

EVALUACIÓN NUMÉRICA DEL OLAJE EN EMBALSES INDUCIDO POR LA ACCIÓN SÍSMICA

Marcelo A. Ceballos^{a,b}, Federico Pinto^{a,b}, Ricardo J. Rocca^a y Carlos A. Prato^a

^a*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba,
Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA, Córdoba, Argentina, www.portal.efn.uncor.edu*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ,
Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, www.conicet.gov.ar*

Palabras clave: oleaje en embalses, trenes de ondas sísmicas, deformaciones de laderas, espectros de respuesta.

Resumen. La evaluación numérica del oleaje inducido en embalses por el efecto de sismos constituye un aspecto potencialmente relevante en el diseño de aprovechamientos hidroeléctricos en zonas sísmicas, particularmente en aquellas regiones afectadas por sismos originados por mecanismos de subducción. El interés por la modelación numérica del oleaje inducido por sismos surge como consecuencia de la necesidad de usar sus resultados para complementar y contrastar la información que surge de observaciones empíricas, teniendo en cuenta que normalmente las estructuras son sensibles a frecuencias en el rango de 0 a 25 Hz, mientras que la altura del oleaje es sólo sensible a frecuencias inferiores a 0.1 Hz. En particular, el efecto del oleaje cuya máxima amplitud ocurre en bajas frecuencias produce tensiones y deformaciones casi estáticas en las estructuras cuya valoración no presenta dificultades particulares, sino que es necesario verificar que la ola no supere el nivel de las estructuras como criterio funcional de diseño.

En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo numérico lineal 2-D del oleaje generado en un embalse para estudiar la influencia que pueden tener los distintos tipos de trenes de ondas sísmicas en la formación de olas que controlan el diseño de las obras. Los resultados del modelo ilustran la influencia de la variación de los parámetros que describen la acción sísmica, como así también de la conformación del ambiente sísmico que se considere para evaluar la seguridad del proyecto frente a este tipo de eventos.

En forma complementaria, el mismo modelo numérico es utilizado para estimar el oleaje que pueden generar eventos denominados “co-sísmicos” consistentes en deformaciones del contorno del embalse como resultado de la acción sísmica pero que no están relacionados directamente con el contenido de frecuencias o la conformación del tren de ondas producidos por el sismo.

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo a las recomendaciones internacionales, en la verificación del proyecto de una presa deben considerarse un conjunto de fenómenos relacionados directa o colateralmente con la acción sísmica (estos últimos denominados “co-sísmicos”). Por un lado, se tiene el efecto directo del movimiento impuesto por las ondas sísmicas a través del contorno del embalse, y por otro lado, el debido a potenciales desplazamientos de masas de roca/suelo que provoca el sismo, o a desplazamientos permanentes en el fondo y contorno del embalse. El factor común para estos procesos es la generación de oleajes cuya amplitud y contenido de frecuencias son muy diferentes, dado que responden a procesos esencialmente diferentes.

El oleaje directo generado por el sismo responde a un proceso cuya fuente de excitación es el mismo tren de ondas sísmicas que se transmiten a través del fondo y las laderas del embalse. La intensidad y el contenido de frecuencias de las ondas sísmicas en la roca se definen mediante un estudio de riesgo sísmico del sitio de emplazamiento. Estas ondas se representan a través de acelerogramas y espectros del movimiento de los afloramientos rocosos en el sitio. El fondo y las laderas del embalse actúan como filtros mecánicos de las ondas sísmicas que se transmiten a través de la roca de base, modificando las amplitudes y las frecuencias del movimiento que en definitiva se transmite al embalse. Este efecto directo está controlado exclusivamente por las amplitudes y las frecuencias de las oscilaciones generadas por el sismo que pueden dar origen a efectos de amplificación y resonancia en el embalse. A pesar de que el análisis numérico lineal del comportamiento del embalse aquí considerado no presenta requerimientos o dificultades especiales para los modelos numéricos, llamó la atención a los autores la carencia de antecedentes de estudios de este tipo en la ingeniería de proyecto de presas en zonas sísmicas, ya que el interés parece centrarse en estudios empíricos de casos aislados en los que no se establece una relación detallada con las acciones sísmicas adoptadas para el diseño de las obras.

Por otro lado, los desplazamientos de masas de roca/suelo inducidos por el sismo en adyacencias del embalse también pueden producir oleajes importantes. La amplitud y el contenido de frecuencias del oleaje que pueden generar estos movimientos de masa sólida en el contorno o dentro del embalse, ya sea en las laderas y/o en el fondo, depende de una gran variedad de condiciones relacionadas con la movilización y ruptura de los sedimentos y/o roca circundante. Mediante el planteo de hipótesis adecuadas a través de las condiciones de borde definidas en el contorno del embalse, este tipo de fenómenos es también tratable con el mismo modelo numérico para diferentes esquemas o mecanismos de deformación previsible.

