

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y
ALCANTARILLADOS

ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD

CONTRATO ASC-95/00166-0

ESTUDIO DE VULNERABILIDAD ACUEDUCTO DE OROSI

FASE III

RICARDO CAJIAO NAVARRO
BOGOTA, COLOMBIA, NOVIEMBRE 1995

ESTUDIO DE VULNERABILIDAD ACUEDUCTO DE OROSI
FASE III - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

INDICE

| Capítulo | Página |
|---|---------------|
| I. INTRODUCCION | 3 |
| II. ANTECEDENTES | 5 |
| III. RESUMEN DE LOS ESTUDIOS EFECTUADOS EN FASE II | 8 |
| 3.1 Vulnerabilidad Sísmica por Geomatrix | 8 |
| 3.1.1 Objetivo Alcance del Estudio | 8 |
| 3.1.2 Metodología | 9 |
| 3.1.3 Conclusiones y Recomendaciones | 11 |
| 3.2 Vulnerabilidad Geotécnica por Gómez, Cajiao y Asociados | 14 |
| 3.2.1 Objetivo y Alcance del Estudio | 15 |
| 3.2.2. Metodología | 16 |
| 3.2.3 Conclusiones y Recomendaciones | 20 |
| 3.3 Estudio Hidrológico, Hidráulico y Estructural por Enrique Silva | 21 |
| 3.3.1 Objetivo y Alcance | 22 |
| 3.3.2 Estudios Efectuados | 22 |
| 3.3.4 Conclusiones | 24 |
| IV CONCLUSIONES ZONIFICACION Y PRIORIZACION DE OBRAS | 26 |
| 4.4 Zonas de Mayor Vulnerabilidad | 28 |
| 4.4.1 Zonas Muy Vulnerables - Grado 3 | 28 |
| 4.4.2 Zonas Vulnerables - Grado 2 | 30 |
| 4.4.3 Zona de Baja Vulnerabilidad - Grado 1 | 32 |
| 4.4.4 Zonas No Vulnerables - Grado 0 | 34 |
| 4.5 Priorización de las Obras | 34 |
| 4.5.1 Bajo Costo y Mediano Beneficio | 34 |
| 4.5.2 Mediano Costo y Mediano Beneficio | 35 |
| 4.5.3 Alto Costo - Alto Beneficio | 36 |

| | | |
|--------|--|----|
| V. | RECOMENDACIONES | 41 |
| 5.1 | Estabilidad de Taludes | 41 |
| 5.1.1 | El Tapón | 41 |
| 5.1.2 | Los Vados | 44 |
| 5.1.3 | El Queque | 46 |
| 5.2 | Sifón del Río Navarro | 48 |
| 5.2.1 | Soportes | 48 |
| 5.2.2 | Válvulas y Uniones Flexibles | 48 |
| 5.3 | Cruce de Fallas | 49 |
| 5.3.1 | Falla Navarro | 49 |
| 5.3.2 | Falla de Aguas Calientes y Coris | 50 |
| 5.4 | Licuefacción | 50 |
| 5.5 | Portales Túnel La Carpintera | 51 |
| 5.5.1 | Entrada del Túnel K23+000 | 51 |
| 5.5.2 | Salida de Túnel K24+500 | 52 |
| 5.6 | Cruces del Río Tiribó y Q. Los Molinos | 52 |
| 5.7 | Protección Catódica | 53 |
| 5.8 | Recomendaciones Generales | 53 |
| 5.8.1 | Estudio de Alternativas | 53 |
| 5.8.2. | Compra de Equipos de Perforación | 54 |
| 5.8.3 | Organización Grupo Encargado | 55 |

ANEXOS

1. INFORMACION DE CAMPO ACTUALIZADA
2. BIBLIOGRAFIA
3. FIGURAS
4. FOTOGRAFIAS

I. INTRODUCCION

Cumpliendo con el Contrato No. ASC-95/00166-0 celebrado con la Organización Panamericana de la Salud, el suscrito consultor, Ricardo Cajiao Navarro, se permite presentar el Informe de Fase III que tiene por objeto la evaluación de la vulnerabilidad de la conducción del acueducto de Orosi.

