

ARTÍCULO CIENTÍFICO
SCIENTIFIC ARTICLE

**PROBLEMAS GEOLÓGICOS DE LA
SEGURIDAD DE LAS PRESAS Y
EMBALSES DE PANAMÁ:
CUENCA DEL CANAL (PARTE 1)**

**GEOLOGICAL PROBLEMS OF THE SAFETY OF
DAMS AND RESERVOIRS IN PANAMA:
CANAL BASIN (PART 1)**

Leslie F. Morelio León

REVISTA GEOINFORMATIVA
No. 2. 2021

Leslie F Morelio-León

INVERSIONES GAMMA, S.A
especialistaprinicipal@gmail.com
Orcid: 0000-0001-9667-3258

RESUMEN

Estructura geológica, la sísmica y el vulcanismo, así como la paleosismología, paleohidrología y neotectónica imponen un grupo importante de restricciones en la gestión de la seguridad geológica, hidrológica y estructural de las presas, embalses y obras de infraestructura hidráulica. En el ejemplo de dos regiones hidrológicas de excepcional importancia: la Cuenca del Canal y las Cuencas del Oeste se discuten algunas de estas limitaciones sobre la seguridad de las obras y la gestión de las cuencas hidrológicas en zonas sísmicas activas. En esta primera parte se discuten los antecedentes del problema y la situación geológica de las presas del Canal de Panamá una de las vías comerciales más importantes del mundo y cuya seguridad estructural es fundamental para garantizar el comercio mundial. La bibliografía se resume al final del artículo dos.

Palabras clave: Canal de Panamá; cuenca; seguridad de presas; terremotos; volcanes

ABSTRACT

The geologic structure, seismics and volcanism together with paleoseismology, paleohydrology and neotectonics are remarkable restrictions in the management of geologic, hydrologic and structural safety of dams, lakes and the hydraulic infrastructure. The geologic boundaries on the design, construction, operation and dam safety and in the watershed management are evaluated in this paper for two hydrologic regions of noticeable importance: The Panama Canal Basin and the Western Watersheds. In the first of two papers the background of the problem and the geological situation of the Panama Canal is discussed. Bibliography is included at the end of the second article of the contribution.

Key words: dam safety, earthquake, Panama Canal, volcanism, watershed

Recibido: 28 del 9, 2021
Aprobado: 8 del 11, 2021

INTRODUCCIÓN

Las presas y su infraestructura son comúnmente diseñadas conservadoramente, construidas adecuadamente y meticulosamente explotadas. Pero es innegable que los beneficios que ofrece la regulación artificial van junto con un alto riesgo para las personas, las propiedades y el medio ambiente; sobre todo si los terremotos se conjugan con las llamadas por De Membrillera y sus colaboradores “causas ocultas del fallo de presas”; a saber: a) cambios en el uso de la tierra; b) cambios en los patrones meteorológicos; c) diseños obsoletos y d) falta de mantenimiento y financiación (Fig. 1)

Vistas en detalle, las más importantes causas ocultas que agravarán los terremotos y que pueden aparecer combinadas, son las siguientes, de acuerdo con De Membrillera et al (2015):

- Monitoreo inadecuado
- Defectos de construcción
- Inundaciones inesperadas o repentinas no previstas
- Inundaciones que superan la capacidad proyectada y construida de descarga y almacenamiento
- Deslizamientos de tierra debido a fuertes lluvias
- Diseño insuficiente debido a regulaciones laxas y reducción de costos
- Mantenimiento deficiente
- Inestabilidad geológica del valle, la base de la presa y o reactivación de fallas geológicas
- Bombardeo en situaciones de guerra
- Subsistencia causada por la sobreexplotación de aguas subterráneas o incluso de pozos petroleros
- La erosión de ductos
- Reactivación de sumideros
- Destrucción de los estribos, los aliviaderos y las compuertas

Como causa hidrológica, el desbordamiento de una presa es un serio indicador de colapso de la estructura y así fue reconocido en 2016 por la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD). El desbordamiento puede deberse al diseño inadecuado del vertedero, al bloqueo del aliviadero por escombros o al asentamiento (hundimiento) de la cortina de la presa. También puede estar asociado a los defectos de la cimentación, incluyendo el asentamiento y la inestabilidad de las laderas, que son otra causa de fallas de la presa. La tubificación y el sifonamiento es decir, la erosión interna causada por la filtración, es la tercera causa principal. La filtración ocurre a menudo alrededor de estructuras hidráulicas, tales como tuberías y vertederos; a través de madrigueras de animales; alrededor de raíces de vegetación leñosa; y por grietas en el cuerpo de las presas, infraestructura asociada y la cimentación.



FIGURA 1. Fallo de la cortina de una presa (Archivo del autor). Szymansky y Davies han señalado que “Cualquier ingeniero que juzgue que una presa es estable a largo plazo simplemente porque ha sido aparentemente segura durante un largo período de tiempo ... está cometiendo un error de juicio potencialmente catastrófico...”