2 ANTECEDENTES SOBRE OLEAJE EN EMBALSES

Los sismos producen sobre los cuerpos de agua distintos fenómenos ondulatorios, siendo la posibilidad de *overtopping* (desbordamiento sobre el coronamiento) el efecto más peligroso de los fenómenos hidrodinámicos que pueden presentarse para las presas, especialmente en aquellas de materiales sueltos (escollera, o genéricamente de tierra).

El *overtopping* puede producirse por la combinación de grandes olas junto a una reducción en la altura de la presa por compactación y deslizamiento a lo largo de superficies de falla. Estas olas pueden originarse directamente debido a oscilaciones de la cuenca transmitidas al embalse, como resultado de la inclinación del fondo del embalse, o por una falla de talud en cualquier lugar del embalse.

El manual de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 1986) que trata sobre el análisis sísmico de presas describe varios fenómenos que expresamente deben ser tenidos en cuenta en el proyecto de un embalse:

- a) movimientos diferenciales grandes que pueden ocurrir en el caso de que una falla activa atraviese la fundación de la presa (estas fallas no deberían existir).
- b) *overtopping* por olas causadas por movimientos tectónicos en la cuenca del embalse.
- c) *overtopping* por olas debidas a deslizamientos producidos por terremotos en el embalse.

La experiencia en la observación del comportamiento de las aguas en lagos indica que existen diferentes tipos de fenómenos que dependen de la proximidad de la fuente sísmica (distancia epicentral). Un ejemplo de estudios de este tipo lo constituye el informe sobre lagos neozelandeses de [Clark et al. \(2015\)](#).

El movimiento provocado por sismos cercanos al emplazamiento presenta tanto períodos relativamente cortos (es decir, frecuencias altas) en la zona epicentral, como desplazamientos casi-estáticos permanentes, mientras que los sismos lejanos con gran liberación de energía (magnitudes mayores a 7) provocan ondas que al amortiguarse con la distancia producen oscilaciones de períodos y longitudes de onda largos pero sin desplazamientos permanentes. La coincidencia de los períodos dominantes del sismo con los períodos naturales del embalse puede producir la generación de olas estacionarias en resonancia (*seiches*) con potencialidad de llegar a varios metros de altura.

Otra causa de generación de olas es la debida a deslizamientos o caídas de bloques en el peligro provocados por los sismos. Estas olas pueden alcanzar gran altura, en función del volumen que se deslice y la velocidad con la que ocurra el fenómeno. Por ejemplo, en la presa de Vajont (Italia) la ola alcanzó 245 m ([Wikipedia, 2016a](#)), mientras que en la bahía de Lituya (Alaska, EE.UU.) alcanzó 60 m de altura ([Wikipedia, 2016b](#)).

Si bien el tratamiento numérico del problema no presenta desafíos particulares, el hecho de no haber podido referenciar otros estudios como el aquí realizado motivó a los autores a su presentación en este ámbito.

2.1 Breve reseña de antecedentes empíricos

Una subsidencia e inclinación del reservorio conjuntamente con la producción de *seiches* causaron *overtopping* de varios metros de altura en la presa Hebgen (Montana) que produjo daños menores en 1959 ([Newmark and Rosenblueth, 1971](#)). Un sismo de magnitud $M = 7.5$ ocurrió en una falla situada a 300 metros de la presa, lo cual produjo un escalón superficial de 3 metros que afectó a la totalidad del reservorio. La presa que era de enrocado con núcleo de hormigón tenía un resguardo de 2 metros, y el lago se encontraba en su cota máxima. El sismo provocó asentamientos promedio en ambos espaldones del orden de 1.3 metros. El núcleo de hormigón se mantuvo, aunque sufriendo agrietamientos. Después del sismo, la masa de agua generó una ola de alrededor de 1 metro de altura que sobrepasó la presa durante diez minutos. Cuando el agua se retiró, el oleaje viajó hasta el otro extremo del lago para volver a los diez minutos. En total se produjeron cuatro oleadas sobre la presa.

Otros ejemplos del oleaje generado por sismos cercanos son los siguientes:

- a) [Schnellmann et al. \(2005\)](#) describen eventos históricos y prehistóricos combinando datos geofísicos y sedimentológicos en el Lago de Lucerna (Suiza).
- b) [Nakajima y Kanai \(2000\)](#) reportan sismo-turbiditas originadas por el sismo de 1893 y por sismos anteriores en una cuenca semicerrada próxima al mar del Japón.
- c) [Smoot et al. \(2000\)](#) describen el tsunami en el Lago Owens al sudeste de California que se produjo debido al sismo de 1872.
- d) [Plafker y Eyzaguirre \(1979\)](#) reportan el tsunami ocurrido en 1971 en el lago Yanahuin (Perú) inducido por efecto de un deslizamiento.
- e) Algunos tsunamis históricos en lagos de Nicaragua ([Freundt et al., 2007](#)) se asocian a erupciones e inestabilidad de los edificios volcánicos.

