

Respuesta a las preguntas establecidas en la mesa de diálogo sobre la seguridad de la presa Cerro de Oro

Raúl Flores Berrones

16 de agosto de 2011

1. Introducción

Los participantes de la mesa de diálogo convocada por OPIC en torno al proyecto hidroeléctrico Cerro de Oro acordaron solicitar la intervención de un experto para responder tres preguntas:

- *¿Cuál es el estado actual de la seguridad de la cortina de la presa?*
- *¿Causarán las actividades futuras de construcción del proyecto una afectación a la seguridad de la cortina de la presa?*

De común acuerdo, las partes me eligieron como el experto indicado para responder a estas preguntas. Este documento ofrece mis respuestas, junto con las consideraciones técnicas y metodológicas que las sustentan.

2. Consideraciones técnicas

2.1 Sobre la seguridad de la cortina de la presa

2.1.1 *¿De qué está compuesta la presa Cerro de Oro y por qué?*

En el caso de la presa Cerro de Oro, su cortina esta constituida por un corazón central impermeable, formado por una arcilla plástica con un coeficiente de permeabilidad muy bajo, el cual tiene por objeto, por un lado, impedir el paso del agua y, por el otro, ser muy flexible ante la eventualidad de movimientos sísmicos. Rodeando el corazón impermeable se encuentran unos filtros de grava y arena. Su finalidad es evitar que se produzca una falla por erosión interna o tubificación en la cortina y servir como dren para el alivio de las presiones del agua que se puedan tener por el lado del embalse o del lado aguas abajo. Finalmente, cubriendo los filtros, están los taludes de respaldo que están constituidos principalmente por rezaga y enrocamiento, para que se mantengan estables bajo diferentes condiciones de carga (fuerzas sísmicas, gravitacionales, hidráulicas, etcétera)

2.1.2 *¿Cómo se comporta normalmente una presa de este tipo?*

Toda presa presentará desplazamientos horizontales y verticales como parte de su comportamiento normal. Quienes diseñen una presa harán previsiones sobre las tendencias de comportamiento que tendrá la cortina. Para ello, tomarán en cuenta los materiales que constituye su cimentación y sus características (roca, estratos duros o

blandos de suelo, compresibilidad e impermeabilidad, etcétera), abundancia en las cercanías de materiales para la construcción de cada una de sus partes, altura y forma de la boquilla, grado de sismicidad en la zona, etcétera.

Regularmente se deben estimar los asentamientos, desplazamientos verticales y laterales que se tendrán en función del tiempo y debe evitarse que esos movimientos rebasen los máximos permisibles para evitar agrietamientos o fallas en esas cortinas. Por lo regular los momentos críticos de una presa suelen ocurrir en los primeros llenados de la cortina, pues es en esos momentos cuando se pone a prueba el buen comportamiento de todos los elementos que constituyen una presa.

Por otro lado, independientemente de la “impermeabilidad” del corazón de arcilla, una vez que el flujo de agua se ha establecido existe un cierto grado de filtración del vaso hacia el talud aguas abajo; por lo que es muy importante estar monitoreando continuamente esas filtraciones para vigilar que no aumenten con el tiempo y principalmente, que no estén produciendo materiales de arrastre.

Finalmente, vale la pena señalar que las arcillas que constituyen el corazón impermeable de una presa como la de Cerro de Oro son los materiales más flexibles y son capaces de absorber ciertas deformaciones, como las que producen algunos sismos, sin experimentar agrietamientos. Dicha flexibilidad es debida al fenómeno de plasticidad de los suelos en esta zona.

2.1.3 ¿Qué tipo de fallas puede tener una presa de este tipo y cuáles son las causas más comunes?

Tomando en cuenta la geología y la sismicidad del sitio de la cortina, el tipo de materiales que constituyen dicha cortina, su diseño, taludes, cimentación y geometría de la misma, así como las características hidráulicas e hidrológicas de esta presa, los distintos tipos de accidentes, incidentes o fallas que puede experimentar son:

- *Desbordamiento del agua sobre la corona de la presa.* Esto sucede como consecuencia de: a) una avenida extraordinaria, superior a la máxima estimada y que las obras de excedencia no tengan la capacidad para desalojar el volumen de agua; b) por pérdida de bordo libre, cuando existen asentamientos mayúsculos por compresibilidad de la cimentación, o como consecuencia de un sismo; c) cuando ocurre un deslizamiento importante en la zona del vaso, generando repentinamente una gran ola que rebase al bordo libre.
- *Inestabilidad de taludes.* Este tipo de falla ocurre cuando la resistencia de los materiales que constituyen los taludes es menor que las fuerzas actuantes (peso propio, flujo de agua, fuerzas sísmicas, etcétera), y sucede de manera gradual. Previo al deslizamiento del talud se observan agrietamientos horizontales que aumentan en número y en el tamaño de su abertura. Pueden ocurrir del lado aguas arriba o aguas abajo y suelen suceder por un mal diseño en los materiales o una inclinación inadecuada de los taludes. Las causas más comunes de este tipo de falla ocurren por llenados o vaciados rápidos, por sobrecargas extremas en la corona o por sacudidas fuertes producidas por sismos.

- *Inestabilidad de la cimentación.* Consiste en movimientos verticales u horizontales significativos del terreno de cimentación, como consecuencia de tener diferentes características de compresibilidad a lo largo de la cimentación, de manera que los movimientos verticales varían mucho en distancias relativamente cortas, creando agrietamientos en la corona y en las bermas. Las causas más comunes de estas fallas se deben a cambios bruscos en la altura de la cortina, lo cual produce diferente concentración de esfuerzos a nivel de la cimentación, o bien una erradicidad en los estratos donde se apoya la cortina. Esta falla también ocurre cuando en la cimentación se tienen estratos de arena en estado suelto, susceptibles al fenómeno llamado “licuación de arenas”.
- *Tubificación o erosión interna.* Consiste en la formación natural de un tubo que atraviesa la cimentación o el corazón impermeable. Ocurre a través de la cimentación cuando durante su exploración no se detectó un estrato débil o de alta permeabilidad. Sucede a través del cuerpo de la cortina cuando existen capas de material con diferente permeabilidad, o bien porque no se diseñaron o construyeron adecuadamente los filtros que protegen al corazón impermeable. Se detecta esta falla cuando se observa, por un lado, agua muy turbia denotando arrastre de partículas finas provenientes del corazón impermeable, y por otro lado, aumento constante en el gasto del escurrimiento. Las causas mas comunes de esta clase de falla son: i) los agrietamientos causados por los sismos, asentamientos diferenciales o por hoyos de raíces de arbustos podridas o agujeros causados por animales; y ii) la concentración de flujo del agua a lo largo de tuberías que atraviesan la cortina, debido a la mala compactación del material que rodea a dichas tuberías.

2.1.4 ¿Cómo se monitorea el comportamiento de una presa de este tipo y cómo se evalúa si la presa Cerro de Oro está segura?

El monitoreo de las presas de este tipo se realiza de dos maneras:

- a. *Inspecciones visuales:* La inspección visual frecuente es la actividad de monitoreo más importante pues los primeros indicadores de todos los tipos de fallas mencionados se pueden manifestar en un breve lapso de tiempo y se pueden observar a simple vista a través de agrietamientos, asentamientos diferenciales, desplazamientos laterales, etcétera. Estas visitas son realizadas por personal experto de CONAGUA, donde se reportan detalles de las condiciones observadas en todas y cada una de las partes visitadas, ilustrando, de ser posible, a través de fotografías, cualquier anomalía que requiera atención inmediata, así como recomendaciones generales que deben llevarse a cabo para el buen funcionamiento de las componentes de la cortina (vertedores, compuertas, galerías, etcétera).
- b. *Revisión de lecturas de instrumentos instalados superficialmente y dentro de la estructura de la presa.* Aunque los desplazamientos horizontales o verticales hasta cierto tamaño son parte normal del comportamiento de una presa, en una cortina como la de Cerro de Oro se suelen instalar instrumentos que ayudan a

medir estos desplazamientos verticales y horizontales, imperceptibles en una inspección visual. El propósito es monitorear, sobre todo en los primeros años posteriores a su construcción, los cambios que ésta va experimentando para ver si se comporta de acuerdo con la tendencia de largo plazo que fue prevista en el diseño original de su construcción, o si existe algún desplazamiento no esperado. Si la lectura de algún instrumento determinara que su comportamiento se aparta de la tendencia de largo plazo originalmente establecida, esto no necesariamente significa que la seguridad de la presa estará en riesgo; sólo significará que será conveniente evaluar qué es lo que está sucediendo y si corresponde tomar medidas correctivas para evitar que, en el largo plazo, pueda haber algún riesgo para la seguridad de la cortina. Una vez que la presa se estabilizó después de los primeros años de operación, es común que se abandone la lectura de algunos de estos instrumentos porque la tendencia de su comportamiento ha quedado ya establecida.

