fotografías Aéreas	9
3.1.1 Lineamiento Coris	10
3.1.2 Lineamiento Agua Caliente (Guarco)	11
3.1.3 Lineamiento Río Navarro	11
3.1.4 Lineamiento Orosi	12
3.1.5 Lineamiento Cedral	12
3.2 Geología Cuaternaria y Geomorfología Tectónica	12
3.2.1 Embalse El Llano a Río Navarro	13
3.2.2 Area del Río Navarro	13
3.2.3 Tramo del Valle de Cartago a Tres Ríos	15
3.3 Identificación y Evaluación de las Fallas Principales	16
3.3.1 La Falla Navarro	18
3.3.1.1 Criterios Geomorfológicos y Geológicos	18
3.3.1.2 Resultados de los Estudios de las Trincheras	19
3.3.1.3 Análisis de la Sismicidad Histórica y Reciente	22

TABLA DE CONTENIDOS (continuación)

	<u>Página</u>
3.3 2 Las Fallas Agua Caliente y Coris	23
3.3.2.1 Criterios Geomorfológicos y Geológicos	23
3.3.2.2 Resultado de los Estudios de Trincheras	23
3.3.2.3 Análisis de la Sismicidad Histórica y Reciente	24
4.0 EVALUACION DE LA MAGNITUD MAXIMA Y DEL DESPLAZAMIENTO	25
4.1 Parámetros de las Fallas	25
4.1.1 Longitud de Ruptura	25
4.1.2 Ancho del Plano de Falla	26
4.1.3 Area de Ruptura	26
4.1.4 Desplazamiento por Evento	26
4.2 Estimación de la Magnitud Máxima y del Desplazamiento	27
4.2.1 Falla Navarro	30
4.2.2 Fallas Coris y Agua Caliente	30
5.0 ANALISIS DE LA AMENAZA SISMICA	32
5.1 Metodología	32
5.2 Recopilación, Compilación y Análisis de los Datos	33
5.2.1 Datos Tectónicos y Sismológicos	33
5.3 Análisis de la Sismicidad	34
5.3.1 Análisis de la Sismicidad Cortical	34
5.3.1.1 Sismicidad Histórica	34
5.3.1.2 Sismicidad del Período 1900-1974	36
5.3.1.3 Sismicidad del Período 1975-1993	37
5.3.1.4 Magnitudes Máximas Probables Considerando la Sismicidad	38
5.3.1.5 Período de Recurrencia	39
5.3.2 Los Temblores de la Zona de Subducción	39
5.3.2.1 Los Temblores Interplaca	39
5.3.2.2 Los Temblores Intraplaca	40
5.4 Zonificación Sísmica	41
5.4.1 El Fallamiento Cortical de la Región Central-Este de Costa Rica	41
5.4.1.1 Sistema de Fallas de la Cordillera Volcánica Central (Zona 1)	42
5.4.1.2 Sistema de Fallas del Este y Sur de San José y Cartago (Zona 2)	42

TABLA DE CONTENIDOS (continuación)

	<u>Página</u>
5.4.1.3 Sistema de Fallas del Suroeste de San José (Zona 2)	42
5.4.1.4 Sistema de Fallas de la Región de los Cerros Turrubares (Zona 4)	42
5.4.1.5 Sistema de Fallas asociado a la Baja Talamanca (Zona 5)	42
5.4.1.6 Sistema de Fallas de Talamanca Central (Zona 6)	42
5.4.2 Los Temblores de la Zona de Subducción	43
5.4.2.1 La Zona Interplaca	43
5.4.2.2 La Zona Intraplaca	43
5.5 Evaluaciones Sobre el Banco de Datos Sismológicos	43
5.5.1 Homogenización de las Magnitudes	44
5.5.2 Análisis de Completitud	44
5.6 Estimación de la Amenaza Sísmica	45
5.6.1 Parámetros de las Fuentes Sísmicas	45
5.6.2 Relaciones de Atenuación	47
5.7 Resultados de la Evaluación de la Amenaza Sísmica con Base en la Aceleración para el Sitio Seleccionado	47
5.7.1 Amenaza Sísmica con Base en la Aceleración Máxima del Suelo (MGA)	47
5.7.2 Máxima Duración Probable de la Sacudida	48
5.7.3 Parámetros Obtenidos de los Registros Acelerográficos	49
5.7.4 Estimación de los Períodos Predominantes Utilizando Espectros de Amplitudes de Fourier Para Suelo Blando	50
5.7.5 Espectros de Respuesta y Períodos Predominantes para Suelo Blando, Suelo Firme y Roca	52
5.7.5.1 Períodos Predominantes en Suelo Blando	53
5.7.5.2 Períodos Predominantes en Suelo Firme	53
5.7.5.3 Períodos Predominantes en Roca	53
6.0 EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCION	54
6.1 Metodología	54
6.2 Resultados	54
7.0 EVALUACION DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES	57
7.1 Metodología	57
7.2 Resultados	58