El alcance de los trabajos se ha cumplido en su totalidad en la siguiente forma:

- a. Se efectuó una visita a San José en la semana del 24 al 30 de septiembre de 1995, durante la cual se hicieron dos reconocimientos de campo y se sostuvieron numerosas reuniones con los funcionarios del Instituto Costarricense de Acueducto y Alcantarillado, A y A.
- b. Se revisó la nueva información obtenida por AyA, especialmente la de inclinómetros y se dieron instrucciones sobre la manera de presentar en forma gráfica esta información.
- c. Se presenta en este informe una evaluación de los estudios de Fase II y se hace una priorización de las obras recomendadas para reducir la vulnerabilidad del acueducto de Orosi.
- d. Se presentan también en este informe diseños conceptuales y planos sobre las obras prioritarias por construir. Los cálculos y diseños detallados están a cargo de AyA, y el suscrito estará disponible para revisarlos si se considera necesario.

Este informe se presenta dentro del plazo contractual que es el 25 de noviembre de 1995. Con anterioridad, se envió información sobre taladros de perforación requerida con urgencia por AyA.

Se agradece la colaboración y atenciones que prestaron al suscrito los funcionarios de AyA: Dr. Alcides Prado, Gerente de Servicio al Cliente, German Araya, Olman Chacón y Rafael Rodríguez. Muy especialmente se agradece la asistencia, compañía y valiosas sugerencias de los ingenieros directamente involucrados en el acueducto de Orosi: Saúl Trejos, Coordinador Préstamo del BIRF, Paulino Picado, Coordinador Adjunto Préstamo del BIRF, Arturo Rodríguez, Jefe de Líneas de Conducción, y Oscar Quesada, Ingeniero de Diseño.

II. ANTECEDENTES

El Instituto Costarricense de Acueducto y Alcantarillado, atendiendo el crecimiento de la ciudad capital San José, inauguró en 1987 el proyecto Orosi, que toma las aguas de la cuenca alta del río Orosi y de su afluente el río Macho. El proyecto aporta aproximadamente el 45 % del suministro total de agua de San José, o sea 1.8 m³/s.

Los componentes principales del proyecto Orosi son:

- Una conducción desde el embalse de El Llano hasta la planta de Tres Rios, con una longitud de 28 km.
- Un túnel para atravesar el cerro de La Carpintera, con una longitud de cerca de 1 km.
- Una planta de tratamiento en Tres Rios, con una capacidad total de 2.500 l/s; 700 l/s de río Tiribi y 1.800 l/s del río Orosi.

A fines de 1990, recientemente inaugurado el acueducto, se presentó un deslizamiento en el sitio de El Tapón, K3+800, que puso en peligro un tramo de la conducción. En julio de 1991 el suscrito, ingeniero Ricardo Cajiao Navarro, fue requerido por el Banco Mundial para estudiar este deslizamiento. El consultor recomendó obras de estabilidad del talud que ya han sido construidas y cuyo funcionamiento hasta ahora ha sido satisfactorio. En ese momento se expresó la preocupación de la vulnerabilidad del sistema de conducción, especialmente en el sitio del sifón que cruza el río Navarro.

En 1994 el Instituto Costarricense de Acueducto y Alcantarillado solicitó al suscrito evaluar la vulnerabilidad de la conducción total

entre el embalse de El Llano y la planta de Tres Rios. Este estudio se dividió en tres fases a saber:

- Fase I. En la cual se hizo una evaluación de los riesgos mayores y a que está sometida la conducción en toda su longitud y se estableció el alcance de los estudios especiales que serían llevados a cabo para analizar la vulnerabilidad del sistema Orosi. En esta fase se elaboraron los términos de referencia para contratar tres estudios especiales: riesgo sísmico, riesgo geotécnico y riesgo hidráulico y estructural. El informe de Fase I fue entregado en febrero de 1994.

- Fase II. Con base en los términos de referencia citados en la Fase I, se elaboraron los tres estudios especiales que estuvieron a cargo de las siguientes personas o entidades:
 - Estudio de vulnerabilidad sísmica y corrimiento de fallas, efectuado por Geomatrix de San Francisco, California, para lo cual destacó al geólogo Thomas F. Bullard como responsable de la misión, el informe fue presentado en agosto de 1994.

 - Estudio de riesgo geotécnico, contratado con la firma Gómez, Cajiao y Asociados de Bogotá, Colombia, el cual fue elaborado por el ingeniero MS Jorge Durán y entregado en septiembre de 1994.

 - Estudio de riesgo estructural, hidráulico e hidrológico, contratado con el consultor Enrique Silva Monteil, entregado en agosto de 1994.

Vale la pena anotar en todos los estudios tuvieron una participación activa los funcionarios de AyA y geólogos muy

reputados en Costa Rica. como Walter Montero y Rolando de la Mora y el ingeniero Don Max Sittenfeld . Las conclusiones de estos informes de Fase II se resumen y analizan en el siguiente capítulo.