Otras causas de rotura incluyen fallas estructurales de los materiales utilizados en la construcción de presas y mantenimiento inadecuado. Como causas geológicas, los terremotos y los movimientos de laderas son las más importantes, ya que las erupciones volcánicas y los terremotos son peligros geológicos importantes casi imposibles de predecir. Mientras que para las erupciones volcánicas generalmente las medidas y alertas de seguridad pueden adelantarse, existe una altísima incertidumbre sobre el lugar, momento e intensidad en que puede producirse un terremoto. Los efectos destructivos de estos fenómenos son bien conocidos e incluso pueden ser peores cuando erupciones y terremotos aparecen juntos o incluso más, cuando se combinan con efectos secundarios como tsunamis o fuertes lluvias, como ha ocurrido en el pasado reciente en Ecuador (Terremoto de Napo, 6,9°, una combinación de tormenta y fuertes deslizamientos de terreno en la Vertiente Amazónica de la Cordillera de Los Andes, que provocó 3,000 fallecidos, 5,000 desaparecidos, 75,000 viviendas destruidas y pérdidas económicas por 2 billones de dólares).

Particularmente, los sistemas de abastecimiento de agua podrían verse gravemente dañados y la situación suele empeorarse porque se reduce o suprime drásticamente la disponibilidad de agua (en cantidad y calidad). Sin embargo, los daños que estos fenómenos producen sobre las obras hidráulicas no son la única causa que podría afectar la provisión normal de agua en las zonas dañadas.

Los terremotos acarrearán múltiples peligros en las presas debido a que se ha señalado (Wieland 2010):

- El movimiento de tierra causa vibraciones y distorsiones estructurales en las presas, estructuras mecánicas, obras de fábrica, elementos y equipos adyacentes y sus cimientos
- Se pueden activar movimientos de fallas o de discontinuidades geológicas en la base de la presa cerca de fallas geológicas importantes, causando distorsiones estructurales en el terreno y en la obra
- El desplazamiento de fallas en el fondo del reservorio puede causar oleaje en el embalse en el depósito que sobrepasen la capacidad del aliviadero y la altura de coronación

- Las caídas de rocas y deslizamientos de tierra pueden dañar las compuertas, agrietar los muros del vertedero, volcar los muros de contención, destruir las centrales de generación eléctrica y los equipos electromecánicos, ductos, túneles, mástiles de líneas de transmisión, etc.
- Los movimientos masivos de rocas y tierra que bloquean los ríos pueden formar diques temporales de retención de las aguas que más tarde pueden fallar o desbordarse causando nuevas inundaciones aguas abajo no necesariamente a lo largo de los cauces activos y también pueden provocar grandes olas en el acuatorio
- La licuefacción o la densificación del suelo puede ser motivo de movimientos de rocas y suelos (desprendimientos, deslizamientos, deslaves) y de subsidencia y asentamientos del terreno, que también causan distorsiones en las estructuras de las presas y sus obras accesorias, así como modificaciones en la forma del embalse
- El apilamiento de rocas y tierra es una causa adicional de distorsiones en las obras civiles y, sobre todo, en las estructuras de cierre del embalse
- Los efectos de oleajes menores y de oscilaciones propias del nivel de agua almacenada como las ondas estacionarias del tipo seiches –aunque pueden producirse y deben ser tomadas en consideración- son de menor importancia respecto a las afectaciones que pueden provocar los terremotos sobre las presas

La consideración más importante a tener en cuenta cuando se trata la relación entre las obras hidráulicas y los terremotos es el hecho, a veces olvidado, que cada presa es siempre un prototipo no reproducible y único que ha sido diseñado, construido y normalmente operado bajo condiciones muy específicas, en un sitio con condiciones geológicas, geofísicas e hidrológicas y de peligros naturales casi exclusivas y, por lo común, irremplazables.

Lo mismo es válido para las infraestructuras vinculadas al proyecto (cursos modificados de ríos, canales, estaciones de bombeo, urbanización e industrias locales desarrolladas en la cuenca regulada para aprovechar los beneficios de la obra). El modo en que estos efectos cambiantes en el territorio pueden afectar o ser afectados por los terremotos debe ser abordado cuidadosamente, incluso si las normas, códigos y reglamentos establecidos no cubren las necesidades de seguridad de las presas. Adicionalmente, aunque las conclusiones y métodos de las Mejores Prácticas Internacionales pueden (y deben) ser tomados en consideración, debe tenerse en cuenta la singularidad de cada proyecto hidráulico y, sobre todo, que las observaciones y conclusiones derivadas del comportamiento de otras represas son sólo ilustrativas y no deben usarse para pronosticar el desempeño de una presa en particular.

Estructurado en dos partes, este estudio pasa revista a las conclusiones derivadas de algunos estudios del autor en relación con la seguridad de las presas panameñas en dos entornos singulares: la importante Cuenca del Canal de Panamá, y las Cuencas del Oeste -las de las Tierras Altas de Chiriquí (Fig. 2)-, donde se encuentra la mayor parte del patrimonio hidroeléctrico del país. En atención a sus características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas particulares, se examinan los problemas generales de la estabilidad del parque de presas en operación con particular atención a ciertos problemas aun no resueltos que merecen inmediata atención en el futuro.

Muchos de estos ejemplos fueron presentados en el Seminario de Posgrado sobre Introducción a la Seguridad de las Presas: Seguridad geológica, hidrológica, estructural y medidas estructurales y no estructurales que impartimos en 2018 en la Universidad de Panamá. El tema fue resumido recientemente en la ponencia Paleosismología, neotectónica y seguridad del parque de presas de Panamá, presentada al XXX Congreso Científico Nacional de Panamá en octubre 2021 (Molerio, 2021a).