TABLA DE CONTENIDOS (continuación)

	<u>Página</u>
8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
8.1 Amenaza Sísmica	61
8.2 Amenaza de Rupturas de Fallas	62
8.2.1 Fallas Recomendada para la Mitigación	63
8.2.2 Medidas Potenciales de Mitigación	64
8.3 Licuefacción	65
8.3.1 Medidas Potenciales de Mitigación	65
8.4 Estabilidad de Taludes	66
9.0 REFERENCIAS	67
TABLAS	76
FIGURAS	92
FOTOGRAFIAS	140
APENDICE A: DESCRIPCIONES DE LA ESTRATIGRAFIA DE LA REGION	A-1
APENDICE B: IDENTIFICACION Y DESCRIPCION DE LOS LINEAMIENTOS	B-1
APENDICE C: RESULTADOS DEL ANALISIS DE LA RECURRENCIA Y MAGNITUD MAXIMA	C-1
APENDICE D: EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCION	D-1

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Resumen de Características de Suelos Desarrollados en Terrazas Fluviales en la Area de Estudio y Otros Partes de Costa Rica
Tabla 2	Resumen de Magnitudes Máximas y Desplazamientos Estimados para las Fallas Navarro, Agua Caliente, y Coris.
Tabla 3	Terremoto de Cartago del 2 de Setiembre de 1841.
Tabla 4	Temblores de Subducción de las Zonas Sísmicas de Nicoya, Quepos y Osa.
Tabla 5	Parámetros de las Fuentes Sísmicas que Presentan Amenaza Sísmica al Sitio de Ubicación del Sifón del Acueducto Orosi

TABLA DE CONTENIDOS (continuación)

Tabla 6	Resultados de Amenaza Sísmica para Lecho Rocoso y Suelo Blando.
Tabla 7	Estaciones del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica.
Tabla 8	Aceleraciones Máximas Registradas: Estación Acelerográfica Cartago - Tecnológico (Suelo Blando).
Tabla 9	Aceleraciones Máximas Registradas. Estación Acelerográfica Cartago - Parque Central (Suelo Blando).
Tabla 10	Aceleraciones Máximas Registradas: Estación Acelerográfica Cartago - RECOPE (Suelo Duro).
Tabla 11	Aceleraciones Máximas Registradas: Estación Acelerográfica Cartago - Cachi (Roca).
Tabla 12	Ubicación de los Sondeos DPL, Tramo Río Taticú - Coris.
Tabla 13	Clasificación del Potencial de Licuefacción.
Tabla 14	Relación Magnitud-Distancia de la Fuente para la Intensidad de Arias, Probabilidad de Excedencia de 50% (P=0).
Tabla 15	Relación Magnitud-Distancia de la Fuente para la Intensidad de Arias, Probabilidad de Excedencia de 16% (P=1).
Tabla 16	Relación Magnitud-Distancia de la Fuente para la Intensidad de Arias, Probabilidad de Excedencia de 84% (P=-1).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ubicación y Perfil del Acueducto Orosi: El Llano a Tres Ríos.
Figura 2	Mapa Tectónico Regional del Sur de América Central.
Figura 3	Fallas Conocidas de la Región del Acueducto Orosi.

