

# **ESTUDIO DE VULNERABILIDAD DEL ACUEDUCTO OROSI**

Ing. Arturo Rodríguez Castillo - Costa Rica

## **SUMARIO**

El Acueducto Orosi, que es de gran importancia para el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y para la población que abastece, se encuentra amenazado por fenómenos de tipo sísmico, geofísico, hidráulico, hidrológico y estructural.

En este estudio se ha analizado, con la participación de expertos nacionales e internacionales la vulnerabilidad del acueducto ante cualquiera de estos fenómenos. Se ha estudiado la probabilidad de ocurrencia y los niveles máximos esperados de cada evento, las posibles consecuencias en el sistema y los mecanismos para prevenir o mitigar esos efectos. El objetivo final no es llegar a tener un acueducto 100% seguro, pero sí dentro de los niveles aceptables de riesgo, de modo que si se produce una falla, ésta no sea desastrosa y pueda ser reparada en un corto tiempo.

## **INTRODUCCIÓN**

El Acueducto Orosi es la obra de ingeniería más grande que tiene AyA, no solo por su costo (más de \$55 millones) sino por la enorme población que abastece cerca de la mitad de los habitantes de San José, Cartago y Oreamuno.

Tomando en cuenta la importancia del acueducto para AyA y los distintos fenómenos que amenazan su estabilidad y funcionamiento, se decidió llevar a cabo el Estudio de Vulnerabilidad del Acueducto Orosi, con el fin de determinar la magnitud, la probabilidad de ocurrencia y los posibles efectos de cada uno de estos fenómenos, así como las medidas necesarias para reducir la vulnerabilidad del acueducto y prever una rápida reparación en caso de que llegara a colapsar.

El estudio financiado por el Banco Mundial se inició en enero de 1994 y ha sido separado en cuatro etapas:

1. Análisis general de vulnerabilidad del acueducto
2. Estudios específicos
3. Análisis final y recomendaciones
4. Diseño de planos constructivos

Hasta el momento se han terminado las tres primeras etapas con la participación de expertos nacionales y extranjeros de mucha experiencia, y está por concluirse la cuarta.

Los resultados obtenidos confirmaron el alto grado de vulnerabilidad del acueducto y la importancia de realizar el estudio. Se ha determinado que los principales riesgos a que está sometido son:

**Sísmicos:**

- Aceleraciones en miembros de inercia diferente
- Corrimiento de fallas
- Deslizamientos asociados
- Licuefacción.

**Geofísicos:**

- Deslizamientos
- Erosión.

**Hidrológicos:**

- Inundación
- Socavación
- Golpe de rocas en suspensión.

**Hidráulicos:**

- Golpe de ariete
- Acumulación de aire

**Estructurales:**

- Corrosión
- Rigidez del paso de la tubería sobre el río Agua Caliente
- Rigidez de los bloques de anclaje

**Otros:**

- Riesgos asociados a una eventual erupción del volcán Irazú
- Vandalismo

La solución o atenuación de estos problemas forma parte de los resultados del estudio.

Debido a que el riesgo sísmico y sus fenómenos asociados son los que producen una amenaza mayor en el Acueducto Orosi, se hará a continuación una descripción del origen del problema y de sus posibles consecuencias, así como de las primeras recomendaciones que han surgido para enfrentarlo.

## **RIESGO SISMICO**

### **Origen del fenómeno:**

Es bien sabido que nuestro país se encuentra ubicado sobre una placa tectónica llamada Caribe, bajo la cual se subduce la placa Cocos, que se encuentra en el Pacífico. Los más fuertes terremotos en Costa Rica, en cuanto a magnitud, son los que se originan por el choque de ambas placas. Dado que éste se produce en el Litoral Pacífico, es de esperarse que únicamente en ese sector deba preverse la ocurrencia de un sismo de magnitudes devastadoras.