FIGURA 2. Áreas de estudio en Panamá

REPASO DE ALGUNOS CASOS HISTÓRICOS DE FALLO DE PRESAS

El colapso de una presa no es un fenómeno común, pero cuando ocurre es extremadamente perjudicial para la vida humana y la economía.

La ruptura de la presa de Vaiont, Italia, en 1963 causó 2000 fallecidos y es un caso muy interesante porque el área había sido afectada a menudo por terremotos menores pero que nunca dañaron la presa. En octubre de 1963, mientras el embalse estaba en proceso de llenado, un terremoto sacudió el área provocando un deslizamiento de tierra de cerca de 260 millones de metros cúbicos en el embalse. En apenas 45 segundos, toda la zona se sumergió en el agua y unos 50 millones de m³ de agua fueron liberados de la presa en forma de una ola de 250 metros de altura que destruyó por completo las aldeas cercanas (Fig. 3).

La represa de Fujinuma en Japón es otro caso complejo relacionado con el terremoto de Tohoku del 11 de marzo de 2011. Según estos autores, el terremoto de Tohoku causó un tsunami extremadamente destructivo que mató a miles de personas, provocó una licuefacción generalizada y resultó en decenas de miles de millones de dólares en daños. El modelado matemático realizado por estos autores predijo grandes desplazamientos laterales (metros) de la cara aguas abajo debido a agitación sísmica, fundamentalmente del tipo de deslizamientos de tierra y un asentamiento importante de la cortina. Este asentamiento hizo que la presa fuera vulnerable al desbordamiento y finalmente a su destrucción. La represa falló entre 20 y 25 minutos después del terremoto cuando el embalse, casi lleno, sobrepasó la corona de la presa. Al día siguiente se inspeccionaron 252 presas y se comprobó que siete estaban dañadas. Seis presas de tierra tenían fisuras poco profundas en sus coronas y el lago retenido por una presa de gravedad de hormigón mostró una ligera caída en la ladera. Cuatro presas, entre ellas las de Fujinuma, eran inaccesibles y no pudieron ser inspeccionadas en los días posteriores.

Otro caso notable fue el terremoto de Filipinas de julio 16 de 1990. Con una Magnitud 7,7 se expresó aparentemente en dos centros de liberación de energía activados en un intervalo de pocos segundos. Seis presas (Fig. 4) cerca del epicentro quedaron destruidas y las inundaciones afectaron un área total de 52 000 km², dos veces y media la superficie de la República de El Salvador. Aparentemente tuvo dos centros de liberación de energía activados en un intervalo de pocos segundos y, así, seis (6) presas cerca del epicentro de notable altura (H) de sus cortinas, destacándose la Hidroeléctrica Ambuklao (1956; tierra-roca, H:130 m), la Hidroeléctrica Binga (1960; tierra-roca, H: 102 m), la Derivadora Masiway (1980; tierra, H:25 m) y las Derivadoras Patabangan (1977; tierra. Componentes: Aya Creek (H:102 m), Aya Creek 1 y Patabangan s.s. (H:107 m).

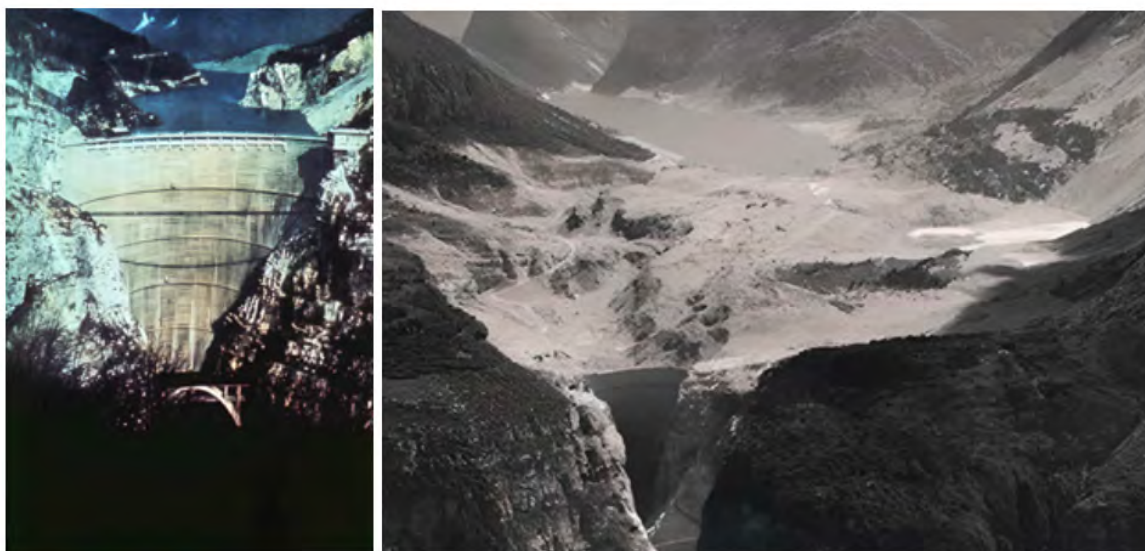


FIGURA 3. Fallo de la cortina de la presa Vaiont, Italia (1963), combinación crítica de lluvia, movimiento de laderas y sismos. Izq. Antes del colapso; Der. Después de colapso (véase el texto para detalles). Fotos Archivo del autor