TABLA DE CONTENIDOS (continuación)

Figura 4	Mapa Geológico Generalizado del Area el Acueducto Orosi.
Figura 5	Mapa de Lineamientos de la Región.
Figura 6	Perfiles de las Terrazas del Río Navarro.
Figura 7	El Acueducto Orosi, Las Fallas Activas y Cruces de Ríos.
Figura 8	Plano N° 1, Cara Este de la Trinchera TGM.
Figura 8a	Simbología Usada en los Planos de la Trinchera.
Figura 9	Detalle N° 1 y Detalle N° 2 de la Trinchera TGM.
Figura 10	Plano N° 2, Cara Oeste de la Trinchera TGM, Tramo: 28 a 39 m.
Figura 11	Plano N° 2, Cara Oeste de la Trinchera TGM, Tramo: 39 a 50 m.
Figura 12	Relaciones Empíricas Entre Magnitud y Desplazamiento
Figura 13	Relaciones Empíricas Entre Magnitud y Longitud de Ruptura y Entre Desplazamiento y Longitud de Ruptura.
Figura 14	Mapa de Sismos de Costa Rica de 1975 a 1993 para Eventos con Magnitudes $M_w \geq 3,5$.
Figura 15	Terremotos Interplaca ($M_s \geq 7,0$) y Corticales del Interior de Costa Rica ($M_s \geq 5,0$) para el Período 1800-1993.
Figura 16	Isosistas del Terremoto del 2 de Setiembre de 1841.
Figura 17	Zonificación Sísmica Mostrando la Sismicidad para el Período 1984-1993 ($M_w \geq 2,3$) a un Radio de 50 km del Sifón del Río Navarro.
Figura 18	Zonificación Sísmica para la Zona de Subducción Somera conteniendo las Zonas de Nicoya, Quepos, y Osa (1984-1993; $M_w \geq 2,3$).
Figura 19	Zonificación Sísmica para la Zona de Subducción de Profundidades entre 40 a 70 km.
Figura 20	Zonificación Sísmica para la Zona de Subducción de Profundidades entre 70 a 110 km

TABLA DE CONTENIDOS (continuación)

- Figura 21 Zonificación Sísmica para la Zona de Subducción de Profundidades entre 110 a 200 km.
- Figura 22 Perfil de las Fuentes Sísmicas. Contiene la Actividad Sísmica a lo Largo de la Zona de Subducción de la Placa Coco Bajo la Placa Caribe en la Región Central de Costa Rica.
- Figura 23 Gráfico de Distribución de la Completitud del Catálogo Usado en el Estudio.
- Figura 24 Curva de Amenaza Sísmica, Aceleración del Terreno Máximo, g, con la Probabilidad Anual de Excedencia para Suelo según la Relación de Atenuación de Climent et al. (1994).
- Figura 25 Curva de Amenaza Sísmica, Aceleración del Terreno Máximo, g, con la Probabilidad Anual de Excedencia para Lecho Rocoso según la Relación de Atenuación de Climent et al. (1994).
- Figura 26 Ubicación de las Estaciones Acelerográficas del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica.
- Figura 27 Espectros de Amplitud de Fourier Registrados en las Estaciones Parque Central y RECOPE en Cartago Durante el Terremoto de Cóbano.
- Figura 28 Espectros de Amplitud de Fourier Registrados en las Estaciones Parque Central y en Cachí de Cartago Durante el Terremoto de Alajuela.
- Figura 29 Espectros de Amplitud de Fourier Registrados en las Estaciones del Parque Central y en Cachí de Cartago Durante el Terremoto de Limón.
- Figura 30 Espectros de Amplitud de Fourier Registrados en las Estaciones del Parque Central y en Cachí de Cartago Durante el Sísmo de los Santos.
- Figura 31 Espectros de Amplitud de Fourier Registrados en las Estaciones del Parque Central y en Cachí de Cartago durante el Sísmo de Pejibaye.
- Figura 32 Espectro de Respuesta Predominante de la Estación CTG en Suelo Blando.
- Figura 33 Espectro de Respuesta Predominante de la Estación TEC en Suelo Blando.