Los instrumentos instalados en la presa Cerro de Oro son:

- i. *Acelerógrafos*: son aparatos especializados para identificar vibraciones provocadas por explosiones o sismos. Ayudan a conocer si dichas vibraciones producen o no daño a las estructuras aledañas a la obra. Se colocan en la estructura a cuidar, por ejemplo en el vertedor o la corona de la cortina de la presa. Si el aparato recibe una vibración mínima a la cual se calibra, la detectará y la graficará.
- ii. *Inclinómetros*: son instrumentos para medir desplazamientos horizontales de una masa de suelo o roca, a través de conocer los desplazamientos o deformaciones perpendiculares al eje de una tubería guía, mediante el paso de una sonda.
- iii. *Testigos superficiales*: son referencias topográficas instaladas a lo largo de la corona y secciones transversales de la cortina, a través de los cuales se miden asentamientos o variaciones entre las distancias originales al momento de su instalación.
- iv. *Testigos profundos o de cimentación*: son referencias a través de las cuales es posible detectar hundimientos verticales en puntos internos de la cortina y a diferentes profundidades, principalmente a nivel de la cimentación.
- v. *Piezómetros abiertos o neumáticos*: son instrumentos para conocer las presiones del agua en puntos clave dentro del interior de la cortina. A través de ellos es posible detectar anomalías relacionadas al flujo del agua o sobre presiones que puedan afectar la resistencia de los materiales.

3. Consideraciones metodológicas

3.1 Sobre la seguridad de la cortina de la presa

3.1.1 *Pasos para responder a la pregunta: “¿Cuál es el estado actual de la seguridad de la cortina de la presa?”*

- a. He comenzado por revisar toda la información disponible sobre las características del diseño, construcción y operación de la presa, así como los registros de la instrumentación que hasta el día de hoy se han tenido. Varias de las lecturas de algunos instrumentos fueron suspendidas por CONAGUA en los años 1996 y 1997 (piezómetros, inclinómetros y testigos profundos),

seguramente por su mínima variación con el tiempo, mientras que los testigos superficiales han sido leídos anualmente desde que se terminó la construcción de la presa (1990). He revisado también información sobre el diseño del proyecto hidroeléctrico como: dimensiones y ubicación; metodología de excavación de la obra de toma y de construcción de la lumbrera; procedimiento detallado de las excavaciones para el túnel, etcétera. En el **Anexo A** se hace un listado de las fuentes de información revisadas.

- b. Dado que las fallas que en este tipo de presas se manifiestan a simple vista, mediante los mecanismos antes descritos (grietas, desplazamientos del terreno, etcétera), la inspección visual del comportamiento de la misma es fundamental para determinar el estado actual de la seguridad de la cortina. Por esta razón, el viernes 3 de junio pasado realicé una visita a la cortina de la presa; al respecto se elaboró un informe cuya síntesis y observaciones se presentan en el **Anexo B**. Posteriormente, el lunes 18 de julio, hice un recorrido por todo el vaso de la presa, a través del cual pude verificar el buen comportamiento que en lo general ha tenido hasta el momento la seguridad de esta presa.
- c. Posterior a estas dos visitas de inspección realizadas, efectué una revisión de todas las lecturas previas de los instrumentos instalados en la cortina y que están disponibles en CONAGUA, lo cual me permitió verificar que la tendencia de comportamiento de la presa ha quedado ya establecida y se encuentra dentro de lo previsto originalmente en el diseño de la presa. El realizar nuevas lecturas de estos instrumentos puede aportar sin duda información sobre cómo se sigue comportando la presa, aunque dicha información no es determinante para establecer el *estado actual* de la seguridad de la cortina. Sin embargo, para atender a la solicitud de los ejidos de contar con mayor sustento para las conclusiones de este informe, he solicitado una lectura de todos los testigos superficiales para observar la evolución de los desplazamientos superficiales, desde las lecturas realizadas en el año 2010, hasta los experimentados en esta penúltima semana de julio del 2011. En el **Anexo C** se muestran los resultados de estas mediciones y su comparación a las obtenidas en el año 2010. En dicho anexo se muestra que los desplazamientos experimentados, entre los años 2010 y 2011, en todos los testigos superficiales de la presa, son prácticamente nulos; este resultado confirma, **contundentemente**, el magnífico estado de seguridad en que se encuentra la cortina de esta presa.

El uso de explosivos para construir el proyecto dentro de los límites permitidos no altera en absoluto esta tendencia de comportamiento. Los sismos que se producen en la región liberan mucha más energía que las producidas por las detonaciones y la presa está diseñada especialmente con materiales y con taludes para tomar en cuenta las fuerzas dinámicas producidas por los sismos máximos registrados en esa zona, las presiones del agua del embalse en sus diferentes niveles y todas las demás fuerzas gravitacionales; es decir, está diseñada para tomar en cuenta todas las posibles eventualidades e incluso una combinación de las mismas.

Para responder sobre la seguridad de la presa en las condiciones en que se encuentra actualmente, después de más de veinte años de operación y con un flujo de agua perfectamente establecido, no hay necesidad de medir la presión

del agua. Por otro lado, las filtraciones que tiene la presa Cerro de Oro no han sufrido modificaciones sustantivas a lo largo del tiempo. Sin embargo, a mediano y largo plazo, es muy conveniente que se realicen aforos periódicos en las filtraciones de la presa para medir si van aumentando con el tiempo y sobre todo si llevan arrastre de materiales sólidos.

Debido a que la presa está cimentada sobre roca y la misma tuvo un tratamiento de inyectado para evitar cualquier problema de flujo o de compresibilidad, se puede decir que la misma ofrece condiciones ideales de cimentación. Tras los primeros años de operación de la presa, no se observaron importantes movimientos verticales profundos, de manera que posiblemente esa fue la razón por la cual los testigos de cimentación se dejaron de observar después de los primeros años. Si los estratos hubieran sido compresibles (arena suelta, arcilla blanda, etcétera), habría sido conveniente tomar lecturas periódicas para ver su tendencia de comportamiento en el largo plazo. Pero éste no fue nuestro caso.

- d. Considerando que, *para el futuro*, es importante contar con datos que permitan identificar las tendencias de comportamiento de la presa en el mediano y largo plazo, envié a un grupo de expertos en materia de instrumentación en presas, a fin de que visitaran el sitio y me entregaran un informe del estado actual de los instrumentos instalados en la cortina. Según la información recogida, el estado de los instrumentos es el siguiente:
 - i. Acelerógrafos. Se instalaron originalmente dos acelerógrafos bajo la competencia de CONAGUA. Uno, sobre la margen izquierda, en la ladera sobre los tres vertedores de la presa, no funciona y se encuentra obsoleto. Otro, colocado dentro de la galería de la margen derecha, ya no está allí. No existen datos registrados por algunos de estos dos aparatos. Hace aproximadamente seis años, se instaló, sobre la margen izquierda, en el campamento de la CONAGUA, un acelerógrafo que hoy está a cargo del Instituto Estatal de Protección Civil de Oaxaca, operado por el Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, y está en perfecto funcionamiento. En el **Anexo D** se muestran las aceleraciones, velocidades y desplazamientos del sismo de magnitud 6.7, ocurrido el 7 de abril del 2011, el cual fue registrado por esta estación denominada Cerro de Oro. Aparentemente este movimiento telúrico es el único registrado por la mencionada estación sísmica. En este anexo se adjuntan igualmente los espectros llamados de Fourier, correspondientes al mismo sismo. Vale la pena destacar que en esta estación sísmica no se registró ninguna de las detonaciones que se efectuaron para la construcción de la lumbrera de la margen izquierda, mismas que ocurrieron entre junio del 2010 y febrero del 2011; lo anterior implica que dichas detonaciones no fueron lo suficientemente grandes para ser registradas por esta estación.
 - ii. Los testigos superficiales localizados sobre la corona, la berma y los cuatro ejes perpendiculares al eje de la cortina, se encuentran completos de acuerdo con el plano de instrumentación.
 - iii. En lo que a los piezómetros neumáticos se refiere, las mangueras para interrogarlos se encuentran totalmente cristalizadas por lo que se quiebran al manipularlas. Además, no hay certeza de que los dispositivos de estos instrumentos en el interior de la cortina se encuentren en buen estado.

- iv. En cuanto al estado de los piezómetros abiertos, no se ha podido analizar su estado en detalle porque su instalación es compleja y se encuentra a diferentes profundidades. Sin embargo, para el monitoreo futuro, se recomienda revisar el estado en que se encuentren y tratar de reactivarlos.
- v. De acuerdo con funcionarios de CONAGUA, los sensores para la medición en los inclinómetros (torpedos) existen pero sin saber con precisión en dónde están resguardados. Se comprometieron a localizarlos y ponerlos a disposición de los encargados de realizar las mediciones. Además, se desconoce si dichos dispositivos están calibrados.

3.1.2 *Pasos para responder a la pregunta: “¿Causarán las actividades futuras de construcción del proyecto una afectación a la seguridad de la cortina de la presa?”*

En adición a los pasos presentados en el punto anterior, llevé a cabo las siguientes actividades:

- a. Revisé y analicé toda la información disponible sobre el procedimiento constructivo del proyecto hidroeléctrico, tanto en lo que se refiere a las obras realizadas como a aquellas que están previstas. En el **Anexo E**, “Procedimiento PH-Cerro de Oro”, se muestra una síntesis que explica de manera simple el procedimiento constructivo.
- b. Revisé los sistemas de detonaciones que la empresa tiene contemplado realizar y verifiqué que estén dentro de las normas internacionales establecidas para no causar daño a estructuras cercanas a los sitios donde se producen las explosiones, tales como la cortina de la presa o cualquier otra estructura aledaña al sitio

4. Conclusiones

Respecto del diseño y construcción de la presa Cerro de Oro, todos los aspectos relacionados a la geología del sitio de la cortina, de la hidrología de la zona, de las consideraciones hidráulicas, de las obras de excedencia, del comportamiento geotécnico de los materiales que constituyen el cuerpo de la cortina y su cimentación, así como las fuerzas inducidas por los sismos regionales, fueron tomados adecuadamente en cuenta. Como resultado, la presa es un modelo a escala natural de cómo se debe hacer una obra de la magnitud y relevancia como en la presa Cerro de Oro.