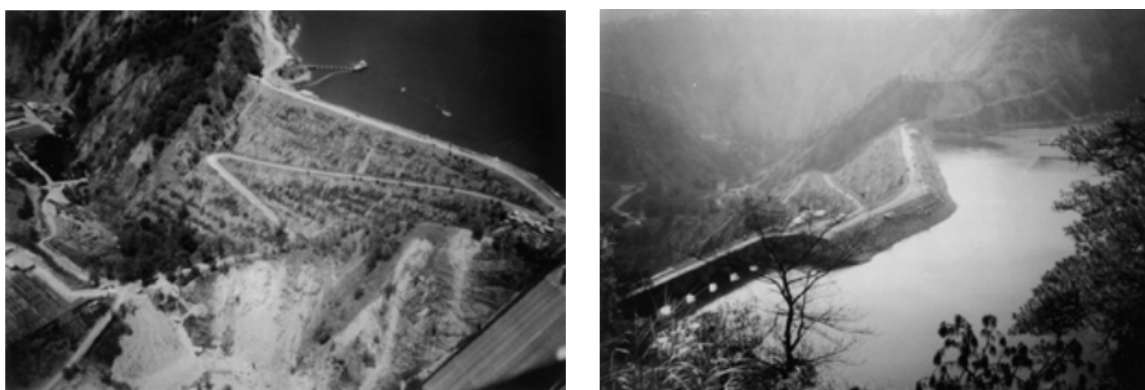


FIGURA 4. Complejo de presas colapsadas por el terremoto de Filipinas en 1990 (véase texto para detalles). Fotos Archivo del autor



FIGURA 5. Paleodeslizamiento activado durante el Terremoto de Pedernales, Ecuador, en abril 2016, (Foto del autor)

El terremoto de Pedernales, $M=7,6$, en abril de 2016 (Fig. 5) no causó daños importantes pero alertó sobre las posibles implicaciones de seguridad en ciertas partes de las estructuras, a partir de offsets (Fig. 6) observados en algunos sitios pero advirtió sobre la peligrosidad de esos eventos en una región especialmente sensible como el Ecuador (Zoback, 1992; Colmenares y Zoback, 2003; Graindorge et al., 2004; Michaud, Witt y Royer, 2009, Ortiz, 2013), cuyo parque de presas construido y en operación es especialmente vulnerable geológica e hidrológicamente (Molerio, 2016a, 2016b, 2018a, 2018b) y puede caracterizarse por muchos de los problemas identificados por De Membrillera et al. (2015) antes mencionados.



FIGURA 6. Desplazamiento del aliviadero de la Presa San Vicente como consecuencia del terremoto de abril de 2016. (Foto del autor)



FIGURA 7. Arco Chato en Panamá Viejo, estructura del convento de San Francisco, en el Casco Viejo de Panamá (foto del autor)

EL CASO PANAMÁ

La Cuenca del Canal de Panamá ha recibido una atención geológica e hidrológica esmerada desde hace más de 100 años y, uno de los resultados más importantes obtenidos, es que el mito de la estabilidad geológica que apoyó su construcción ha dejado de serlo desde hace muchos años y esa es una enseñanza para no olvidar. La mística estabilidad del Arco Chato del Convento de Santo Domingo no debe dejar de lado el sismo que destruyó Panamá Viejo en 1621 (Figura 7).

Los acuciosos estudios que se han llevado a cabo sobre la estabilidad geológica y el modo en que se han expresado en el diseño y construcción de las obras de regulación artificial del escurrimiento del Canal de Panamá cobraron un especial auge en la fase de ampliación del canal y la construcción de las obras del tercer juego de esclusas. Sin embargo, resulta sumamente importante destacar que las conclusiones de muchos de estos estudios son, sin embargo, contradictorias. De hecho, no existe un acuerdo unánime entre los investigadores respecto a la sismicidad del área y el modo en que pueda expresarse en la operación del canal y, por supuesto, en las áreas circundantes, que incluyen la capital del país. Los estudios regionales de sismicidad y de paleosismicidad que se han llevado a cabo para la cuenca del canal no se han armonizado/correlacionado con los que se requieren para evaluar la seguridad de las presas que regulan artificialmente el escurrimiento que requiere el canal para su operación.

La operación del Canal el Panamá (Figura 8), la vía interoceánica más importante del mundo depende de la disponibilidad de agua para el llenado y vaciado de las esclusas que permiten a navegación entre los océanos Atlántico y Pacífico. Con independencia de la alta pluviosidad de esa parte del Istmo centroamericano, la garantía de la disponibilidad se basa en una eficiente retención del agua superficial y un eficiente manejo del sistema de regulación artificial del escurrimiento mediante un sistema de presas de almacenamiento a cargo de la Autoridad del Canal de Panamá. Operar el sistema hidráulico de regulación de las aguas superficiales (y subterráneas) de la cuenca del canal bajo tales condiciones introduce una nada despreciable incertidumbre en la gestión de los recursos hidráulicos regionales e implica una alta responsabilidad en la administración de los riesgos por sismos y eventos asociados (Molerio, 2020a, 2020b)



FIGURA 8. Canal de Panamá desde las Esclusas de Pedro Miguel. (Foto del autor)

La expansión del Canal de Panamá incluye un canal de 6-7 km de largo para facilitar la navegación entre el Corte Gaillard y las nuevas esclusas. Para ello, dos nuevas presas, con una longitud combinada de 4 km y una altura del cierre de unos 30 m, al este las presas Borinquen 1E y 2E y, al oeste, las presas Borinquen 1W y 2W, de 1,6 km de longitud de embalse, contribuyendo a la retención de las aguas del Lago Gatún (Figura 9).