TABLA DE CONTENIDOS (continuación)

- Figura 34 Espectro de Respuesta Predominante de la Estación RCP en Suelo Firme.
- Figura 35 Espectro de Respuesta Predominante de la Estación CCH en Roca.
- Figura 36 Mapa de Potencial de Licuefacción, Tramo Río Taticú - Coris, Acueducto Orosi.
- Figura 37 Gráfico del Potencial de Licuefacción, Acueducto de Orosi, Muestras PH 17 y A/1.
- Figura 38 Gráfico del Potencial de Licuefacción, Acueducto de Orosi, Muestras 1-A y 1-B.
- Figura 39 Gráfico del Factor de Resistencia a la Licuefacción, Río Navarro, Acueducto Orosi.
- Figura 40 Gráfico del Factor de Resistencia a la Licuefacción, Río Toyogres, Acueducto Orosi.
- Figura 41 Gráfico del Factor de Resistencia a la Licuefacción, Río Reventado, Acueducto Orosi.
- Figura 42 Mapa de Fenómenos de Deslizamiento, Tramo Embalse el Llano - Puente Negro.
- Figura 43 Gráfico de Ocurrencia de Deslizamientos para Sismos de Diferentes Magnitudes en Costa Rica.
- Figura 44 Relación Entre Magnitud y Distancia de la Fuente para la Intensidad de Arias $(A_2)_{10} = 0,05 g$.
- Figura 45 Relación Entre Magnitud y Distancia de la Fuente para la Intensidad de Arias $(A_2)_2 = 0,05 g$.
- Figura 46 Diagrama de una Solución del Cruce de Falla por Modificación de la Forma de la Trinchera a Forma "V".
- Figura 47 Angulos de Cruce de una Tubería por una Falla de Rumbo Sinistral.

INFORME FINAL

ACUEDUCTO OROSI

SUB-ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE LA CONDUCCION: EL LLANO A TRES RIOS, PROVINCIA DE CARTAGO, COSTA RICA

1.0 INTRODUCCION

Geomatrix Consultants, Inc. fue seleccionado por Pan American Health Organization, Washington, D.C., para investigar la vulnerabilidad sísmica de la conducción del Acueducto Orosi del embalse El Llano al plantel de tratamiento del agua en Tres Ríos, Provincia de Cartago, Costa Rica. El acueducto es administrado por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y tiene una gran importancia dado que suministra casi el 50 por ciento del agua potable del área metropolitana de San José y Cartago. Las consecuencias de un fallamiento del acueducto metropolitano fue reconocido por Prudott y Cuevas (1988) y Mora (1993) calculó las pérdidas en más de \$1.500.000 en el caso de que ocurriera una avalancha destructiva a lo largo del río Reventado. Además de las pérdidas monetarias que podría provocar el río Reventado, Salazar et al. (1992) notaron que algunas poblaciones también estarían amenazadas en caso de la ruptura de la tubería en el tramo entre El Llano y río Navarro. Hasta ahora, no se ha realizado ningún estudio de la amenaza por sismos o rupturas por fallas activas.

El acueducto empieza unos 35 km sureste de San José y termina en Tres Ríos pocos kilómetros al este de San José (Fig. 1). La conducción cuenta con un diámetro de un metro y una longitud de aproximadamente 29 km. La toma de agua del embalse El Llano se ubica del lado norte del embalse y esta a una elevación de aproximadamente 1750 m sobre el nivel del mar. Los primeros 6 km del trayecto se localizan en una ruta montañosa con pendientes muy fuertes. La conducción baja hasta 1040 m donde se ubica el sifón sobre el río Navarro. La conducción sube abruptamente a partir del río Navarro hasta unos 1300 m y pasa por los valles de Cartago y Coris. Al oeste del Valle Coris el acueducto sigue el valle de la Quebrada Barahona, luego entra a un túnel con una longitud de 1 km dentro la montaña de La Carpintera, finalmente sale y baja La Carpintera antes de entrar a la ciudad de Tres Ríos.