Esta creencia, que por mucho años se mantuvo, llevo a pensar por ejemplo que la zona de Limón ubicada en la Costa Atlántica era una de las más seguras en ese sentido. Sin embargo el terremoto ocurrido el 22 de abril de 1991, que tuvo una magnitud de 7.2 en la escala Richter, vino a cambiar completamente el concepto que se tenía sobre la sismicidad en Costa Rica.

Los importantes levantamientos de la corteza que se produjeron durante ese sismo llamaron la atención de numerosos expertos, que se dedicaron a estudiar el fenómeno. Técnicos de la NASA visitaron el país y se llevaron gran cantidad de información concerniente al sismo. Expertos nacionales, por su lado iniciaron sus análisis y el resultado de ambas investigaciones fue no solo similar sino sorprendente porque contradecía completamente lo que por años se había pensado sobre la actividad sísmica en nuestro país.

### **Nuevos conceptos de sismicidad en Costa Rica:**

Los resultados indicaron que hay dos zonas geológicas bien definidas y que están siendo sometidas a esfuerzos muy diferentes. La primera se ubica al norte del extremo inferior de la Península de Nicoya en Costa Rica y a ella pertenecen todos los volcanes activos del país. La segunda se ubica al sur de la Península, y dentro de ella se encuentran todas las cordilleras no activas.

En la primera de estas zonas la placa de Cocos se subduce con un ángulo relativamente pequeño, lo que produce gran empuje a la placa Caribe y genera fuerzas de fricción tan grandes que se favorece la aparición de volcanes activos.

En la segunda zona que se ha llamado Microplaca de Panamá, y que se extiende desde la Península de Nicoya hasta la frontera entre Panamá y Colombia, la placa de Cocos se subduce con un ángulo mucho mayor, de modo que el empuje que produce no es tan grande como en el primer caso. Esto ha dado origen a la formación de las montañas no activas que se pueden apreciar al sur del Valle Central.

En la figura uno (1) se muestra la ubicación de las placas Cocos y Caribe y de la Microplaca de Panamá. En esa figura se nota la existencia de una frontera geológica que divide nuestro país en dos sectores que podemos denominar Norte y Sur, y se sabe entonces que el sector Norte está siendo empujado con mucho más fuerza que el sector Sur.

Esta diferencia de esfuerzos genera una fuerza cortante que tiende a separar ambos sectores, y que origina un gran número de fallas internas que se ubican principalmente a lo largo de esa frontera geológica y que son activas. Aunque la magnitud de los sismos que se generan no es tan grande como la que produce el choque de placas, la profundidad es menor, por lo que sus efectos pueden ser igualmente destructivos.

En la figura dos (2) se muestra la ubicación de los epicentros de los más importantes sismos ocurridos desde 1800 hasta la fecha. Se incluyeron los terremotos interplaca de magnitud mayor a 7.0 y los terremotos corticales de magnitud mayor a 5.0. Puede apreciarse claramente que estos últimos se ubican sobre el cinturón que separa las cordilleras activas e inactivas de Costa Rica.

#### **La amenaza:**

Desafortunadamente, nuestras ciudades más pobladas, incluyendo la capital, están asentadas sobre esta zona de corte, y están amenazadas por lo tanto por la actividad sísmica que las fallas internas pueden generar.

Como es lógico, en esta zona se encuentran también las más importantes obras de infraestructura de nuestro país, incluyendo aeropuertos, hospitales, oleoductos, refinerías, embalses y plantas hidroeléctricas, carreteras, líneas telefónicas y eléctricas y por supuesto el Acueducto Orosi.

La figura tres (3) muestra el gran número de fallas que rodean a éste último, y el panorama es similar en todo el Valle Central. Si se excluyen las fallas que no han mostrado actividad reciente (hablando en tiempos geológicos), se logra determinar que son tres las fallas más importantes y peligrosas a lo largo del acueducto. Estas fallas que se denominan Navarro, Agua Caliente y Coris se muestran con mayor detalle en la figura cuatro (4).