- Fase III. Como ya se dijo AyA consideró conveniente solicitar al suscrito elaborar la evaluación final de la vulnerabilidad de la conducción del acueducto de Orosi, lo cual es el objeto de este informe.

III. RESUMEN DE LOS ESTUDIOS EFECTUADOS EN FASE II

En el presente capítulo se resumen los estudios desarrollados en la Fase II por las firmas e individuos especialistas en los temas que se consideraron de mayor riesgo para la Conducción de Orosi y de acuerdo con los términos de referencia establecidos en la Fase I.

3.1 Vulnerabilidad Sísmica por Geomatrix

La firma Geomatrix de San Francisco, California, fue seleccionada para desarrollar los estudios de vulnerabilidad sísmica, después de haber solicitado propuestas a otras firmas e individuos. Geomatrix fue seleccionada por ser una firma altamente calificada en el tema y su propuesta estuvo dentro del tiempo y presupuesto previsto.

El estudio fue dirigido por el geólogo, Dr. Thomas F. Bullard, y fue entregado en septiembre de 1994. Geomatrix incorporó a su equipo de trabajo a numeroso personal costarricense, entre quienes se destaca el Director de la Escuela de Geología en Costa Rica, MSc Walter Montero P., el Vicedirector de la Escuela de Geología, MSc Rolando de la Mora; el licenciado Guillermo Obando y el Dr. Guillermo Alvarado se encargaron del trabajo de campo y de las trincheras; el licenciado Luis Guillermo Salazar analizó las imágenes de radar y fotografías aéreas. En la oficina de San Francisco, el análisis y revisión de datos estuvo a cargo de los expertos John A. Egan y Frank H. Swan.

3.1.1 Objetivo y Alcance del Estudio

El estudio fue desarrollado en un todo de acuerdo con los términos de referencia y tuvo como objeto principal evaluar la vulnerabilidad de la conducción de Orosi bajo condiciones sísmicas. Para el desarrollo de este objetivo se estudiaron cuatro temas a saber:

- Estudio de las Fallas Activas
- Estudio de la Amenaza Sísmica
- Estudio de Licuefacción
- Identificación de Taludes Inestables

3.1.2 Metodología

a. Fallas Activas

El alcance del trabajo se cumplió de acuerdo con la siguiente metodología:

- El estudio de las fallas activas consistió en la identificación en fotografías aéreas e imágenes de radar de lineamientos y estructuras que podrían ser tectónicamente activas; con este análisis se identificaron las fallas principales que la conducción cruza y se determinaron los depósitos cuaternarios que podrían comprobar el desplazamiento de fallas activas.

La interpretación de fotografías e imágenes de radar permitió identificar tres lineamientos principales que cruzan la conducción: lineamiento Coris, cerca a la localidad del mismo nombre con rumbo oeste - noroeste que forma el valle de Coris, lineamiento Aguas Calientes, el cual se une al lineamiento anterior, al este del Paraíso lineamiento río Navarro con rumbo este - noreste que cruza la conducción cerca al sifón sobre el río del mismo nombre. Además son notables los lineamientos de Orosi a lo largo del río Grande de Orosi y el lineamiento Cedral al oeste de la conducción.

Después de efectuar la identificación de lineamientos, se seleccionaron los mejores sitios sobre la falla Navarro y se

excavaron dos trincheras para comprobar y determinar la magnitud de los corrimientos de la falla activa. Una de las dos trincheras efectivamente mostró corrimientos que permitieron establecer la magnitud esperada en el futuro de desplazamientos que pueden afectar la conducción.

b. Amenaza Sísmica

Para estimar el riesgo sísmico se analizaron las fuentes sísmicas localizadas en un radio de 500 km respecto al sifón del Acueducto de Orosi, especialmente los sistemas de fallas superficiales activas. Se revisó y analizó la historia sísmica de Costa Rica especialmente los estudios publicados por Montero y otros.

La sismicidad histórica que podría afectar la conducción de Orosi muestra eventos como:

- El terremoto de Cartago del 2 de septiembre de 1841, catastrófico que destruyó la ciudad, relacionado con el sistema de fallas de Aguas Calientes y Coris.
- Los terremotos del 13 de abril de 1910 que afectaron las poblaciones al sur de San José, relacionados también con las fallas de Aguas Calientes y Coris. El 4 de mayo del mismo año otro sismo destruyó por segunda vez las ciudades de Cartago y Paraíso.
- El terremoto del 21 agosto de 1951 causó daños muy importantes a Orosi y Paraiso, y su foco pudo ser la falla Navarro.
- Varios temblores entre 1975 y 1993, con magnitudes superiores a 3.5 y hasta 7.6, se localizaron en el sector sur del valle Central.