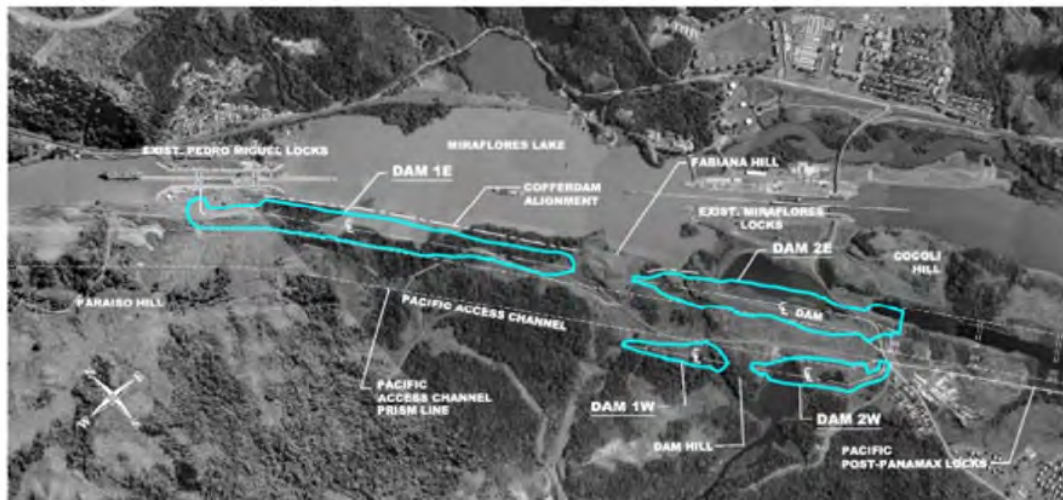


FIGURA 9. Esquema de desarrollo del sistema de presas y derivaciones para la ampliación del Canal de Panamá. (Mejía et al., 2011)

LAS INTERPRETACIONES GEOLÓGICAS EN LA CUENCA DEL CANAL

La Tabla 1 presenta una recopilación de las conclusiones de las investigaciones recientes asociadas con la expansión del Canal y la construcción del tercer juego de esclusas.

Todos los estudios (Figuras. 10 y 11) fijan su atención en el complejo tectónico de las fallas Pedro Miguel (PMF), Gatún (RGF) y Limón (LF) y la inestabilidad estructural de la conjunción entre ellas. La conclusión de que la falla Pedro Miguel sea capaz de provocar un sismo M7 es particularmente importante, ya que 7 o más es un número

próximo al que ha provocado fallos u offsets importantes de presas en sitios como Gujarat, India, (7,5); Filipinas (7,7) o Pedernales, Ecuador, con 7,6. (Molerio, 2021b).

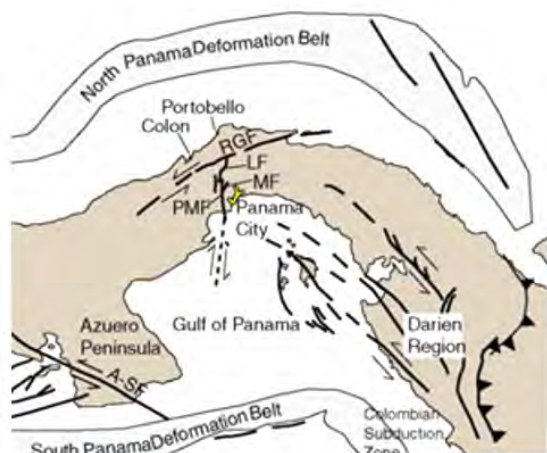


FIGURA 10. Estructuras tectónicas fundamentales de Panamá

La problemática general de seguridad de las presas en la Cuenca del Canal, se puede resumir en los siguientes aspectos:

- Condiciones variables de cimentación con la presencia ocasional de fracturas y grietas débiles
- Baja disponibilidad de materiales adecuados como núcleo de presas
- Clima húmedo tropical con una muy corta estación de seca
- Alto peligro sísmico incluyendo ruptura de fallas a través de las cimentaciones de las presas (Fallas Río Gatún, Miraflores, Pedro Miguel, Limón y Azuero-Soná)
- Potencial amenaza de daño a la cara interior de las presas

TABLA 1. Principales conclusiones de los estudios de peligros geológicos asociados a problemas neotectónicos en la Cuenca del Canal de Panamá