En sus primeros años de operación de la presa Cerro de Oro, periodo crítico para evaluar el comportamiento de una presa, los datos arrojados por lectura de los instrumentos instalados permite verificar que los parámetros de desplazamiento horizontal y vertical, de presión del agua y de permeabilidad de la presa estuvieron dentro de lo previsto en el diseño original y que la tendencia de su comportamiento a largo plazo ha quedado prácticamente establecida:

- Los **testigos profundos o de cimentación** se leyeron desde 1991 hasta 1997 y, una vez que la presa se estabilizó, se suspendieron las lecturas por no tener variaciones significativas.

- Las lecturas de los **piezómetros abiertos y neumáticos** se hicieron desde 1992 hasta el año 1997, no habiendo reportado ninguna anomalía particular.
- Las lecturas de los **inclinómetros** instalados fueron suspendidas en octubre de 1996, y los pocos datos existentes de estos instrumentos reportan deformaciones horizontales del orden del 5% y menores, lo cual no indicó alguna anomalía que debiera corregirse.
- Los **testigos superficiales** reportan desplazamientos verticales a lo largo de la corona y sobre la berma aguas abajo desde 1980 y hasta el año 2011, del orden de 14 cm promedio. Los movimientos detectados son tan pequeños que no suscitan preocupación alguna.

Desde entonces, el Organismo de Cuenca Golfo-Centro de la CONAGUA realiza visitas anuales de inspección a la cortina de la presa y no se han registrado anomalías que indiquen un inadecuado comportamiento en algún punto del cuerpo de la cortina.

En cuanto a la probabilidad de ocurrencia de los distintos tipos de fallas descriptos en el punto 2.1.3, es posible realizar las siguientes conclusiones:

a) Desbordamiento del agua sobre la corona: Las obras de excedencias del sistema de presas Alemán y Cerro de Oro tienen una capacidad conjunta de 13,700 m³/seg, el cual es superior a la máxima descarga calculada para una avenida con un periodo de retorno de 10,000 años, que es de 9,000 m³/seg. Por lo tanto, se puede decir que no hay riesgo hidrológico y que la presa puede funcionar adecuadamente en caso de presentarse un evento hidrometeorológico extremo. Por otro lado, puesto que el terreno de cimentación está constituido fundamentalmente por roca caliza y no se han observado asentamientos que indiquen una pérdida de bordo libre por efectos de compresibilidad de los materiales de la cimentación, ni tampoco se tiene el riesgo de un gran deslizamiento de las formaciones rocosas que constituyen el vaso, se concluye que este tipo de falla definitivamente es muy poco probable que ocurra en Cerro de Oro.

b) Inestabilidad de taludes: Por varias razones, es muy poco probable que este tipo de falla pueda ocurrir en la presa Cerro de Oro. Sus taludes están muy tendidos y reforzados por las bermas que existen, tanto aguas arriba como aguas abajo y los materiales que los componen son de gran resistencia al esfuerzo cortante. Tanto las manifestaciones de los desplazamientos verticales y horizontales registrados hasta el año 2011 como las inspecciones visuales realizadas tanto en la corona como en los propios taludes de ambos lados de la cortina indican que hasta esta fecha no se ha tenido indicio alguno sobre la posibilidad en este tipo de falla en la presa Cerro de Oro. Además, respecto de la seguridad de la presa frente a eventos sísmicos, la presa cumple con las normas internacionales y con el Manual de Obras Civiles de la CFE. Específicamente, de acuerdo con el análisis pseudo-estático realizado para el sismo de diseño recomendado por el Manual de Obras Civiles para la zona donde se ubica la presa, el factor de seguridad cumple satisfactoriamente con lo que marca la norma para este tipo de obras.

c) Inestabilidad de la cimentación. Este tipo de fallas ocurre cuando se tienen materiales compresibles y de diferentes características en la cimentación de la cortina, produciendo asentamientos diferenciales importantes. Pero resulta que este no es el caso en la presa Cerro de Oro, puesto que el terreno de cimentación es más o menos uniforme, y está constituido por una terraza que a la vez se apoya en la roca caliza. Además, por los

registros en los desplazamientos verticales de los testigos superficiales, donde se indica que no han existido asentamientos diferenciales que llamen la atención, se puede concluir que este tipo de fallas no se ha manifestado en lo más mínimo en la presa Cerro de Oro.

d) Tubificación o erosión interna. Este tipo de fallas es muy común en este tipo de presas y se inicia a través de la obra de toma o a través de lloraderos donde se observa, por un lado, agua muy turbia denotando arrastre de partículas finas provenientes del corazón impermeable y, por otro lado, aumento constante en el gasto del escurrimiento. Como en el caso de la cortina de Cerro de Oro no se han observado ninguna de estos indicadores y como el corazón impermeable está protegido por filtros de grava y arena, hasta el momento no se tiene indicio alguno que este tipo de falla pueda ocurrir en las condiciones actuales de la cortina. Sin embargo, es altamente recomendable eliminar la vegetación que se observa tanto en la corona como en los taludes, a fin de evitar que se originen oquedades por donde se pueda iniciar el proceso de tubificación.

En cuanto a las especificaciones para la construcción del proyecto, la empresa tiene previsto usar detonaciones cuya velocidad de partículas no exceda de los 5 cm/s, velocidad fijada por CONAGUA según Memo No BOO.05.01.05, del 18 de marzo del 2009 y de acuerdo con la norma internacional. Además, el proyecto contempla uso de detonaciones sólo en áreas donde no existe peligro de dañar alguna estructura aledaña y realizar las excavaciones solamente con maquinaria en aquellos sitios donde existe una estructura que puede experimentar algún daño (como puede ser el caso de una de las galerías). Todos los sitios de las obras donde se piensan utilizar explosivos se encuentran suficientemente retirados del eje de la cortina para evitar daños al corazón impermeable de la cortina.

5. Respuestas concretas a las preguntas planteadas:

A la luz del análisis realizado y de las conclusiones alcanzadas, mis respuestas a las preguntas planteadas por la mesa de diálogo son:

a) “¿Cuál es el estado actual de la seguridad de la cortina de la presa?”

Actualmente, la cortina de la presa Cerro de Oro no presenta anomalía alguna o problema que ponga en riesgo su seguridad.

b) “¿Causarán las actividades futuras de construcción del proyecto una afectación a la seguridad de la cortina de la presa?”

Si la empresa cumple con cada una de las especificaciones previstas para la construcción y operación del proyecto, se puede garantizar que la seguridad de la presa no se verá afectada.

6. Recomendaciones

Independientemente de las conclusiones señaladas en la Parte 4, y mis respuestas concretas a las preguntas planteadas en la Parte 5, deseo hacer algunas recomendaciones a las autoridades responsables del buen mantenimiento y funcionamiento de la presa:

- a) Considerando que la determinación sobre la seguridad futura de la presa por impacto de la construcción del proyecto estará sujeta a la manera en que se utilicen los explosivos, se recomienda, una vez que se apruebe el proyecto de la hidroeléctrica, la instalación de una estación sísmica donde se tenga un acelerógrafo moderno, en la margen derecha cercana al sitio donde se construirá la planta hidroeléctrica, a fin de detectar cualquier movimiento sísmico que pueda dañar la estructura de la presa o a la misma hidroeléctrica.
- b) Es conveniente estar realizando periódicamente estudios batimétricos para asegurar que las aportaciones de sedimentos, durante la temporada de lluvias, no rebase la capacidad de azolves que tiene esta presa.
- c) Que se verifique, ante la presencia de CONAGUA y algún representante de las comunidades, que las velocidades de las partículas de las detonaciones estarán por debajo de la máxima especificada (5cm/seg).
- d) Reactivar a la brevedad el funcionamiento de los siguientes instrumentos: a) inclinómetros para medir los desplazamientos horizontales; b) los piezómetros abiertos para medir la presiones de agua en distintos puntos y a diferentes profundidades de la cortina; c) los testigos profundos que se puedan reactivar, para asegurar que no existen desplazamientos verticales mayores a los estimados, en sitios clave dentro de la cortina.
- e) Realizar aforos periódicos en las filtraciones principales de la presa para medir si van aumentando con el tiempo y sobre todo si llevan arrastre de materiales sólidos.

7. Equipo de trabajo

A fin de resolver cualquier duda del tipo geohidrológico de la presa y detectar cualquier anomalía en el comportamiento futuro de la presa, sea durante la etapa de construcción de la PH, o por el efecto de cargas extraordinarias, como pueden ser grandes avenidas que superen a la máxima probable, o sismos de una magnitud superior al de diseño, cuento con el asesoramiento de un especialista en geohidrología y un ingeniero geotecnista.

En el **Anexo F** se indican los nombres y curriculum vitae de las personas auxiliares que están participando en este proyecto.