Además del cruce sobre río Navarro, la conducción cruza sobre el río Taticú al sur de Cartago, cruza bajo el río Toyogres y el río Reventado, la está elevada en los 60 m antes de la entrada del túnel, y cruza sobre el río Tiribí al lado sur de Tres Ríos. El Plantel de Tratamiento de agua de Tres Ríos está aproximadamente a 1380 m sobre el nivel del mar.

1.1 PROPOSITO Y OBJETIVOS

El propósito del estudio del Acueducto Orosi es investigar la vulnerabilidad de la conducción bajo condiciones sísmicas. La vulnerabilidad estudiada incluyó la vulnerabilidad por ruptura de fallas activas, estimación de las aceleraciones esperadas durante la vida del sistema, identificación de áreas susceptibles a licuefacción, e identificación de taludes inestables. Los objetivos del estudio fueron:

- (1) Identificar y caracterizar las fallas activas que cruzan el tramo y pueden causar rupturas o daños a la línea de conducción.
- (2) Estimar la edad de los movimientos más recientes y la frecuencia de desplazamiento de las fallas.
- (3) Estimar la amenaza sísmica sobre la línea de conducción incluyendo las aceleraciones esperadas especialmente en el sitio del sifón.
- (4) Estimar el potencial por licuefacción en los sitios más importantes del tramo.
- (5) Identificar taludes inestables.
- (6) Presentar recomendaciones y soluciones para los posibles problemas en los cruces de las fallas, áreas de licuefacción potencial y taludes inestables.

1.2 ALCANCE Y METODOLOGIA

El trabajo se puede dividir en cuatro partes distintas: (1) Estudio de las fallas activas, (2) El estudio de la amenaza sísmica, (3) Estudio de licuefacción, y (4) Estudio de los taludes.

- El estudio inicial de las fallas activas consistió de un repaso de los mapas disponibles y la literatura existente en la región de interés.
- Imágenes radar y fotografías aéreas fueron analizadas para identificar lineamientos y estructuras que podrían ser tectónicamente activas y para delimitar los depósitos Cuaternarios. El análisis permitió obtener un mejor detalle de las fallas principales que cruzan la conducción y pueden amenazar la integridad de la tubería.

Para interpretación de la fotogeología y análisis de imágenes radar de la ruta, se utilizó las siguientes imágenes y fotos de alta altitud:

- synthetic aperture radar (4-27-92, Task 92-007, Narrow Swath; Central Valley Costa Rica; imágenes L8.1/P004 2/5, 3/5, 4/5, L8 2/P003 2/5, 3/5, L8.3/P002 3/5)

- Escala 1:20 000
SNAA: R259, 15 mayo 1989, No. 45827-45830
SNAA: R259, 15 mayo 1989, No. 45843-45849
SNAA: R259, 15 mazo 1989, No. 45863-45865
SNAA: R259, 15 mayo 1989, No. 45885-45887

- Escala 1:30.000
IGN: R72 L198, 4 febrero 1974, No. 190-210

- Escala 1:35.000
IGN: R129 L-311-2, 6 enero 1978, No. 11924-11927
IGN: R129 L-205-8, 6 enero 1978, No. 11976-11981

- Escala ~ 1.50.000
USAF: 55-AM-73 Roll 32, 16 marzo 1960, No. 3334-3335
USAF: 55-AM-73 Roll 60, 18 febrero 1961, No. 6110-6112

- Escala ~ 1:60.000
DMA: Roll-1, ST 20A, 20 enero 1992, No. 0264-0268
AID: VV HURD-M-13, 10 feb 1965, No. 2606-2617

- Giras de campo fueron realizadas con representantes del Acueductos y Alcantarillados para reconocer la línea de conducción, revisar los contactos geológicos y seleccionar sitios para hacer trincheras.