Conclusiones	Fuentes	Comentarios
"en la región determinada como Panamá Central, que involucra el área donde se emplaza el Canal de Panamá, la sismicidad es muy baja y ésta, históricamente, sólo ha dado origen a un evento destructor, el cual ocurrió el 2 de mayo de 1621".	URS. Resumen Ejecutivo del Estudio de Impacto Ambiental de la ampliación del Canal	Sin definir la zona sismogénica de referencia, excluyen otros terremotos de Magnitud 7 o superior en su análisis y la reducen a que la zona definida por ellos, no incluye otros eventos sísmicos importante
"la región no es considerada sísmicamente activa..."	Consortio TLBG/UP/STRI	
"existe una alta probabilidad de que las dos fallas representen un peligro sísmico activo a las instalaciones del Canal..."	2009: Paleoseismic hazard investigation of the Gatun and Limon Faults, Panamá Canal, Panama, www.earthconsultants.com	Se reconocen tres superficies de ruptura en la Falla Limón en los últimos 950-1400 años y el más reciente hace 365 años, con un desplazamiento entre 4,2 y 1,2 m los dos últimos
"La Autoridad tiene conocimiento de las líneas de falla y de los riesgos potenciales involucrados basada en sus propias investigaciones y estudios antes de contratar a Earth Consultants International... "proporciona un análisis erróneo, alarmista y personalizado... del riesgo de terremotos en el canal y la ciudad de Panamá".	2010: Neotectonics and Paleoseismology of the Limón and Pedro Miguel Faults in Panamá: Earthquake Hazard to the Panamá Canal https://www.newscientist.com/article/dn19745-panama-canal-is-due-a-big-earthquake/	Tres superficies de ruptura en la Falla Pedro Miguel en los últimos 1600 años, el más reciente destruyó Panamá Viejo en 1621
Las fallas Pedro Miguel y Limón pueden provocar un sismo de magnitud 7,0 y desplazamientos en las cimentaciones de las presas Borinquen.	2010: Mejia, L.H., M. De Puy, L. D. Alfaro (2010) :The Dams of the Panamá Canal Expansion. GeoStrata, Nov-Dec:34-39	Las presas Borinquen han sido diseñadas para grandes demandas sísmicas y cargas adicionales de impactos potenciales de buques.

Conclusiones	Fuentes	Comentarios
“la Falla Pedro Miguel... puede romper conjugada con la Falla Limón de 28 km de longitud hacia el norte y provocar un terremoto de magnitud 7.0 que generaría movimientos muy fuertes en el área del PAC... y posiblemente descompensaciones mayores de un metro en la cimentación de la presa Borinquen. La falla también pudiera fusionarse con la Falla Miraflores justo al sur del Canal.	2011: Mejía, Roadifer, Forrest, Abrego, De Puy : Design of the dams of the Panama Canal expansion. Proceedings of United States Society on Dams (USSD) 2011. Annual Meeting and Conference, San Diego, California, April	Aunque esta última se ha encontrado que no es sismogénica debido a sus escasos 12 km de longitud y débil expresión geomorfológica puede desplazarse en respuesta a un gran terremoto en la Falla de Pedro Miguel”.
“La Falla Gatún es la falla activa de mayor influencia en el área, donde la actividad sísmica no es significativa y el máximo terremoto que pudiera producir en la falla activa tendría una magnitud de 6.8 (con una frecuencia de una vez en 10000 a 20000 años	2014: Hayase e Hiroshi: Examination Report on Objection to Panama Canal Expansion Project https://www.jbic.go.jp/wp-content/uploads/e/2013/12/20711/20140502_ExaminationReport_en.pdf ,	
“tres fallas activas”	2016: Kim, Martínez y Zambrano en 2016 (MHW GLOBAL Design-Build Construction of the Panama Canal Borinquen Dams 1W, 2W and 2E Proceedings of United States Society on Dams (USSD) 2016. Annual Meeting and Conference, San Diego, California, April	Extendió sus consideraciones sobre una zona de cizallamiento en la presa 2W y sus eventuales problemas constructivos
“el diseño de las obras civiles utilizando los estándares de diseño y factores adecuados de seguridad junto con un dedicado control de calidad de la construcción, es la razón primaria para que se considere, complicaciones no planificadas debido a las obras civiles son muy improbables o prácticamente imposibles con probabilidades de ocurrencia entre 0,01 a 0,001	2016: Bisnett, Wonnice y Montgomery (2016) Bisnett, Rachael V., Wonnice Kim, Donald J. Montgomery, (2016): Panama Canal Borinquen dams and third set of locks operations and maintenance strategy. United States Society on Dams USSD 2016 Annual Conference, 11:	
La Falla Rio Gatún, a 7 km de la presa Gatún es la falla activa más cercana y capaz de producir un sismo de magnitud, 6,9	2018: Mejia, L.H. , M. De Puy (2018): Seismic Stability Evaluation Of Gatun Dam. ICOLD, XXIII Cong. L'Auriche, juillet 2018, 22 :	La presa puede deformarse para el sismo de diseño, pero permanecerá estable. Licuefacción en porciones del relleno hidráulico pero no en las cimentaciones

Los problemas geotécnicos, geológicos, geomorfológicos e hidrológicos asociados, son los siguientes:

- Hidrología del cambio climático: crecidas e inundaciones inesperadas y de magnitudes no previstas
- Movimientos de laderas (deslaves, desprendimientos, hundimientos, subsidencia, empantanamientos)
- Subsidencia, erosión y transporte de sedimentos
- Solifluxión consecuencia de los movimientos ascensionales del manto freático debidos a la sismicidad o a la respuesta a lluvias torrenciales
- Licuefacción de los materiales de relleno o de las vertientes

La sustentación adecuada y rigurosa de la presencia de fallas activas, capaces y potenciales en el área y su eventual efecto sobre la ingeniería de las estructuras hidráulicas tiene algunos puntos débiles que sería muy recomendable examinar:

1. Una línea orientada hacia: a) la modelación de los efectos del fallamiento sobre las estructuras y b) la evaluación del peligro de fallamiento en superficie desde una perspectiva regional, no aparecen en los documentos públicos.
2. Un estudio de peligrosidad sísmica de las presas y del canal no ha sido publicado y, de hecho, sería altamente recomendable ejecutarlo.