Atentamente,

Dr. Raúl Flores Berrones

Anexo A

Fuentes de información consultadas hasta el momento:

- a) Información proporcionada directamente por la Gerencia del Consultivo Técnico de CONAGUA. **Junio 2011**
- b) Información proporcionada por personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que desarrolló el informe “Consideraciones de Seguridad de la Presa Cerro de Oro”; entre esa informaciones incluyó el plano de la instrumentación instalada, así como datos recabados y procesados de la instrumentación en Cerro de Oro. **Junio 2011**
- c) Información del Centro de Instrumentación y Registro Sísmicos, sobre la estación sísmica en Cerro de Oro. **Julio 2011**
- d) Reportes realizados por el grupo de ingenieros que visitaron la presa los días 20 a 22 de junio del año en curso, a fin de revisar la instrumentación instalada. **30/VI/2011**
- e) Libro “Geotecnia en Ingeniería de Presas”, editado por el IMTA (2001)
- f) Libro “Presas de Tierra y Enrocamiento” de Raúl J. Marsal y Daniel Reséndiz (1975)
- g) Listado de referencias entregadas al suscrito por la empresa:
 - 1) Permiso construcción arroyo La Sal, con fecha **14/VI/2010**; 8 páginas
 - 2) Permiso construcción obra de toma con fecha **3/V/2010**; 8 páginas
 - 3) Modificación permiso construcción obra de toma, del **11/XI/2010**; 13 páginas
 - 4) IMTA-POLI Cerro de Oro. Manifestación Ambiental; 116 páginas. **17/XII/2010**
 - 5) UNAM- Revisión Santo Domingo. Informe Final; 35 páginas. **18/XII/2010**
 - 6) Registros históricos de los niveles de la Presa cerro de Oro; **03/I/2011**
 - 7) Carta de factibilidad del Proyecto, firmado por Ulrich Hungsberg; **03/I/2011**
 - 8) Trámite de confección de permisos de construcción del PH; 10 página **03/I/2011**
 - 9) Reporte sobre la seguridad de la Presa C de O, por el Inst. de Ingeniería, UNAM; 81 páginas; **Agosto del 2010**.
 - 10) Dibujos en planta de la lumbrera y el manantial “Los Reyes”; dos planos **14/V/2011**
 - 11) Datos Generales de la presa Cerro de Oro; 11 hojas. **19/XII/2010**

Referencias publicadas o por publicarse durante al año en curso donde es autor Raúl Flores Berrones

- 1) Internal Erosion Due to Water Flow Through Earth Dams and Earth Structures (Capítulo de un libro que está por publicarse). Raul Flores-Berrones (IMTA) and Norma Patricia Lopez-Acosta (UNAM)
- 2) Internal Erosion and Rehabilitation of an Earth-Rock Dam. Raúl Flores-Berrones, F.ASCE; Martín Ramírez-Reynaga; and Emir José Macari. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137, No. 2, **February 1, 2011**
- 3) Nuevo método de diseño sísmico para cortinas de tierra y enrocamiento y taludes. Eduardo Botero, **Raúl Flores Berrones**, Miguel P. Romo, Bogart C. Mendez: *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes *Ingeniería hidráulica en México*, vol. II, núm. 3, julio-septiembre de 2011, pp. 177-200

Anexo B

Visita técnica al sitio de la presa

La visita se realizó por la tarde del jueves 2 de junio, acompañado por varios representantes de las comunidades. La primera parte de la visita se efectuó por la margen izquierda de la cortina, visitando el manantial denominado “El Chino”, a fin de observar sus características principales y tomar medidas de la salinidad y temperatura de su agua. Igualmente se observaron las condiciones actuales que guarda la formación rocosa en esa margen, en la cual se encontró que, si bien existieron algunos deslizamientos en esa parte, actualmente los mismos fueron estabilizados mediante anclas y cortes para mejorar el factor de seguridad de esa formación. En la zona del vaso de esta margen se midieron también la salinidad y la temperatura del agua, a fin de comparar estas características con las obtenidas en los manantiales al pie de la cortina.

Posteriormente, se recorrió toda la superficie superior de la cortina de la presa a fin de poder observar cualquier anomalía que pudiera existir en la corona o en los taludes (grietas, deslizamientos, caídos, etcétera). Igualmente, se observó la localización de varios de los instrumentos instalados, como son piezómetros, inclinómetros y testigos superficiales, mismos a los que no se les ha dado mantenimiento ni tomas de lecturas desde el año 2008. Llamó la atención de que existe un gran número de arbustos en los taludes de la cortina, así como un pasto muy crecido y abundante en todo el ancho de la corona, lo cual indica un descuido en el mantenimiento por parte de las autoridades encargadas de la seguridad de esta presa.

Al llegar a la margen derecha de la cortina, se pudieron observar los trabajos realizados en la lumbrera de la obra de toma, así como la localización de las dos galerías que existen en el empotramiento de la cortina con la formación rocosa de dicha margen. No se observó ninguna anomalía en la estabilidad de los estratos de roca en esa zona.

Finalmente, se visitó el sitio donde se localiza el manantial *La Sal*, donde se tomaron muestras del agua para medir su salinidad y su temperatura.

Esta visita técnica fue complementada con otra realizada a todo el vaso de la presa, el 18 de julio del año en curso. Las comunidades expresaron su preocupación de que la acumulación de sedimentos que se depositan en el vaso durante la época de lluvias pudiera significar un riesgo para la seguridad de la presa. La capacidad de las obras de excedencia de la presa es suficientemente grande como para descartar cualquier riesgo de esta naturaleza en el corto y mediano plazo. Cualquier información adicional para analizar este tipo de impacto en el largo plazo debe ser solicitada a CONAGUA.

Atentamente,

Dr. Raúl Flores Berrones

Anexo C

Levantamiento topografico de testigos superficiales. Presa Cerro de Oro, Tuxtepec, Oax.

ANTECEDENTES

Dentro de los trabajos desarrollados para elaborar el dictamen sobre la seguridad de la Presa Cerro de Oro y con la finalidad conocer la evolución de los asentamientos respecto al banco de información que se tiene de años anteriores, se realizó el levantamiento topográfico de 146 testigos superficiales ubicados a lo largo de la cortina, en la berma aguas abajo y en 4 secciones transversales de la presa.

Para el desarrollo de este trabajo se conformó una brigada de topografía para el levantamiento de información de campo y su posterior procesamiento en gabinete. El periodo de ejecución de esta actividad fue del 19 al 23 de julio del 2011.

EQUIPO UTILIZADO

Para lograr una mayor cobertura y obtener información copiosa de manera rápida y económica, se utilizaron equipos con tecnología de punta, mismos que a continuación se describen:

- ✓ GPS Tiempo real, marca TOP CON, modelo R3, de alta precisión con trípode de aluminio graduado.



- ✓ Estación total, marca SOKKIA, modelo SET230RK3, precisión 2 segundos, alcance con prisma 5,000 m, con trípode de aluminio, bastón de aplomar, prisma con soporte y tarjetas reflectoras.



- ✓ Nivel automático, marca SETL, modelo DS2010, precisión mm/km ± 1.0 con trípode de aluminio de extensión, estadal aluminio de 4 metros y cinta de cruceta de 50 metros.



Los trabajos de topografía se apegaron a las prácticas y procedimientos aceptados para levantamientos topográficos.

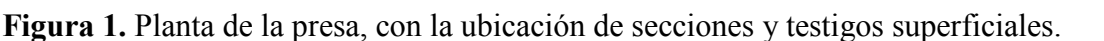
DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

El trabajo consistió básicamente en localizar, con apoyo del plano de instrumentación, los testigos superficiales ubicados sobre la cortina de la presa Cerro de Oro, para nivelarlos y obtener su desplazamiento vertical y horizontal. Una vez ubicados se realizó el posicionamiento del GPS en cada uno de ellos y se hizo el corrimiento de una nivelación diferencial para comprobación de la elevación.

La nivelación diferencial se realizó a partir de un banco de nivel (76.725 msnm) ubicado sobre la margen izquierda de la cortina de la presa. A partir de este banco se corrió la nivelación (ida y vuelta) a cada uno de los testigos superficiales para poder obtener el desnivel entre dos o más puntos, en estos trabajos, la distancia entre el nivel y el prisma no fue mayor de 50 m, para obtener mayor precisión en el cierre.

El posicionamiento de cada uno de los testigos superficiales quedo referenciado al sistema de coordenadas basadas en unidades Universal Transversal de Mercator (UTM) las cuales quedaron vinculadas con el banco de nivel referenciado.

Los trabajos de campo realizados y la información obtenida se traducen en la obtención de planos y gráficas los cuales nos indican la realidad física de la cortina de la Presa Cerro de Oro. A continuación se detallan los resultados obtenidos.



Todas las figuras se integraron en un plano en el que se aprecian de manera más clara los detalles de las mediciones.



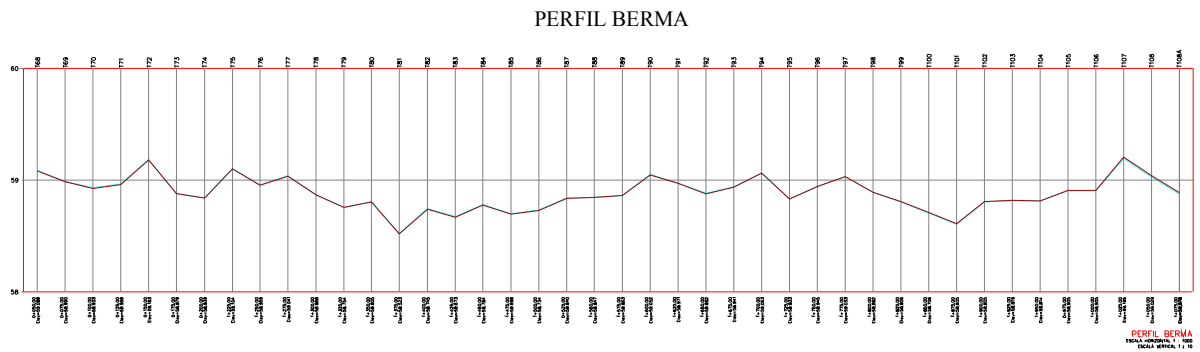


Figura 3. Gráfica de los testigos superficiales de la berma aguas abajo.