- Excavación de dos trincheras en los mejores sitios de la falla Navarro que mostraban una morfología más sugestiva para determinar depósitos recientes desplazados por la falla activa

- Estudios del campo de la geología Cuaternaria para obtener información sobre geología básica y fallas, revisar interpretaciones de la fotogeología y hacer estudios de licuefacción y estabilidad de taludes (aproximadamente 4 hombre-meses). El esfuerzo de trabajo de campo incluyó perfiles de terrazas fluviales en el río Navarro, recolección de diversos datos sobre la constitución de los depósitos del Cuaternario Tardío y de los suelos para hacer correlaciones de terrazas que pueden ser afectados por fallas y para estimar la edad de los depósitos cortados o no cortados por las fallas, además se recolectaron muestras para obtener dataciones de C14.
- Los estudios de estabilidad de taludes y licuefacción incluyeron análisis de las fotos aéreas para identificar sitios que merecían estudios más detallados y visitas al campo, para confirmar o negar las interpretaciones preliminares. Los estudios de licuefacción incluyeron sondeos de "penetrómetro ligero" de tipo alemán (DPL) y muestras para análisis de laboratorio

1.3 RECONOCIMIENTOS

El Dr. Thomas F Bullard fue el encargado del proyecto y hizo tres viajes a Costa Rica por un tiempo total de más de un mes. Participó en los análisis de imágenes de radar, fotografías aéreas, geomorfología tectónica, trabajo de campo y en el análisis de los datos. El M.Sc. Walter Montero P., Director de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, dirigió el equipo de trabajo en los estudios de laboratorio y del campo. El M.Sc. Montero también participó en toda las fases del proyecto, especialmente con respecto al marco tectónico, trabajos neotectónicos, estudios de las trincheras, la sismicidad y en el análisis de la amenaza sísmica. El M.Sc. Rolando Mora C., Sub-director de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, hizo los investigaciones de taludes y licuefacción. El Lic. Luis Guillermo Obando A. fue el encargado del trabajo y mapeo de trincheras, mapeo de las unidades Cuaternarias y asistió en los trabajos geomorfológicos de campo. El Dr. Guillermo E. Alvarado I. asistió en el mapeo y la interpretación local de la estratigrafía de las trincheras. El Lic. Luis Guillermo Salazar M. hizo análisis de las imágenes de radar y de las fotografías aéreas y el mapeo de la geología Cuaternaria, trabajos geomorfológicos de campo (perfiles de terrazas y descripciones de suelos), y asistió en la descripciones de las trincheras. Mr. John A Egan (Geomatrix) y Dr. Frank H. Swan (Geomatrix) analizaron y revisaron los datos, interpretaciones y proporcionaron

sus asesoría en geología sísmica, licuefacción e ingeniería sísmica para alcanzar las mejores recomendaciones con respecto a la amenaza sísmica.

2.0 MARCO GEOLOGICO Y TECTONICO REGIONAL

Costa Rica se localiza en un marco de gran actividad tectónica. La interacción entre las placas tectónicas Coco y Caribe ha resultado en un ambiente geológico-tectónico bastante complicado y tiene una influencia notable en la actividad sísmica del país y de la región.

2.1 MARCO TECTONICO REGIONAL

Las placas Coco y Caribe interactúan a partir de la fosa Mesoamericana a lo largo del margen pacífico de América Central (Fig. 2). La subducción de la placa oceánica de Coco por debajo del área continental, origina la principal actividad sísmica del país. El panorama tectónico lo complica la interacción del levantamiento oceánico del Coco con el sur del país. Además se considera que el límite oeste de la microplaca Panamá divide a Costa Rica en dos regiones: Costa Rica Norte que se encontraría localizada dentro de la placa Caribe y Costa Rica sur, que se ubicaría dentro de la microplaca Panamá (Fig. 2) (Montero y Dewey, 1982; Astorga et al., 1991; Fisher y Gardner, 1991; Fan et al., 1993, Güendel y Pacheco, 1992; Fisher et al., 1994). La frontera tectónica entre ambas zonas atravesaría la región central de Costa Rica, donde se localizaría el Acueducto de Orosi. Un sistema de fallas que constituyen una zona de cizalle con desplazamiento predominantemente sinistral, ha sido propuesto para explicar las características estructurales y sismológicas más relevantes de esta región. El movimiento hacia el este del bloque sur del país originaría compresión a lo largo del margen caribe, desde Limón hacia el sureste, a lo largo del denominado Cinturón Deformado del Norte de Panamá (Bowin, 1976; Vergara Muñoz, 1988; Mann y Corrigan, 1990; Silver et al., 1990; Camacho y Viquez, 1993; Fisher et al., 1994).