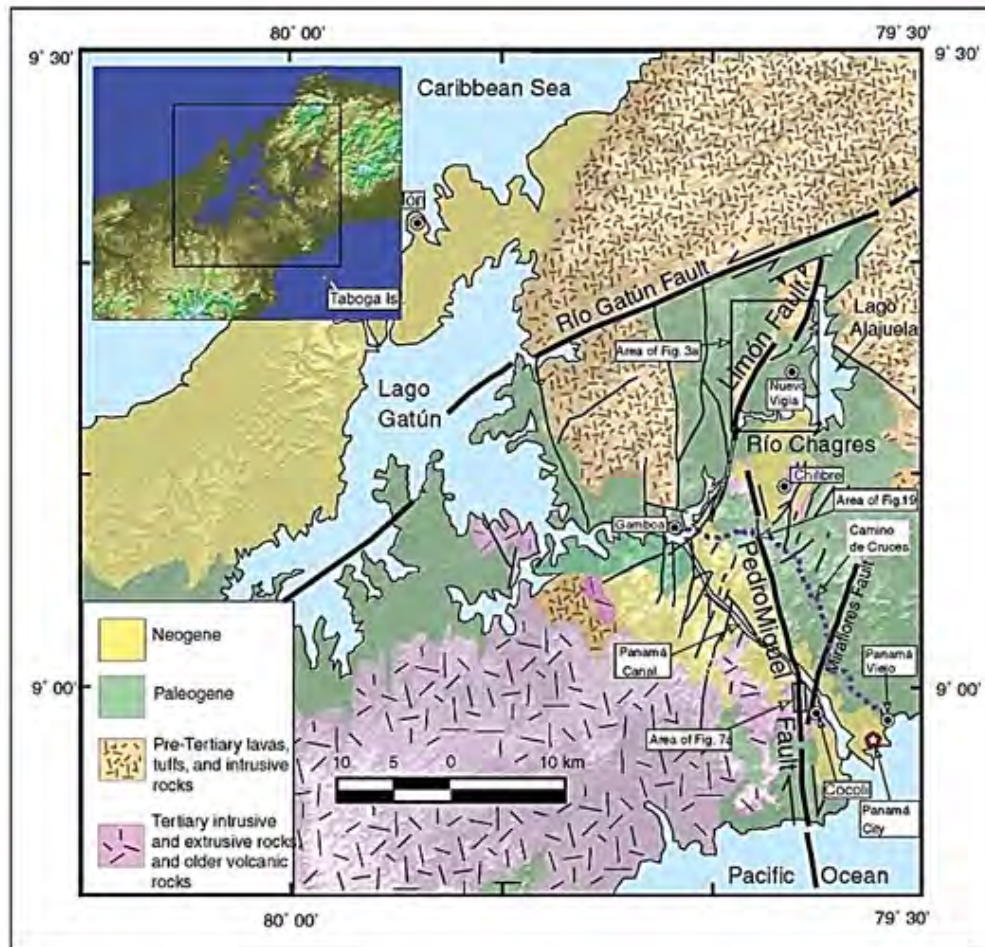


FIGURA 11. Mapa geológico generalizado de la Cuenca del Canal de Panamá mostrando las estructuras tectónicas principales

CONCLUSIONES

1. Panamá es una región de alta sismicidad generada por el movimiento de las Placas Cocos y Nazca que se mueve bajo el istmo lo largo de las zonas de subducción de los cinturones de Deformados Norte y Sur.
2. La concepción de estabilidad geológica que primó en los años de proyección inicial del Canal debe ser abandonada en virtud de las evidencias geológicas que muestran una actividad neotectónica fuerte y la evidencia del terremoto de mayo 2, 1621 no fue considerada en toda su importancia.
3. La ruptura de la placa que subduce en el Cinturón Deformado Norte puede generar un sismo de M 8 a 7 km del sitio de la Presa Gatún (M7,6 fue el terremoto de Limón, 22/04/1991)
4. Las fallas activas son capaces de provocar sismos de Magnitud 7. Sismos asociados a fallo de presas se

encuentran entre 7,5 y 7,7. el plumaje de estas estructuras son zonas importantes de debilidad estructural