#### **La falla Navarro**

Puede verse en la figura cuatro (4) que la falla Navarro mide más de 20 Km, y si "rompe" en toda su longitud, podría producir un terremoto de magnitud mayor a 7.0. En caso de que rompa por partes, como es probable podría producir una serie de sismos de menor magnitud pero también altamente destructivos.

Para estudiar con mayor detalle esta falla se excavaron dos trincheras al sureste de Paraíso, que tenían 50 m de largo, 3.5 m de hondo y 1.5 m de ancho, y permitieron estudiar con mucha precisión el comportamiento histórico de la falla. En la primera trinchera se tuvo la suerte de encontrar una capa de arcilla blanca que sirvió como "testigo" de los distintos movimientos que había sufrido el terremoto como consecuencia de la actividad sísmica.

Un diagrama de lo observado en esta trinchera se muestra en la figura cinco (5). En ella se pueden apreciar desplazamientos tan grandes como 28 cm en un tramo y 66 cm en otro. Además, la superposición de los cortes indica que eventos no ocurrieron en el mismo momento. Se analizaron muestras del suelo mediante pruebas con Carbono 14 y, de acuerdo a la edad calculada, se logró que la falla ha tenido movimientos recientes.

Considerando que la tubería de Orosi está colocada actualmente como alguna vez lo estuvo la capa de arcilla testigo, es muy fácil prever el tipo de desplazamientos y de esfuerzos a los que verá sometida en caso de que la falla se decida a activarse nuevamente.

## **POSIBLES EFECTOS EN EL ACUEDUCTO**

Como se ha mencionado anteriormente, el fenómeno sísmico lleva asociados varios otros que pueden afectar considerablemente el acueducto. Entre los más importantes, de acuerdo a la posible ubicación del epicentro y a las características propias del sistema, están:

### **1. Rotura por esfuerzos en miembros de inercia diferente.**

Se determinó que en la zona se pueden producir aceleraciones de hasta 0.5 veces la gravedad, es decir que las obras del acueducto pueden sufrir empujes laterales de hasta la mitad de su peso. Este empuje se va a aplicar tanto a estructuras rígidas (como bloques de anclaje o anclaje o cajas de válvulas) como a estructuras flexibles (como la tubería misma).

Esto genera grandes esfuerzos en los puntos de unión de esos miembros que podrían provocar el colapso de la tubería. Dependiendo del lugar de la rotura y la presión interna en ese punto, los daños podrían ser cuantiosos y la reparación podría demandar mucho tiempo. Si ocurriera además en algún sector habitado, se podrían producir daños a la población.

### **2. Deslizamientos**

La formación geológica típica de los primeros 7 Km de la conducción, unida a un fuerte régimen de lluvias, a problemas de deforestación y a una topografía muy empinada, favorecen la ocurrencia de deslizamientos en esa zona.

En este caso se podría producir un taponamiento de cauces que inundaría posteriormente las zonas ubicadas aguas abajo, afectando a la población. Además, la rotura de la tubería sería de una extensión considerable y habría que empezar por restaurar la ladera antes de reparar la línea, lo que dejaría al acueducto fuera de servicio por un período de más de tres (3) meses en el mejor de los casos.

Una experiencia similar se vivió hace un par de años cuando se produjo un gran deslizamiento en el sector conocido como El Tapón. En este caso se produjeron serias inundaciones en Orosi y aunque el deslizamiento no llegó a alcanzar la tubería, estuvo a punto de hacerlo.

Para devolver a la ladera sus condiciones originales y asegurar el acueducto en ese punto se tuvo que construir muros de concreto y de gaviones, drenajes, subdrenajes, tensores y rellenos de miles de metros cúbicos, con un costo de más de 300 millones de colones (1.2 millones de dólares).