En el informe se hace un seguimiento a fallamientos corticales (poco profundo) y fallamientos subduccionales (movimientos de placas) y se presenta un análisis de recurrencia y magnitud máxima probable para los eventos cercanos a la zona de Cartago. Se concluye que un sismo de Ms 5.0 tiene un período de recurrencia de unos 50 años y que dos sismos catastróficos de Ms 6.0 han ocurrido en los últimos 200 años.

c. Estudio de Licuefacción

Para averiguar la susceptibilidad de los suelos donde se halla la conducción a la licuefacción en el valle de Coris, se realizaron 12 sondeos con penetrómetro del tipo alemán y los resultados se analizaron de acuerdo con el método propuesto por Iwasaki, Ref. 6. En el informe se presentan gráficos del potencial de la licuefacción y un plano esquemático donde se identifican las zonas donde el riesgo es muy alto de acuerdo con la metodología descrita.

d. Identificación de Taludes Inestables

Se identificaron en fotografía aérea y por reconocimiento de campo los taludes cuyas condiciones de estabilidad son más precarias; se encontró que en general los taludes superiores a 30° son un riesgo para la conducción de Orosi. Se presentan las zonas de mayor riesgo y un mapa esquemático y se analiza el efecto de un sismo sobre la tubería de acuerdo con la distancia a la fuente.

3.1.3 Conclusiones y Recomendaciones

La conclusión general del informe de Geomatrix es que la amenaza asociada a un evento sísmico mayor de ocurrencia muy probable con fuente en las fallas de Navarro, Aguas Calientes y Coris, es muy significativa por la proximidad de estas fallas a la conducción. Por lo tanto, la conducción de Orosi es muy vulnerable bajo eventos sísmicos

de magnitud 5.0 a 6.0. Por otra parte, los cuatro aspectos considerados en el estudio presentan las siguientes conclusiones:

a. Ruptura de Fallas

La conclusión del estudio es que el riesgo por ruptura de fallas más evidente se encuentra en la falla Navarro que cruza la tubería aproximadamente en el km 7; no existe una traza bien definida pero se estima que la zona de falla de 100 a 200 m de ancho se encuentra en la ladera encima del sifón que cruza el río Navarro, aproximadamente en la elevación 1.100. No se encontró evidencia de falla en el lecho del río.

Se estima que el corrimiento horizontal de la falla podría estar entre 0.20 y 0.50 m; el ángulo de cruce con la tubería es casi perpendicular lo cual es favorable.

Geomatrix recomienda para mitigar el efecto de un corrimiento de esta falla, reubicar la tubería en una trinchera en forma de "V" rellena por arena o grava fina que permita a la tubería moverse en lugar de deformarse. El suscrito concuerda con esta conclusión y con la recomendación correspondiente.

Las fallas de Aguas Calientes y Coris podrán presentar desplazamientos entre 0.1 y 0.2 m horizontales. Aunque Geomatrix hace extensiva las recomendaciones de relocalizar la tubería en zanjas en "V", el suscrito no considera prioritaria esta medida por los corrimientos relativamente pequeños y por estar las fallas situadas en un lugar de fácil reparación.

b. Riesgo Sísmico

El ideal de una obra cuya vida útil es de 50 años es que en este período sea bajo el riesgo de que se presente un sismo que pueda destruirla como sería una probabilidad del 10% que ocurra un sismo de Ms 7.0 muy cercano que produzca aceleraciones de 0.45 g - 0.50 g. Desafortunadamente, no es posible asegurar la estabilidad de los taludes de la conducción entre K1+000 y K4+000 ante tal evento y debe invertir en obras que mitiguen el riesgo ante un terremoto de probable ocurrencia, 60% en la vida útil de la conducción.

Se recomiendan en el informe de Geomatrix unos valores de aceleración de 2.5 m/seg² horizontal y 2.2 m/s² vertical para roca y en suelo 3.3 m/s² y 2.3 m/s² respectivamente. Estos valores parecen razonables para un período de retorno de 50 años pues ya se registró en un sísmografo de Cartago una aceleración horizontal en suelo de 3.0 m/s² en el evento del 22 de diciembre de 1990. Por lo tanto, estos parámetros se toman como ciertos en los análisis de estabilidad de taludes, sin descartar que eventos fuertes con fuentes cercanas pueden producir aceleraciones mayores con efectos catastróficos.