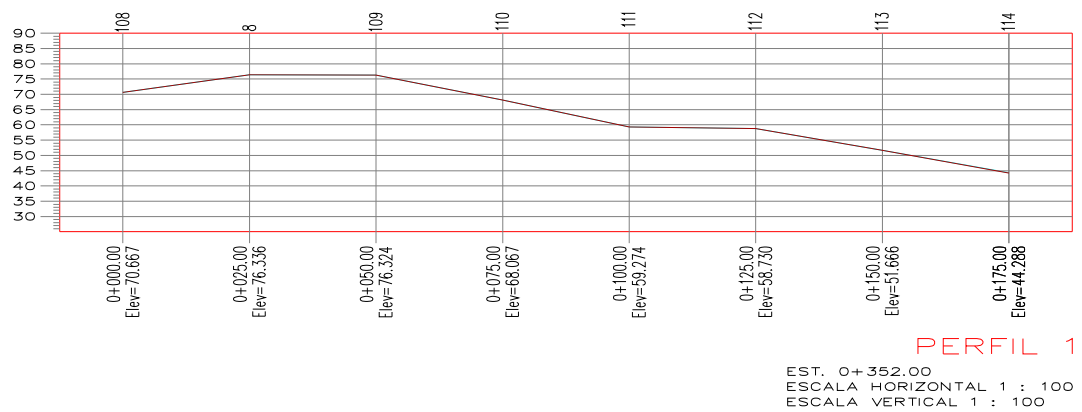


Figura 4. Gráfica de los testigos superficiales del perfil 1.

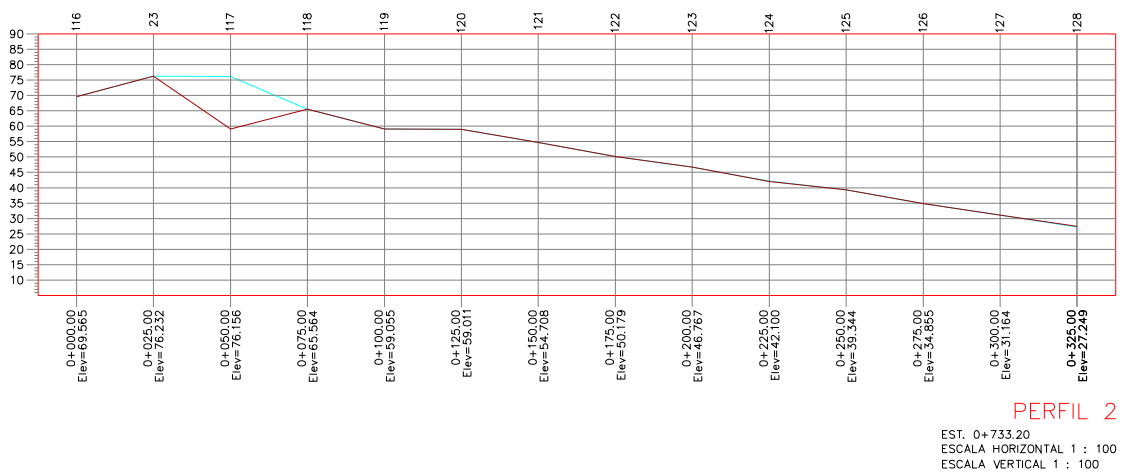


Figura 5. Gráfica de los testigos superficiales del perfil 2.

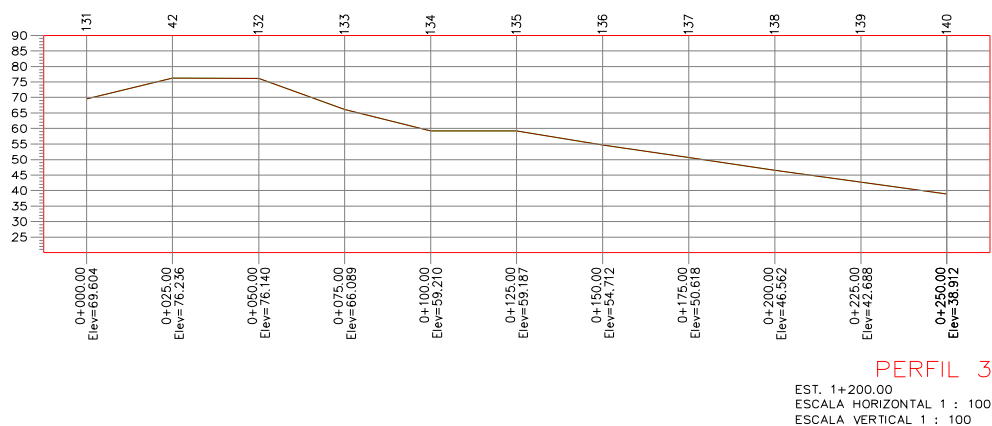


Figura 6. Gráfica de los testigos superficiales del perfil 3.

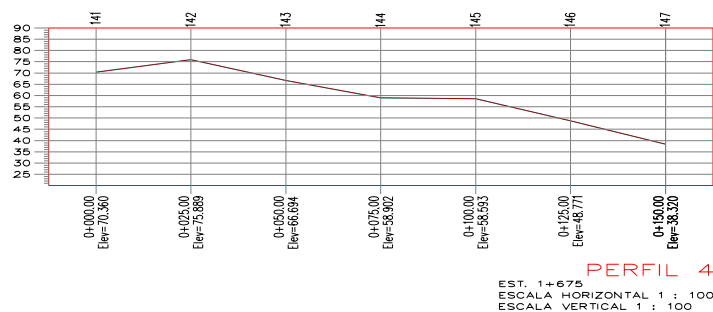


Figura 7. Gráfica de los testigos superficiales del perfil 4.

En la Fig. 8, que se puede observar con mayor detalle por medio de Autocad 2007 o superior, mediante la liga: [TESTIGOS SUPERFICIALES S LOGO.dwg](#), se muestra un plano donde se hace una síntesis de toda y cada una las gráficas anteriores. Cabe señalar que las ordenadas en todas estas gráficas se refieren a elevaciones en metros sobre el nivel medio del mar.

CONCLUSIONES

Con base en las mediciones hechas a los testigos superficiales en julio del 2011 y después de compararlas con las realizadas en octubre del año 2010 se puede decir que prácticamente no hubo asentamientos en este periodo.

Los testigos 26 y 65 de la corona y en el 117 del perfil 2 (estación 0+733.20), son los únicos que muestran diferencias con respecto a las mediciones del año pasado que, sin embargo, pueden atribuirse a errores en la base de datos de las mediciones del año 2010 (que fue proporcionada como referencia), ya que el testigo 26 muestra un asentamiento de aproximadamente 1 m, mientras que los testigos 65 y 117 muestran un levantamiento de varios centímetros que no corresponde con lo observado en la visita de inspección.

Para conocer la evolución de los asentamientos desde su primer llenado, se ha solicitado a las autoridades correspondientes la base de datos con todas las mediciones que se han realizado a los testigos superficiales en el pasado, pero hasta la fecha dicha información no ha sido entregada.

En términos generales, con base en el análisis hecho a la información levantada en campo de los testigos superficiales en los años 2010 y 2011, se puede concluir que no se aprecian asentamientos en la presa que sugirieran problemas en su comportamiento.