Los tres bloques tectónicos interactuarían por lo tanto, a lo largo de diversas fronteras tectónicas, definiendo fuentes sísmicas con diversas características. La más relevante, por su actividad y el tamaño de los sismos que genera, es la relacionada con la convergencia de la placa Coco con el borde pacífico de Costa Rica, que inicialmente origina temblores

interplaca hasta 40-50 km de profundidad. A mayor profundidad, la subducción de la placa Coco dentro del manto astenosférico provoca la ocurrencia de temblores intraplaca.

La segunda fuente sísmica importante en actividad sísmica corresponde con los temblores superficiales que ocurren dentro de la corteza a profundidades generalmente menores a 20 km. Estos sismos ocurren tanto en el interior de la placa Caribe y la microplaca Panamá, como en el probable límite que existiría entre ambas unidades tectónicas a través de la región central de Costa Rica.

Las fallas más relevantes que se presentan en la última zona varían en su orientación y estilo entre diversos sectores del área central del país. En la zona pacífica central de Costa Rica han sido identificadas las fallas Barranca, Jesús María y Tárcoles, de rumbo noreste y de desplazamiento predominantemente sinistral, como las principales fallas a lo largo de las cuales se presenta el movimiento entre ambos bloques tectónicos (Fisher et al., 1994). Al atravesar los montes del Aguacate estas fallas no se continúan claramente, pero estudios más detallados son requeridos en esta región. Dentro del Valle Central y en sus bordes montañosos aledaños, se presentan varias fallas importantes, siendo las fallas de rumbo noroeste las que tienen mayor longitud. Entre estas tenemos las fallas Candelaria y Jaris (Arias y Denyer, 1991). La falla Alajuela es una de las fallas neotectónicas importantes de esta región. Tiene un rumbo oscilante aproximadamente oeste-noroeste y fue definida por Borgia et al. (1990) como una falla de desplazamiento inverso. Otras fallas de rumbos predominantes noroeste a este-oeste se presentan bordeando los bordes del Valle Central. Más hacia el este en el valle de Cartago, la falla Agua Caliente ha sido sugerida como una falla importante desde el trabajo de Dóndoli y Torres (1954) y fuente de los terremotos de Cartago de 1910 (Montero y Miyamura, 1981). Es en este sector de la zona de fallamiento donde se ubicaría el Acueducto de Orosi. La Figura 3 muestra las fallas principales conocidas en la región del acueducto. Al sur de Turrialba, la falla Atirro es la falla de mayor longitud existente. Del lado caribe, el sistema de fallas termina en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá, el cual consiste en una serie de fallas inversas y pliegues, que entre Puerto Limón y la zona fronteriza de Costa Rica-Panamá tiene un rumbo noroeste a este-oeste. Esta fue la fuente del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (Montero et al., 1994).

Las anteriores son en términos generales las fuentes sísmicas que pueden afectar el Acueducto de Orosi y que analizaremos en detalle adelante en las secciones 4 y 5.

2.2 MARCO GEOLOGICO Y GEOMORFOLOGICO

El marco geológico regional es relativamente sencillo pero complicado dado el marco tectónico y la historia volcánica. Las unidades expuestas en la región tienen una edad de Terciario (Mioceno Medio) hasta el Reciente (Holoceno). Las rocas Terciarias son una mezcla de lutitas, limolitas, areniscas y calizas depositados en ambientes antearcos marino y cuencas marinas protegidas con escasa influencia de mareas dominado por períodos anóxicos, localmente, pudo haber influencia del continente. Otras rocas Terciarias tienen origen volcánico, incluyendo lavas, tobas, cenizas, lahares y flujos de toba cenerítica. Las unidades Cuaternarias son predominante volcánicas, incluyendo coladas de lava, lahares, cenizas, flujos de lodo, conos de coluvión, terrazas aluviales, y depósitos fluviolacustres. Una descripción detallada de la estratigrafía se encuentra en el Apéndice A.