La recomendación de instalar acelerógrafos por pares, en la tubería y sobre el suelo, especialmente en el sifón del río Navarro, es importante y factible pues parece que la Universidad de Costa Rica está dispuesta a hacerlo dentro de su programa de instrumentación sísmica.

c. Licuefacción

Geomatrix identifica dos sitios como de alto potencial de licuefacción: López y Colonia del Tejar donde la conducción cruza el río Reventado. Este último sitio tiene riesgo para la tubería pues se encuentra

revestida en un bloque de concreto para efectuar el cruce subfluvial. Como se explica más adelante el suscrito no justifica obras de mitigación en este momento.

d. Estabilidad de Taludes

Sin entrar en análisis detallados que estaban fuera del alcance del estudio, Geomatrix identifica como potencialmente inestables, los taludes entre K1+000 y K1+700 (Los Vados) y entre K2+480 y K1+200 (El Queque y El Tapón). Se presenta en cuadros un ejercicio teórico que relaciona la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento con la magnitud del sismo y la distancia del foco.

Independientemente del análisis teórico, el suscrito concuerda con Geomatrix en que un sismo fuerte a una distancia que produzca aceleraciones de 0.48 g probablemente cause deslizamientos en los taludes con pendientes de 38° aproximadamente. Sin recomendar medidas específicas de mitigación, el informe plantea la importancia de un buen drenaje de los taludes.

3.2 Vulnerabilidad Geotécnica por Gómez, Cajiao y Asociados

La firma Gómez, Cajiao y Asociados de Bogotá, Colombia, de la cual el suscrito es socio, efectuó el estudio de vulnerabilidad geotécnica a cargo del director del departamento, ingeniero Jorge Durán con el soporte de su grupo de ingenieros especialistas. El informe fue entregado a fines de septiembre de 1994, después de haber recibido la información sísmica de Geomatrix que fue incorporada al estudio geotécnico en las partes pertinentes. El suscrito consultor coordinó los esfuerzos entre los distintos consultores que participaron en la Fase II, así como las visitas al campo para que todos estuvieran reunidos en San José en abril de 1994.

3.2.1 Objetivo y Alcance del Estudio

El objetivo general del estudio fue adquirir la información necesaria para analizar las condiciones encontradas y evaluar el riesgo a que está sometida la conducción del sistema Orosi en el tramo El Llano - Tres Ríos por efectos de inestabilidad geotécnica de la zona que cruza la tubería.

Los objetivos particulares del estudio geotécnico fueron:

- Recolectar y estudiar toda la información existente disponible sobre el tramo El Llano - Tres Ríos en relación con estudios geológicos y geotécnicos realizados anteriormente, descripción de las obras de estabilización ya ejecutadas y descripción del comportamiento de sectores críticos.
- Identificar las zonas inestables potenciales o activas con base en la información previa existente, en la interpretación de fotografías aéreas y en reconocimientos detallados de campo.
- Estudiar los sitios que se identificaron como críticos y programar las investigaciones adicionales que se consideraran necesarias.
- Con base en información obtenida de las etapas anteriores, dar un diagnóstico de la condición geotécnica en los sectores reconocidos como críticos y formular recomendaciones acompañadas de esquemas conceptuales claros de obras de estabilización que permitieran el desarrollo posterior de planos de construcción.

3.2.2 Metodología

Para desarrollar el alcance de los estudios el ingeniero Jorge Durán visitó el área del proyecto durante la semana del 4 de abril de 1995. Además del reconocimiento de campo, se sostuvieron reuniones en las oficinas de AyA, con los funcionarios y directivos y además con los geólogos de Geometrix, Thomas Bullard, Walter Montero y Rolando Mora, quienes estaban desarrollando los estudios de vulnerabilidad sísmica. También participó en la reunión don Max Sittenfeld, ingeniero asesor de AyA.

Para efectuar los análisis de estabilidad se dedujeron los parámetros de resistencia en el mejor laboratorio posible, como es la propia naturaleza. Como es difícil tomar muestras que representen las condiciones reales de los distintos sitios y de las interfases entre los diferentes estratos y grados de meteorización, no se intentó efectuar pruebas y ensayos en laboratorio. Se estimaron los parámetros de resistencia de los suelos residuales, de los saprolitos y de la roca meteorizada que conforman el perfil de meteorización de los suelos en las laderas en los 4 primeros kilómetros de la conducción, partiendo de que ellos se encuentran en condición de estabilidad límite con $F5 = 10$ en los casos siguientes:

a. Estabilidad

Se aplicó el método del análisis retrospectivo "back analysis", observando las características geométricas de los taludes, el grado de saturación, los sismos que han resistido, los deslizamientos ocurridos y el perfil de meteorización. Se observa:

- Laderas de 38° son estables en épocas de verano. Se convierten en inestables en época de invierno, cuando se pierde el efecto de succión por saturación de los suelos.