Anexo D

REGISTROS EN ESTACIÓN SÍSMICA No 25 DE LA SASO

Imagen de aceleración del sismo del 7 de abril del 2011 en Cerro de Oro

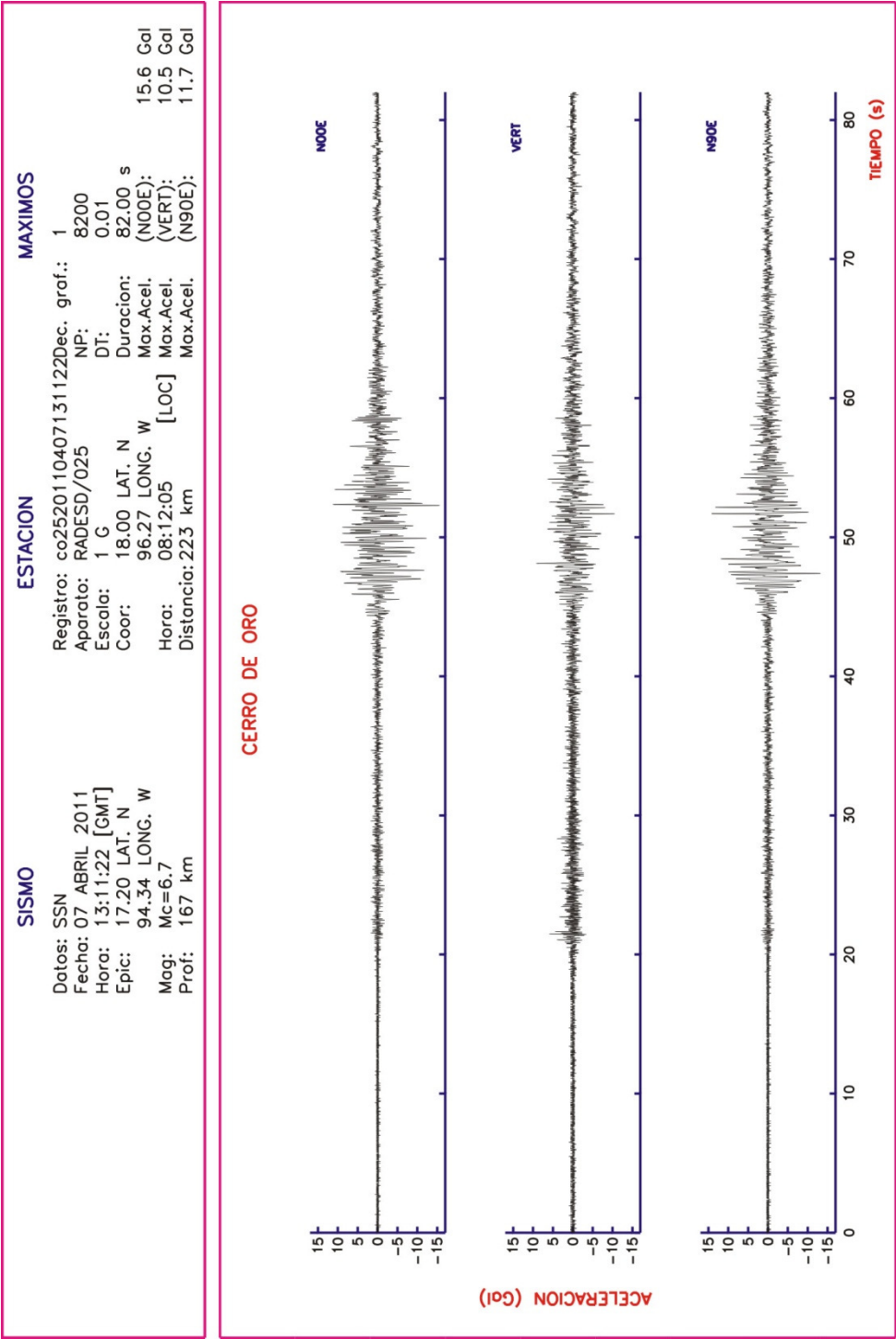


Imagen de velocidad del sismo del 7 de abril del 2011 en Cerro de Oro

SISMO

Datos: SSN
Fecha: 07 ABRIL 2011
Hora: 13:11:22 [GMT]
Epic: 17.20 LAT. N
94.34 LONG. W
Mag: Mc=6.7
Prof: 167 km

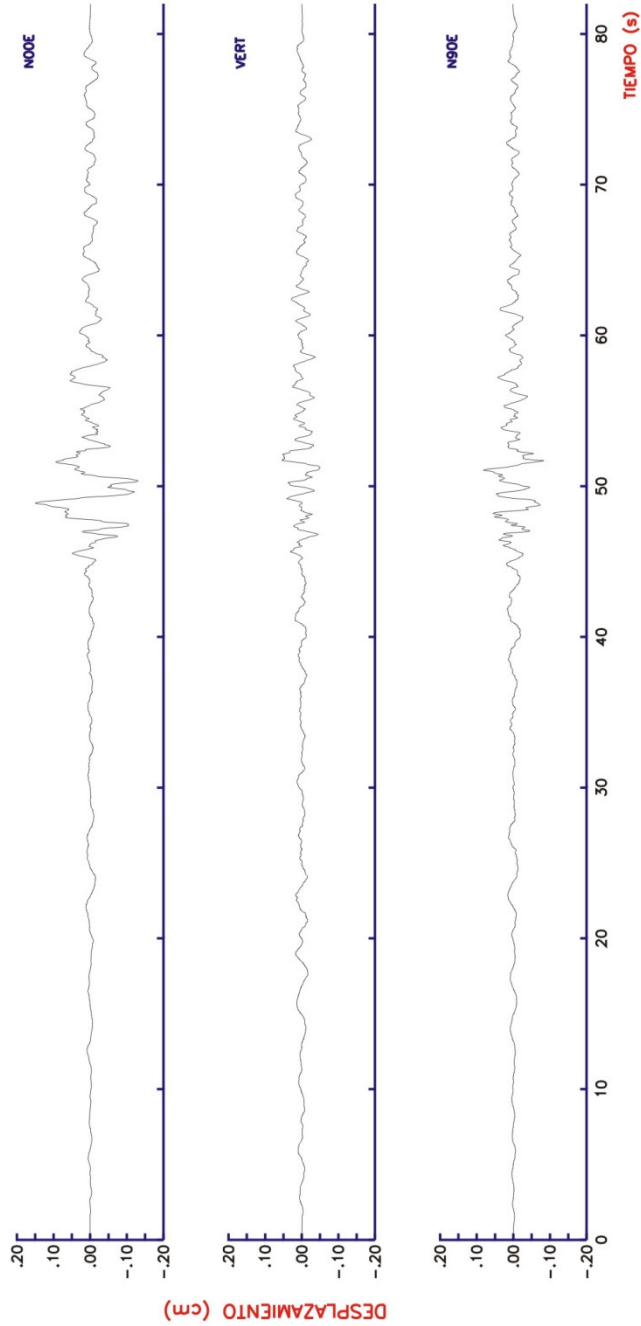
ESTACION

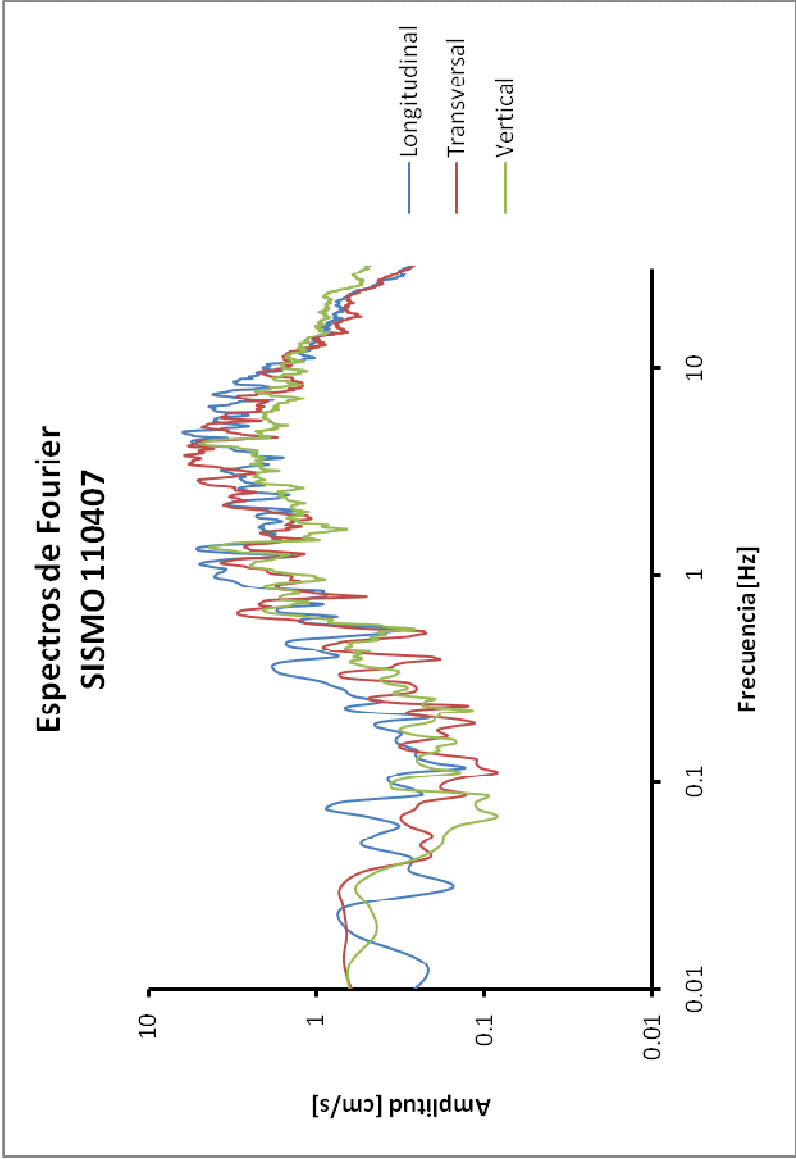
Registro: co2520110407131122Dec. graf.: 1
Aparato: RADESD/025 NP: 8200
Escala: 1 G DT: 0.01
Coor: 18.00 LAT. N Duracion: 82.00 s
96.27 LONG. W Max.Des. (N00E):
Hora: 08:12:05 [LOC] Max.Des. (VERT):
Distancia: 223 km Max.Des. (N90E):