### **3. Licuefacción**

Este fenómeno consiste en que capas de terreno de grano grueso que se encuentran saturadas pueden comportarse como un líquido cuando se ven sometidas a una aceleración sísmica fuerte. En este caso cualquier estructura pesada que se apoye en ese estrato puede colapsar.

En el caso de Orosi este fenómeno tiene una baja probabilidad de ocurrencia en el paso de la tubería bajo el Río Reventado, el cual tiene materiales de grano grueso que se encuentran saturados por el agua del río.

En ese lugar la tubería se construyó dentro de un pesado encamisado de concreto para protegerla de la socavación. En caso de producirse licuefacción, este encamisado quedaría sostenido por la tubería y podría romperla.

### **4. Rotura por corrimiento de fallas.**

Este fenómeno es el que amenaza en mayor grado al acueducto, especialmente en el sector conocido como El Sifón, donde la tubería tiene una presión estática de más de 500 mca y atraviesa la peligrosa falla Navarro.

En la figura seis (6) se muestra el perfil topográfico del Acueducto Orosi y el sitio en que se cruza con esa falla. Como puede apreciarse la rotura de la tubería por corrimiento se produciría exactamente en la mitad de la ladera de aguas arriba del sifón, en un sitio de mucha pendiente y de altísima presión interna.

Aunque hay una válvula de emergencia ubicada al inicio del proyecto, la cual se cerraría en caso de que ocurriera una rotura, el volumen almacenado dentro del

tubo entre el embalse El Llano y el túnel La Carpintera sería superior a 21000 m<sup>3</sup>. Según cálculos, este volumen se descargaría por la rotura a una tasa de 16 m<sup>3</sup>/s, durante más de 20 minutos y con una presión superior a los 400 mca. Esto produciría un destrozo total en la ladera, poniendo en grave peligro a los habitantes de unas 10 casas que se ubican en ella y haciendo casi imposible la rápida reparación de los daños.

## **RECOMENDACIONES INICIALES**

Aunque la solución definitiva a los mecanismos de atenuación a los problemas mencionados aún no se tienen, los resultados obtenidos hasta el momento permiten establecer una serie de recomendaciones iniciales para reducir el riesgo tan alto a que está sometido el acueducto. Entre las más importantes se puede mencionar:

### **1. Control de estabilidad mediante instrumentación.**

Se han instalado a lo largo de la línea de conducción y en los sectores más vulnerables, algunos instrumentos que permiten determinar si el acueducto está siendo sometido a esfuerzos o deslizamientos que podrían ponerlo en peligro.

Estos equipos incluyen inclinómetros, que indican la estabilidad de las laderas con una precisión de centésimas de milímetro y avisan sobre la posible ocurrencia de cualquier deslizamiento cuando apenas se está gestando. El inclinómetro puede indicar la magnitud y dirección del deslizamiento así como la profundidad a que se está originando.

También se han instalado piezómetros para verificar que las aguas subterráneas no suban hasta niveles peligrosos para la estabilidad de las laderas.

Además periódicamente se realiza un control geodésico por parte del Departamento de Topografía, el cual utiliza modernos distanciómetros láser para garantizar la estabilidad de las obras con una precisión altísima.

A futuro se tiene planeado instalar al menos seis acelerógrafos a lo largo de la línea para tener un mejor conocimiento del comportamiento del terreno y de las obras ante los distintos fenómenos sísmicos que se presenten.

### **2. Construcción de drenajes y subdrenajes.**

Para aumentar la resistencia del terreno ante eventuales deslizamientos es necesario mantenerlo lo más seco posible. Para tal efecto se han construido numerosos drenajes superficiales en los taludes más vulnerables, y se han

perforado unos 40 subdrenajes para extraer agua de las montañas y mantener la tabla freática a niveles seguros.

### **3. Reforestación.**

Desde hace varios años se inició un extenso programa de reforestación en la zona. Se han sembrado más de 40 mil arbolitos incluyendo cedro, jaúl, fresno y pino, que son especies de raíz profunda que favorecen la estabilidad del terreno.