- Laderas con inclinación de 30° se vuelven inestables con lluvias intensas y con fuerzas de infiltración hacia abajo. Esto es cierto hasta para algunas laderas con 27° de inclinación.
- Laderas de 35° resisten aceleración sísmica de 0.20 g en tiempo seco.

De todas las consideraciones anteriores, el ingeniero Durán presenta una tabla con los parámetros de resistencia que aumentan con la profundidad. Por ejemplo, el ángulo de fricción para profundidades de 5 a 15 m a medida que la zona es más sana. Los parámetros así establecidos con el método retrospectivo son usados posteriormente para efectuar los análisis de estabilidad de taludes específicos en los 4 primeros kilómetros de la conducción para distintas condiciones de material parcialmente saturado o saturado y distintas condiciones sísmicas. Respecto a este último parámetro la metodología fue la propuesta por Newmark (1965) (Ref. 7), modificado posteriormente por diversas autoridades como Abraseys, Makdisi y Seed, la cual resuelve la incertidumbre de los métodos pseudoestáticos tradicionales cuando se aplicaba una cifra predeterminada de aceleración que podría corresponder a un pico instantáneo superior a la aceleración máxima permisible del talud y que sin embargo, no causaría desplazamientos inadmisibles. Este tema fue motivo de comentarios de AyA en agosto de 1995, casi un año después, que fueron contestadas por el ingeniero Durán por carta del 21 de septiembre y que por ser de gran interés me permito transcribir:

" El método incluye:

- Calcular la aceleración de fluencia que lleva la masa deslizando al borde del movimiento (Factor de seguridad igual a 1.0)

- Aplicar el acelerograma de diseño en la base de la masa deslizando con picos positivos y negativos de muy corta duración donde el máximo corresponde a $A_{máx}$ encontrada por los estudios de riesgo sísmico.
- Integrar la aceleración a velocidad y ésta a desplazamiento en el tiempo para los tramos del acelerograma donde la aceleración sea superior a la aceleración de fluencia encontrada en el primer paso.
- Acumular los corrimientos parciales de la masa deslizando hasta obtener el desplazamiento residual total resultante del paso de todo el acelerograma.
- Comparar los resultados con criterios particulares de aceptación según holguras, tolerancias, tipo de obras, etc.

Esta metodología moderna resuelve la incertidumbre que persistía en los métodos pseudoestáticos tradicionales cuando la aceleración de fluencia, A_f , era menor que el pico del acelerograma de diseño y no se cuantificaba qué tan grave o delicada era la condición particular."

"... Aplicando el método de desplazamientos residuales de Newark a fallas planares de varios espesores (5-10 m) y considerando un intervalo realista de velocidades máximas inducidas por el sismo de diseño (en suelo de dureza media y en roca meteorizada) se tienen los siguientes resultados:

| Talud β | | Aceler. de Fluencia A_f/g | Desplazamientos Residuales R, cm | |
|-------------------------|-----|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Efecto de Succión Si | No | | $A_{max.} = 0.45 g$ | $A_{máx} = 0.28 g$ |
| 24° | 14° | 0.25 | 2 - 8 | 0.1 - 0.4 |
| 28° | 16° | 0.20 | 3 - 12 | 0.4 - 1.6 |
| 32° | 20° | 0.15 | 20 - 80 | 1 - 4 |
| 35° | 23° | 0.10 | 30 - 120 | 4 - 16 |
| 38° | 27° | 0.05 | 60 - 2400 | 240 - 960 |

Estos resultados son aproximados; sin embargo, muestran el orden de magnitud de los desplazamientos y en especial muestran la sensibilidad del comportamiento del talud a variables tales como la pendiente, la aceleración pico o máxima de la excitación sísmica y las condiciones de succión del material. La importancia de la tabla de resultados acabada de presentar radica en que muestra a partir de qué circunstancias el sismo de diseño dispararía los desplazamientos y los haría inadmisibles. Tales puntos son:

Condiciones inadmisibles de desplazamientos
residuales inducidos por sismo
Laderas naturales - fallas planares

| A máx | Efecto Succión en el Material | Pendiente Talud β |
|--------|----------------------------------|----------------------------|
| 0.45 g | Sí | > 35° |
| 0.45 g | No | > 23° |
| 0.28 g | Sí | > 39° |
| 0.28 g | No | > 28° |