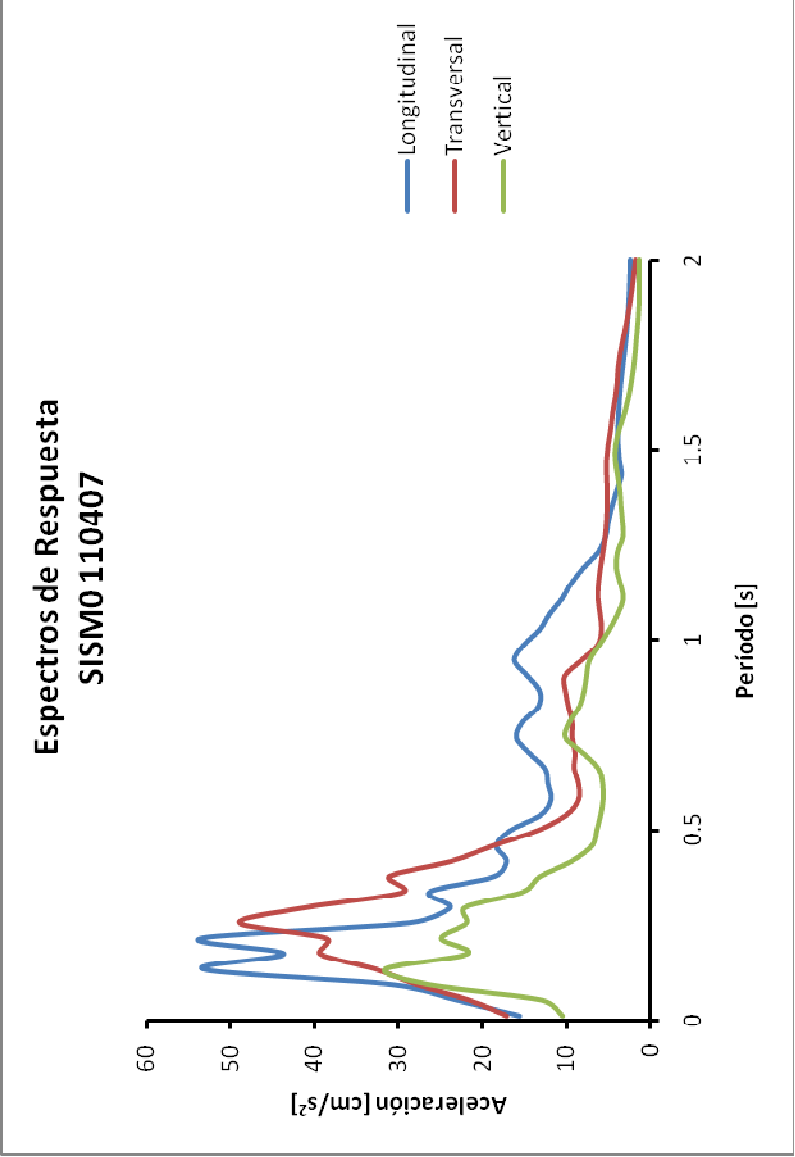
MAXIMOS

0.149 cm
0.053 cm
0.082 cm

CERRO DE ORO







LONGITUDINAL N00E
VERTICAL VERT
TRANSVERSAL N90E

Anexo E

Síntesis del procedimiento para voladuras controladas. Proyecto Hidroeléctrico Cerro de Oro, Tuxtepec, Oaxaca.

EFFECTOS DE LAS VOLADURAS

Cuando los efectos de una voladura, reales o imaginarios interrumpen el confort del público, pueden crearse relaciones tirantes entre los constructores, cliente, autoridades y vecinos.

Fabricantes de explosivos, consumidores y agencias gubernamentales, han invertido cantidades substanciales de tiempo y esfuerzo para tener un mejor entendimiento entre las diferentes variables de las voladuras y efectos que se tienen, como la vibración, la cual es la causa principal de diferencias entre los involucrados en un proyecto. Numerosos estudios han proporcionado guías para el uso de voladuras de retardo y técnicas modernas de supervisión para reducir el posible daño a estructuras cercanas.

Con un cuidadoso diseño de la voladura, con uso de retardos y supervisando con el uso de sismógrafos, se reducen los efectos de vibración. Asimismo, mediante un registro puntual de las voladuras e informando al cliente, autoridades y vecinos, se reducen las molestias e inconformidades.

VIBRACION DEL SUELO

Cuando un explosivo detona en un barreno, genera una intensa onda de esfuerzo en la roca circundante (onda sísmica). La roca alrededor del barreno es pulverizada; a una cierta distancia la distorsiona en forma permanente y la rompe; a partir de esta distancia la intensidad de las ondas de esfuerzo se reducen a tal grado, que no hay una deformación permanente en la roca. La onda de esfuerzo se propaga a través de la roca en una forma elástica, de tal manera que las partículas de roca regresan a su posición original después de que ha pasado la onda de esfuerzo.

Existen instrumentos especiales, conocidos como sismógrafos, que miden el movimiento de partícula asociado con las ondas sísmicas. El registro lo hacen en tres direcciones perpendiculares. El sismógrafo se coloca en la estructura a observar, para que en ese lugar se registren las vibraciones que pudieran llegar a ese punto. Si el sismógrafo recibe una vibración, la detectará y la graficará.

EFFECTOS DE LAS ONDAS SISMICAS EN ESTRUCTURAS

La intensidad del movimiento que pueden soportar varios tipos de estructuras debe establecerse antes de determinar las cargas en peso aceptables a diferentes distancias. Obviamente el nivel de movimiento requerido para dañar una estructura depende de su construcción. La velocidad de una partícula, es decir que tan rápido se mueve el suelo en ese punto, es el parámetro que se debe medir, controlar y comparar contra los estándares

internacionalmente aceptados. En la tabla 1 se muestra el criterio utilizado por el *Bureau of Mines* de EUA, para determinar los daños en las estructuras a partir de la velocidad de partícula.

Tabla 1. Criterio del *Bureau of Mines* de EUA.

VELOCIDAD DE PARTICULA (PULG/SEG)	NATURALEZA DEL DAÑO
12	Se cae roca en túneles sin revestimiento
7.6	50% probabilidad de daño mayor en el enyesado.
5.4	50% probabilidad de daño menor en el enyesado.
2.8 – 3.3	Umbral de daño por voladuras cercanas.
2.0	Criterio de seguridad de voladuras para estructuras residenciales, recomendado por el Bureau Of Mines de EUA.

PREDICCION DE NIVELES DE VIBRACION

Como ya se comentó anteriormente, el elemento principal a controlar en una voladura es la velocidad de la partícula, cuya magnitud disminuye en razón directa de la distancia de medición y la cantidad de explosivo que en un instante dado es detonado.

El procedimiento del *Bureau of Mines* de EUA en lo que a transmisión de movimiento de suelo se refiere, define que la máxima velocidad de la partícula depende de la máxima carga en peso por retardo y no del peso total de la carga, teniendo como condición que el intervalo entre retardos es de 8 milisegundos o más.

La observación de los resultados con un gran número de mediciones en el campo ha demostrado que la ecuación de propagación puede comúnmente expresarse como sigue:

$$V = 160(R/W^{1/2})^{-1.6} \quad (\text{ec. 1})$$

En donde:

V = velocidad máxima de partícula, en pulgadas por segundo.

R = distancia entre el sitio de explosión y el de registro, en pies.

W = carga máxima de explosivo por periodo de retardo de 8 milisegundos o mas, en libras.

El diseño de una voladura controlada consiste en determinar la cantidad de explosivo que se puede detonar en un intervalo mínimo de 8 milisegundos, para que a una distancia especificada, no se altere en forma permanente la posición de una partícula. La cantidad de explosivo se calcula de tal manera que únicamente mueva y rompa la roca y que no produzca vibraciones tales que puedan afectar a estructuras vecinas.

La tabla 2 muestra la cantidad de explosivo, calculada con la ec. 1, que se puede detonar en un intervalo mínimo de 8 milisegundos, a distintas distancias, para no generar velocidades de partícula superiores a 2 pulg/s, que es el valor de seguridad de acuerdo con el criterio de *Bureau of Mines* de EUA.

Tabla 2. Distancia y cantidad de explosivo para no exceder la velocidad de partícula recomendada por el *Bureau of Mines* de EUA.

R (m)	R (pies)	W (lb)	W (kg)	V (pulg/s)
3.00	9.84	0.40	0.18	2.0
5.00	16.40	1.12	0.51	2.0
10.00	32.81	4.50	2.04	2.0
15.00	49.21	10.12	4.59	2.0
20.00	65.62	18.00	8.16	2.0
30.00	98.43	40.49	18.37	2.0
50.00	164.04	112.47	51.02	2.0
100.00	328.08	449.89	204.07	2.0

EXCAVACIONES EN ROCA CON USO DE EXPLOSIVOS

Con base en la Ley de Armas de Fuego y Explosivos, se requiere el permiso correspondiente de la Secretaria de la Defensa Nacional para compra y uso de explosivos; en ningún momento debe permitirse el almacenamiento de estos productos.

En todo el proceso se debe hacer uso de los conceptos básicos de voladuras controladas, descritos en el manual para el uso de explosivos (*16ª. Edición publicada por la ed. I. Dupont de Nemours and Company, Sección Promoción de Ventas, Departamento de Explosivos, Wilmington, Delaware, 1989, EUA.*). Durante todo el proceso debe ser **continuo el monitoreo** de las voladuras utilizando **sismógrafos**.

De acuerdo a las especificaciones aprobadas por las diferentes autoridades en la materia, las excavaciones en roca fija se realizan comúnmente con el método tradicional de barrenación y empleando las técnicas de voladuras controladas para reducir el efecto de las vibraciones.

El proceso de barrenación puede hacerse con el empleo de equipo de perforación neumática tal como el mostrado en la figura 1.



Figura 1. Equipo de perforación Track-Drill.