### **4. Programa de Defensa Civil.**

Los resultados obtenidos en ese estudio se hicieron del conocimiento de las autoridades de la Comisión Nacional de Emergencia, las cuales iniciaron de inmediato un Programa de Defensa Civil para la población de Orosi. Este programa incluye el establecimiento de controles y sistemas de aviso oportuno a la población más amenazada, la ubicación de sitios seguros donde atender a posibles damnificados, la instalación de centros de acopio de alimentos, agua y medicinas y los medios de comunicación apropiados para atender cualquier emergencia.

## **RECOMENDACIONES A FUTURO**

Las obras de protección y mitigación definitivas serán las que propongan los consultores en la última etapa del estudio. Sin embargo, a nivel preliminar han surgido algunas recomendaciones que son valiosas y dignas de tomarse en cuenta, entre ellas:

### **1. Instalación de válvulas de cierre automático en la línea.**

Esto se haría con la finalidad de dividir el volumen almacenado en la tubería entre tramos cortos, de modo que las válvulas se cierren si la línea se rompe y no permitan el regreso o avance del agua hacia el sector de rotura.

### **2. Instalación de uniones flexibles.**

En aquellos puntos de la tubería esté restringida por bloques de anclaje o cuerpos de inercia diferente, con el fin de darle un mayor grado de libertad. En este caso lo difícil va a ser encontrar en el mercado uniones flexibles que puedan soportar las altísimas presiones que tiene la línea en algunos sectores, especialmente El Sifón.



### **3. Reforzamiento de la línea en sectores de cruce de fallas.**

Habiendo ubicado con alguna precisión los sitios en que la tubería cruza las fallas activas, se puede hacer un refuerzo estructural que le permita resistir mejor los esfuerzos a los que se puede ver sometida.

### **4. Embalse para emergencias.**

La Administración Superior de AyA ha planteado la idea de construir un embalse en la zona de Tres Ríos, el cual permitiría abastecer al Acueducto Metropolitano en caso de que el Acueducto de Orosi saliera de operación por una emergencia o en forma programada

Aunque el proyecto se encuentra únicamente a nivel de prefactibilidad, la idea es que el embalse tenga el volumen necesario para sustituir el caudal de Orosi por un período de más de un mes, de modo que se contaría con ese tiempo para hacer cualquier reparación sin necesidad de racionar el servicio.

## **CONCLUSIONES**

El funcionamiento continuo y adecuado del Acueducto Orosi es de suma importancia para AyA y para la población que abastece. Desafortunadamente las características propias de nuestro país y específicamente de la zona del acueducto lo exponen a varios fenómenos naturales que lo ponen en peligro.

Se sabe, especialmente después de la experiencia de Limón, en 1991, que no puede construir ningún sistema que sea 100% seguro. Sin embargo es necesario aprender a vivir en un país como el nuestro, y prevenir para que las obras de infraestructura más importantes tengan un adecuado comportamiento ante cualquiera de los eventos que las pueda afectar.

Aunque es imposible evitar que el sistema llegue a fallar, se pueden determinar los posibles sitios de falla, los esfuerzos a que se verá sometido y las obras para disminuir su vulnerabilidad. También se puede tener obras alternas que sustituyan a las principales en caso de falla y tener todos los recursos necesarios para garantizar una rápida reparación.

Además es muy importante contar con personal motivado y capacitado para atender cualquier situación de emergencia y tener un plan de acción para estos casos, donde cada persona tenga muy claro la responsabilidad que le corresponde.

Aunque el grado de vulnerabilidad del Acueducto Orosi es mayor que el recomendable, es menor que cuando se inició este estudio, y se espera llevarlo a

niveles aceptables cuando se termine Solo de esta manera podremos garantizar a la población un servicio como el que nos hemos propuesto con calidad, cantidad y continuidad