Como resultado de estos análisis el ingeniero Durán concluye que para el sitio de El Tapón y los taludes vecinos "Para sismos fuertes, $A_{máx} = 0.45$ g, la ladera es geotécnicamente muy vulnerable y puede causar un daño grave a la conducción AyA. Para estos niveles de aceleración es muy difícil lograr que con obras correctivas convencionales esta ladera ofrezca las garantías de estabilidad que requiere una conducción tan importante como la del sistema Orosi. Por lo tanto, se considera necesario plantear y estudiar desde ya alternativas que incorporen cambios mayores en el alineamiento de la conducción en este sector crítico (página V.15)"

El suscrito no está de acuerdo con una recomendación tan radical como es cambiar el alineamiento, que implica necesariamente un túnel. Parece demasiado conservador suponer una aceleración de 0.45 g que es la que tiene un periodo de recurrencia de 500 años y más bien se propondría reforzar las obras de El Tapón en forma tal que soporte un sismo más probable pero de intensidad menor, con

aceleración de 0.3 g que es la registrada históricamente aunque el periodo de recurrencia sea de unos 50 años que es la vida útil de la obra.

b. Licuefacción

En el informe del ingeniero Durán reitera el tema de licuefacción presentado por Geomatrix; para analizar este riesgo en los sitios más críticos, se adoptó como aceleración máxima 0.58 g tomado del informe de Geomatrix que tiene un riesgo de excedencia del 10%. De nuevo el suscrito estima que se puede tomar un riesgo mayor con una aceleración de 0.35 g en suelos blandos.

Se adoptó la metodología adoptada por Seed y otros y se presentó en gráficas una relación entre la resistencia del terreno, el número de golpes, el porcentaje de finos y la profundidad.

Las conclusiones del Dr. J. Durán difieren de aquellas de Geomatrix pues estiman que no hay razones suficientes para aseverar que hay alto riesgo. Los datos de las perforaciones no son confiables, ni se llevaron a las profundidades necesarias; por lo tanto, la información no permitió concluir que haya una clara vulnerabilidad de la conducción por riesgo de licuefacción inducida por sismos fuertes. El suscrito concuerda con esta conclusión y se recomienda hacer una investigación detallada en el cruce del río Reventado antes de programar obras de mitigación.

3.2.3 Conclusiones y Recomendaciones

La conclusión del informe del Dr. Durán es que los 4 primeros kilómetros de la conducción presentan condiciones críticas de estabilidad y que es altamente vulnerable bajo la condición de saturación del terreno y excitación sísmica fuerte.

El Dr. Durán hace gran énfasis en la importancia de un sistema de drenajes y subdrenajes que mantenga el perfil de los suelos meteorizados sin percolación apreciable y en esta forma las laderas con pendientes de hasta 33° pueden considerarse estables aún con excitación sísmica fuerte. Por lo contrario, si las lluvias fuertes saturan el terreno y se establece un flujo paralelo al talud, las laderas con pendientes mayores a 25° serán francamente inestables; más aún si se presenta un sismo fuerte.

Para el sitio de El Tapón con pendientes entre 38 y 39°, el sitio es geotécnicamente vulnerable y es difícil lograr con obras correctivas la garantía de estabilidad requerida. El ingeniero Durán recomienda hacer cambios mayores en el alineamiento de la conducción.

El sitio de Los Vados con pendiente de 36° se puede mejorar la estabilidad con obras de estabilización para evitar que el sector se convierta en un sitio tan vulnerable como El Tapón.

En el sitio de El Queque con pendiente de 27° se puede efectuar tratamientos que aseguren la estabilidad del sector.

Como ya se dijo con la información disponible no se puede concluir que la conducción sea vulnerable por fenómenos de licuefacción en el valle de Coris.

3.3 Vulnerabilidad a Riesgo Hidráulico, Hidrológico y Estructural por Enrique Silva Monteil

El ingeniero Enrique Silva Monteil especialista en estructuras, hidráulica e hidrología estuvo involucrado en la primera visita a la conducción de Orosi en 1991 con el suscrito cuando ocurrió el deslizamiento de El Tapón y desde aquella época puso de presente

los riesgos hidráulicos e hidrológicos del cruce fluvial de la conducción y especialmente estructural en el sitio del sifón. Naturalmente, el ingeniero Silva fue seleccionado para hacer el estudio de estos aspectos durante la Fase II. El informe del doctor Silva fue entregado a principios de septiembre de 1994 y tuvo en cuenta las conclusiones del informe de Geomatrix.

3.3.1 Objetivo y Alcance

El objetivo del informe fue evaluar la vulnerabilidad de la conducción bajo riesgos estructurales, hidrológicos e hidráulicos y dentro del alcance estaría:

- a. Efectuar una visita a San José, cosa que se hizo en la semana del 4 de abril en compañía del doctor Jorge Durán.
- b. Analizar la tubería en sus condiciones estructurales.
- c. Determinar posibles daños por fenómenos hidráulicos e hidrológicos.