Para facilitar la descripción, las actividades principales de excavación se agrupan en dos tipos:

- ✓ A cielo abierto
- ✓ Subterráneas

En el caso de excavaciones a **cielo abierto**, la excavación se limitará realizando pre-cortes en los taludes de la excavación de acuerdo al trazo del proyecto, para posteriormente barrenar en banco (figuras 2 a 4).



Figura 2. Precorte en taludes.



Figura 3. Barrenación.



Figura 4. Retiro de material producto de voladoras.

En el caso de la excavación **subterránea** debe hacerse en dos frentes:

- ✓ Excavación de la lumbrera
- ✓ Excavación del túnel

En el caso de la lumbrera se delimitará el contorno con un pre-corte y se procederá a excavar en bancos de 2.20 a 2.40 metros de profundidad con el empleo de equipo neumático, pistolas de piso y compresor.

En el caso del túnel se propone utilizar el método tradicional, que consiste en barrenar una cuña quemada al centro (barreno de mayor diámetro sin carga de explosivos), un patrón de barrenos espaciados, cargados con explosivos e iniciadores NO eléctricos, programados con una secuencia de tiempos que permitan el desalojo del material, dando prioridad a los del centro y una línea perimetral que delimite la excavación a las dimensiones de proyecto del

túnel. A estos barrenos se les colocará el iniciador con el mayor retardo para que se produzca el efecto de post-corte en el contorno de la excavación.

Durante el proceso de excavación debe irse cuidando la seguridad de la misma, utilizando los ademes diseñados para este efecto. Donde se requiera, posterior a la excavación, se debe amacizar, colocar anclas y lanzar concreto en el espesor requerido.

RECOMENDACIONES

Es importante desarrollar cálculos por autoridades en la materia, que ayuden a predecir los niveles de vibración que se generarán por las voladuras.

Se deben monitorear las voladuras a través de un sismógrafo y los resultados de las mediciones se deben comparar con los criterios de seguridad que han sido determinados.

En caso de ser necesario deben realizarse los ajustes correspondientes para no superar los niveles de seguridad establecidos.

Los explosivos comerciales y la gran variedad de iniciadores no eléctricos, brindan hoy una serie de alternativas que permiten trabajar con seguridad, respetando la normatividad en la materia.

Anexo F

Nombre y Curriculum Vitae de los ingenieros auxiliares para la toma de decisiones en la Presa Cerro de Oro.

a) Isaac Bonola Alonso Ing. Geotecnista

TEL. OFNA.: (777) 3293600 ext 624

E-mail alterno: **ibonolaa@yahoo.com**

Nace el 5 de noviembre de 1972 en Cd. Ixtepec, Oaxaca. Desarrolla sus estudios de licenciatura en ingeniería civil en el Instituto Tecnológico del Istmo, ubicado en la ciudad de Juchitán, Oaxaca, concluyéndolos en 1993. En ese mismo año, se le otorga la medalla “Los mejores estudiantes de México” por parte de Conacyt y El Diario de México. En 1994, recibe una beca por parte del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), en Cuernavaca, Morelos, para desarrollar su tesis de licenciatura y posteriormente es invitado a colaborar como investigador en ese mismo instituto, puesto que ocupó hasta 1995 cuando fue invitado a colaborar como Especialista en Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), incorporándose al área de Geotecnia, sitio en el que se encuentra laborando hasta la fecha. En 1998 concluyó sus estudios de maestría en la DEPMI-UNAM en el área de Mecánica de Suelos y obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería con el trabajo titulado “Método híbrido de elemento finito y de frontera para la evaluación de la respuesta sísmica de muros de retención”. Actualmente es Candidato a Doctor en Ingeniería por la UNAM, en el área de GEOTECNIA y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

En el área de geotecnia ha participado en el desarrollo de las líneas de investigación sobre geotecnia experimental, cimentaciones, deslizamientos, flujos de lodos y escombros, seguridad de presas y en los últimos años ha desarrollado trabajos y participado en proyectos del área de dinámica de suelos e ingeniería sísmica.

Ha participado en más de treinta proyectos tanto en el IIE como en el IMTA para distintas dependencias como CFE, PEMEX, CONAGUA, Gobiernos Municipales y Estatales, entre otras. Es coautor del “Manual de suelos inestables”, de los libros “Protección y control de cauces” y “La medición de los sedimentos en México”. Es editor y autor del “Manual de Diseño Geotécnico de Presas Pequeñas”. Ha escrito más de veinticinco artículos ya sea como autor o coautor en diversos congresos nacionales e internacionales, así como en revistas de divulgación y científicas. Ha impartido cursos en México y en otros países de Latinoamérica. Ha dado conferencias por invitación para la Sociedades Profesionales de Ingeniería, Universidades y Tecnológicos del país y Colegios de Ingenieros Civiles de varios estados. Ha dirigido Tesis para Universidades Públicas y Privadas de todo el país y participa como asesor de distintas empresas de la iniciativa privada.

Cuernavaca, Morelos, agosto de 2011.

b) Ing. Luis Velázquez Aguirre, Ing. Geohidrólogo

ING. GEOLOGO EGRESADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNAM

INICIO SU DESARROLLO PROFESIONAL EN 1977 EN LA COMISION DEL PLAN NACIONAL HIDRAULICO EN EL PROYECTO “HIDROGEOLOGIA E HIDROGEOQUIMICA DE LA PENINSULA DE YUCATAN”.

PUBLICACIONES PRINCIPALES:

HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUIMICA DE LA PENINSULA DE YUCATAN,

Revista de Ingeniería Hidráulica Vol. I, Núm. 1, 1986

COMPORTAMIENTO GEOHIDROLÓGICO DEL SISTEMA DE POZOS CERRITOS, N.L.

Revista de Ingeniería Hidráulica Vol. I, Núm. 2, 1986

LA EXPLORACION GEOHIDROLOGICA EN MEXICO.

Revista de Ingeniería Hidráulica Vol. VII, Núm. 1, 1992

PROVINCIAS HIDROGEOLOGICAS DE MEXICO.

Revista de Ingeniería Hidráulica Vol. VII, Núm. 1, 1992

CURSO / SEMINARIO / TALLER / OTROS:		
Nombre:	Institución:	Fecha:
1.- GEOHIDROLOGIA	DESFI-CEC-UNAM	1978
2.- REMOTE SENSING APPLICATED IN HYDROLOGY	EROS DATA CENTER, USGS	1981
3.- MODELACIÓN MATEMÁTICA DE ACUIFEROS	NATIONAL WATER WELL ASSOC	1987

EXPERIENCIA PROFESIONAL:	
Lugar:	Período:
Ayudante de Profesor, Facultad de Ingeniería, UNAM.	1975-1976
Comisión del Plan Nacional Hidráulico, SARH. Jefe de proyectos Coordinador de técnicos Jefe de Departamento de Aguas Subterráneas	1977-1981 1981 – 1983 1984 - 1985
Subdirector de Prospección Geohidrológica Dirección de Aguas Subterráneas. SIH, SARH. <i>Principales Actividades:</i> • Coordinar y supervisar el programa nacional de prospección geohidrológica • Establecer la normatividad en materia de prospección	1986-1988

geohidrológica • Proponer el programa de perforación exploratoria • Coordinar la realización del mapa geohidrológico de México (Programa Hidrológico Internacional. UNESCO).	
Subgerente de Exploración Geohidrológica Gerencia de Aguas Subterráneas. Comisión Nacional del Agua. <u>Principales actividades:</u> • Coordinación y supervisión del programa nacional de exploración geohidrológica • Integración de los resultados de prospección geohidrológica, exploración geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, evaluación geohidrológica preliminar y del programa de perforación exploratoria. • Establecimiento de la normatividad en materia de exploración geohidrológica	1989-1993
Coordinador de Asesores de la Subdirección General de Administración del Agua. Comisión Nacional del Agua. <u>Principales actividades:</u> • Secretario del Comité Interno Central de Administración del Agua • Supervisión del programa de capacitación de la SGAA • Seguimiento de los asuntos internacionales en la SGAA • Integración del informe bimestral para el Consejo Técnico de la CNA • Integración del informe trimestral de actividades de la SGAA	1993-1994
Asesor Técnico de la Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua <u>Principales Actividades:</u> • Coordinador del Área de Investigación y Desarrollo • Seguimiento del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (FENOS). • Responsable de la página del FENOS en INTERNET • Análisis de la variabilidad de la precipitación en México. • Asistencia Técnica a la Gerencia durante la temporada de ciclones tropicales. • Atención al programa “Cambio Climático” • Coordinación de la reunión “<i>Encuentro para la Medición e investigación Nacional sobre Disponibilidad y Calidad del Agua</i>”, julio de 1995.	1995-1997

Consultor Independiente PROYECTOS ACTUALES 2011	1998 A LA FECHA
Modelo hidrogeológico del proyecto hidroeléctrico “El Tortugo” sobre el río Guayllabamba, al norte de Ecuador.	TECHNOPROJECT SA de CV PARA Hidroequinoccio. Ecuador.
Estudios hidrogeológicos para complementar los requerimientos de la Norma Aplicable (NOM-014-CONAGUA-2003 Y Anteproyecto del sistema de recarga (SRA) para le CIP Costa Pacífico, en el estado de Sinaloa	COPEI INGENIERÍA PARA FONATUR, CTO. CPPH- 0902/11-S-01
Estudio de instrumentación de la red de monitoreo piezométrico del acuífero Península de Yucatán en su parte noreste.	Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Península de Yucatán