Las unidades Terciarias se encuentran a los bordes norte, oeste, y sur del Valle Coris, lado sur del Valle de Cartago, y sur del río Navarro (Fig. 4). Los cerros de La Carpintera en el borde norte del Valle Coris son prominentes. Las montañas dominadas por la formación Peña Negra, están compuestas de lutitas, limolitas y arenisca de grano fino, con evidencia de alteración hidrotermal (Castillo, 1969; Franco, 1978; Krushensky, 1972; Carballo, 1978, Carballo y Fischer, 1978; Rivier, 1979; Obando, 1983; Gómez, 1984; Pizarro, 1984a). Aislados cerros al sur del valle Coris y Cartago tienen afloramientos de las formaciones Peña Negra, San Miguel (calizas) y Coris (areniscas arcillosa y lutita, y arenisca cuarzosa-arcillosa). Al sur del río Navarro, las montañas están compuestas por rocas de las formaciones Peña Negra y Aguacate (coladas de lava basáltica-andesítica, lahares, tobas estratificas, y flujo de toba cinerítica) (Dengo, 1962; Castillo, 1969; Krushensky, 1972; Pizarro, 1984b; Denyer y Arias, 1991). Localmente hay afloramientos de travertino y fuentes de aguas termales a lo largo de las trazas de fallas activas, como las fallas Navarro, Agua Caliente y Coris.

En general, el lado norte de la conducción del acueducto en el valle de Cartago está compuesto de diversas rocas volcánicas originadas por el Volcán Irazú durante el Cuaternario. Los depósitos son compuestos de volcanoclásticos incluyendo: lahares, flujos de debris, conos coluviales y aluviales, cenizas, tobas y depósitos fluviales y fluviolacustres (Krushensky, 1972;

Krushensky et al., 1976; Echandi, 1981). Los ábanicos coluviales más importantes son los del río Reventado formados por avalanchas de lodo, cenizas, y grandes bloques de roca volcánica (conos de Quircot y Cartago), y lo más joven los flujos de barro de 1963-65. La colada de lava de Cervantes, en el lado sureste del Volcán Irazú, tiene un edad de 13.8 ka y es importante por haber represado el río Reventazón (Krushensky, 1972).

La geomorfología de la región es muy diversa, representada por pendientes muy fuertes entre el embalse y el río Navarro, valles anchos y ondulados, y pendientes de los cerros de La Carpintera. La ruta del embalse hasta el sifón sobre río Navarro está caracterizada por taludes muy inclinados contrapendiente con el buzamiento de las unidades sedimentarias, y taludes inestables. Quebradas con pendientes muy fuertes y cañones profundos son característicos de esta zona. El río Navarro está ubicado en un valle angosto, más de 300 m más bajo que el valle de Cartago. La anchura del valle aumenta cerca de su confluencia con el río Grande del Orosi, de menos de 100 m hasta casi 1 km. Una secuencia de 4 terrazas discontinuas sigue el río. Cerca la confluencia con el río Grande del Orosi hay hasta 6 niveles de terrazas. Donde el sifón cruza el río Navarro, el valle tiene una anchura de unos 200 m. Después de la subida al lado norte, la tubería cruza un terrano muy suave desarrollado en depósitos volcanoclásticos y fluvio lacustres de edad Cuaternario. Numerosos ríos y quebradas han cortado valles angostos y unos pocos metros (hasta 10 a 15 m) de profundidad. Su profundidad aumenta cercado el borde sur y este del valle. Varios niveles de terrazas están conservados a lo largo de las quebradas y ríos más grandes; capas de suelos han desarrollado encima de las terrazas y muestran la antigüedad y estabilidad de las terrazas. Cruzando el valle Coris, la ruta del acueducto pasa por terrenos de poca pendiente y depósitos muy inhomogeneos, como bloques de rocas volcánicas hasta gravas, arcillas, y arena suelta. Subiendo el valle de la Quebrada Barahona, las pendientes de los cerros de La Carpintera aumenta y hay evidencia de deslizamientos. El lado norte de La Carpintera tiene muy fuerte pendiente hasta el valle del río Tiribí. El río esta ubicado en un valle angosto compuesto de depósitos volcanoclásticos, lahares, y aluviones.