3.3.2 Estudios Efectuados

El doctor Silva recibió toda la documentación existente, que no es mucha, sobre la construcción de la conducción, la fabricación de la tubería y el estudio de protección catódica efectuado en años anteriores por el ingeniero Berkeley y el ingeniero Jorge Murillo.

a. Golpe de Ariete

Se hizo un análisis de este fenómeno que puede ser originado por la operación de las válvulas en la estación de Coris, K21+600. Este

análisis muestra que no hay riesgo de falla en la tubería por el fenómeno mencionado.

b. Presión Interna

Se calculó la resistencia de la tubería especialmente hierro dúctil en los 5 primeros kilómetros de la conducción, y se encuentra que la tubería de hierro ductil tiene un factor de seguridad más que adecuado. La conducción de acero que tiene una presión máxima de 52 kg/cm² muestra también que la tubería es segura para resistir presión interna más golpe de ariete.

e. Presión Externa

Se analizó el caso extremo en que se reduzca la presión interna total de tal manera que la presión atmosférica actúe sobre la tubería provocando su aplastamiento, para evitar esto se colocaron numerosas válvulas de admisión y expulsión de aire y el riesgo de colapso es muy bajo.

d. Aire en la Conducción

En cualquier tubería de conducción puede existir atrapamiento de aire en los puntos altos y una bolsa puede crear estrangulamiento similar al de una válvula. Con la provisión de válvulas de aire en la tubería esta posibilidad es improbable.

e. Vibraciones

Con un flujo normal no hay causa hidráulica que haga vibrar la tubería; una onda de presión generada por ejemplo en una válvula se transmite a la tubería y puede ocurrir que esta vibre. En la conducción de Orosi únicamente las válvulas de Coris podrían ser focos de

vibración pero como son operadas transitoriamente ésta debe desaparecer con mayores o menores aperturas. Por lo tanto, el fenómeno de vibración no representa ningún riesgo.

3.3.3 Sifón del Río Navarro

El punto más vulnerable de la conducción de Orosi es sin duda el sifón invertido para cruzar el río Navarro. El cruce lo hace la tubería en forma autoportada y se apoya en pilas intermedias entre vigas de anclaje en los dos extremos.

El informe analiza el sistema de soporte, la unión flexible en el extremo izquierdo que se observa hace una análisis estructural de la tubería por presión interna trabajando como viga y demás cargas normales. Todos los esfuerzos pueden ser fácilmente soportados por el tubo.

El doctor Silva analiza la posibilidad de un corrimiento, hasta de 50 cm. a lo largo del río, transversal a la tubería y el esfuerzo producido en el acero sería mayor que su resistencia, por lo tanto se produciría un rompimiento por efecto de la restricción entre pilas. Sin embargo, Geomatrix localiza la falla geológica no en el cauce del río sino más arriba de la ladera lo cual es muy afortunado.

3.3.4 Vulnerabilidad Hidrológica

El análisis se concentró sobre el cruce del sifón sobre el río Navarro, donde se observa que hay una socavación progresiva en la margen derecha que podría poner en peligro la pila derecha que está enfrentada a la corriente. Por otra parte, se observa un quiebre brusco en el cauce del río unos 120m aguas abajo del sifón. Este riesgo morfológico e hidráulico es de difícil predicción, pero la tendencia del

lecho del río es a degradarse por lo cual a mediano plazo las pilas pueden encontrarse en peligro, como se observa en la Foto 6.

Para evitar la degradación, el ingeniero Silva propone una pequeña presa de escollera que permita el flujo del río por encima, puesto que los colchones Reno colocados no han tenido efecto positivo para evitar la erosión del lecho.

También se hace una análisis de creciente y se calcula que para caudales con periodo de retorno de 500 año, la tubería presenta un riesgo muy alto de falla por impacto de bolones y erosión del cauce.

3.3.4 Conclusiones

En general la vulnerabilidad de la tubería por causas estructurales e hidráulicas son muy bajos. Con la creciente de 500 años podría tener riesgos muy altos para el cruce del río Navarro. Un corrimiento de falla o desplazamiento entre pilas bajo movimiento sísmico puede causar la falla de la tubería con deformaciones excesivas. Por lo tanto, el ingeniero Silva recomienda cambiar el tipo de unión actual por apoyo de rodillo de acuerdo con la Figura No. 9. El suscrito concuerda con esta recomendación.