5. La sustentación adecuada y rigurosa de la presencia de fallas activas, capaces y potenciales en el área y su eventual efecto sobre la ingeniería de las estructuras hidráulicas tiene algunos puntos débiles que sería muy recomendable examinar:
 - Una línea orientada hacia: a) la modelación de los efectos del fallamiento sobre las estructuras y b) la evaluación del peligro de fallamiento en superficie desde una perspectiva regional, no aparecen en los documentos públicos.
 - Un estudio de peligrosidad sísmica de las presas y del canal no ha sido publicado y, de hecho, sería altamente recomendable ejecutarlo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Sánchez, H. (2007): *Evaluación preliminar de las condiciones ingeniero-geológicas de un grupo de proyectos hidroeléctricos en la provincia de Chiriquí. (Proyectos: Río Cochea; Cochea 2; Caldera; Palmira; Los Ladrillos; Potrerillos)*. Electric Energy Panama, S.A., 113.
- Bisnett, Rachael V., Wonnice Kim, Donald J. Montgomery, (2016): *Panama Canal Borinquen dams and third set of locks operations and maintenance strategy*. United States Society on Dams USSD 2016 Annual Conference, 11.
- Colmenares L. and Zoback M. D. (2003): *Stress field and seismotectonics of northern South America*. Geology; August 2003; 318721–724 Geol. Soc. of America.
- De Membrillera M. G., I. Escuder, J. González, L. Altarejos (2015): Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management. Proc. 3rd International Forum on *Risk analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*, CRC Press, Taylor & Francis, Valencia, España, 395.
- Graindorge D.; Calahorrano A.; Charvis Ph.; Collot J.-Y. and Bethoux N. (2004): Deep structures of the Ecuador convergent margin and the Carnegie Ridge, possible consequence on great earthquakes recurrence interval. *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L04603, doi:10.1029/2003GL018803, 5.
- Mejia, L.H., M. De Puy (2018): *Seismic Stability Evaluation Of Gatun Dam*. ICOLD, XXIII Cong. L'Autriche, juillet 2018, 22.
- , L. D. Alfaro (2010) : The Dams of the Panama Canal Expansion. *GeoStrata*, Nov-Dec:34-39.
- Michaud F.; Witt C. and Royer J. Y. (2009): Influence of the subduction of the Carnegie volcanic ridge on Ecuadorian geology: Reality and fiction, in Kay, S.M., Ramos, V.A., and Dickinson, W.R., eds., *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. *Geological Society of America Memoir* 204.
- Molerio-León, L.F. (2016a): El terremoto del 16 de abril en Ecuador. *CubaGeográfica*, 3 – 2016:22.
- , (2016b): Comentarios al "Informe de la seguridad de varias presas del Ecuador tras el terremoto del 16/04/2016" (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente & Confederación Hidrográfica del Ebro). Archivo, Empresa Pública del Agua, Guayaquil, 5.
- , (2018a): Gestión de recursos hidráulicos bajo riesgo de terremotos en Ecuador: 1. Sismotectónica. *Ing. Hidráulica y Ambiental*, La Habana, Vol. XXXIX, 3, Sep-Dic.:3-17.
- , (2018b): Gestión de recursos hidráulicos bajo riesgo de terremotos en Ecuador: 2. Evaluación de seguridad. *Ing. Hidráulica y Ambiental*, La Habana. Vol. XXXIX, 3, Sep-Dic 2018, p. 18-27.
- , (2020a): Caves and Dam Safety. Improving Design with Evidences from Paleoseismology and Paleohydrology. *Research Gate*, 5: <https://www.researchgate.net/publication/341794335>
- , (2020b): Incorporación de la evidencia espeleológica de paleosismos y paleohidrología a la seguridad de los sistemas hidráulicos de América Latina y El Caribe. Premios Latinoamérica Verde. 31: <https://www.researchgate.net/publication/341726375>

- (2021a): *Paleosismología, neotectónica y seguridad del parque de presas de Panamá*. XXX Congreso Científico Nacional, octubre 4-8, 2021, Universidad de Panamá, 26.
- (2021b): El terremoto de Pedernales, Ecuador, del 16 de abril de 2016 y sus causas. *Cuba: Medio Ambiente y Desarrollo*, 21(40):7.
- Ortiz, O. C. (2013). *Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador*, Repositorio SENESCYT, Ecuador, 42.
- Rockwell, T., E. Gath, T. González, C. Madden, D. Verdugo, C. Lippincott, T. Dawson, L. A. Owen, M. Fuchs, A. Cadena, P. Williams, E. Weldon, P. Franceschi (2010): Neotectonics and Paleoseismology of the Limón and Pedro Miguel Faults in Panamá: Earthquake Hazard to the Panamá Canal. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 6, pp. –, December 2010, 34
- Sherrod, D.R., J. W. Vallance, A. Tapia Espinoza. J. P. McGeehin (2008): [Volcán Barú: Eruptive History and Volcano-Hazards Assessment](#). *U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1401*.
- USSD (2011): *Design of the dams of the Panama Canal expansion*. Proceedings of United States Society on Dams (USSD) 2011. Annual Meeting and Conference, San Diego, California, April.
- Wieland, M. (2010): Dam safety and earthquakes. *International Water Power and Dam Construction. Newsletter*. ISSN: 0306-4000, London, UK, 20 September 2010.
- Zoback, M.L. (1992). First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research*. ISSN:2156-2202, Virginia, USA, v. 97, p. 11,703–11,728.

Como citar:

Molerio-León, L.F. (2021): Problemas geológicos de la seguridad de las presas y embalses de Panamá: Cuenca del Canal (parte 1), *Geoinformativa*. 14 (2). 65-78

Licencia:

Este artículo está protegido bajo una licencia Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA) la cual permite compartir (copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato) y adaptar (remezclar, transformar y crear a partir del material), por lo que los autores, son libres de compartir su material en cualquier repositorio o sitio web.