Las olas originadas por sismos lejanos pueden asimilarse a las que se observarían en una bandeja de agua que se inclina en forma lenta y oscilante. Ejemplos donde ha sido registrados estos fenómenos de origen sísmico son numerosos:

- a) En 1775 ocurrió un terremoto en el Océano Atlántico que causó un maremoto en Lisboa. La totalidad de los lagos de Europa situados al oeste de una línea imaginaria que une el Mar Báltico con el Mar Adriático registraron las oscilaciones producidas.
- b) El sismo Argentino de 1894 con magnitud $M = 8$ generó olas apreciables en las piletas de la planta purificadora de agua de la Ciudad de Buenos Aires.
- c) En 1960 ocurrió en el sur de Chile el sismo más importante del siglo ($M = 9.6$). Los lagos chilenos registraron seiches de hasta 1 metro de altura, y el lago Nahuel Huapi presentó olas del orden de 3 metros que causaron daños en muelles y embarcaciones.
- d) En 1989 ocurrió un sismo en el norte de California que provocó el desborde de varias piscinas en el sur de este estado.

2.2 Tsumani en el lago Nahuel Huapi (Bariloche, 1960)

Un caso de particular importancia es el tsumani ocurrido en el lago Nahuel Huapi en mayo de 1960 como respuesta al sismo de Valdivia de magnitud $M = 9.6$, cuya ola ha sido descripta por habitantes de Bariloche a través de varias crónicas y fotografías del evento. El trabajo de [Villarosa et al. \(2009\)](#) se refiere a este tsunami en el que grandes olas destruyeron el antiguo muelle frente al Centro Cívico, el hundimiento de un puñado de embarcaciones menores y la pérdida de dos vidas humanas. La [Figura 1](#) ilustra la inundación producida por la ola en el Centro Cívico, mientras que la [Figura 2](#) muestra los restos del embarcadero de Bariloche después del evento.



Figura 1: Imagen del oleaje en el Centro Cívico de Bariloche



Figura 2: Restos del embarcadero de Bariloche luego del oleaje

3 MODELACIÓN NUMÉRICA DEL OLEAJE

El desarrollo de modelos numéricos planos (2D) para un embalse proyectado sobre el Río Santa Cruz permitió el cálculo de la amplitud de olas generadas por los siguientes efectos:

- Ondas sísmicas transmitidas a través del fondo y las laderas del embalse según datos extraídos del estudio de riesgo sísmico.
- Desplazamientos en masa de formas simples similares a las citadas en la bibliografía. Se consideran distintas formas y dimensiones de las masas movilizadas para el cálculo del oleaje que puede generarse en caso de producirse los desplazamientos postulados.

El campo de presiones asociado a las olas gravitatorias se representa utilizando un modelo acústico basado en la siguiente ecuación diferencial (Virella et al., 2008):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

donde p es la presión en el agua, mientras que x e y representan las coordenadas horizontal y vertical, respectivamente, del modelo plano de un fluido incompresible y no viscoso que se resuelve mediante la técnica de diferencias finitas.

La condición de borde en la superficie libre, que corresponde a la teoría lineal de olas gravitatorias, es que la presión en un punto de la superficie libre del fluido en posición inicial de reposo (sin olas) es igual al producto del peso específico del agua por el desplazamiento vertical u_y debido a la ola en ese punto:

$$p = g \rho u_y \quad (2)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y ρ es la densidad del agua. De esta forma, el desplazamiento vertical u_y respecto al nivel medio de la superficie (amplitud de la ola) y la aceleración vertical asociada \ddot{u}_y pueden expresarse en función de la presión como:

$$u_y = \frac{p}{g \rho} \quad \ddot{u}_y = \frac{1}{g \rho} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3)$$

La condición de borde en todo el contorno es:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_n \quad (4)$$

donde n representa la dirección normal al borde y \ddot{u}_n es la componente de la aceleración en esa dirección impuesta por el sismo. En la superficie, esta última expresión adopta la forma:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (5)$$

La condición de borde linealizada implica que el agua se mueve en dirección vertical en ambos extremos de la superficie, dado que las paredes laterales se consideran verticales a partir de la superficie libre del embalse. De esta forma, las olas que arriban a los bordes de los modelos poseen una contribución tanto de la onda incidente como de la onda reflejada. Esto implica que si la superficie del embalse se encuentra en contacto con un muro de parapeto vertical antes del comienzo de la excitación, la amplitud de la ola calculada con el modelo ya incluye el efecto de la reflexión de ondas incidentes.

3.1 Modelo numérico

Las formas de los modelos analizados se obtienen a través de cortes con planos verticales en zonas consideradas como representativas del embalse. Los dos modelos usados son:

- Modelo paralelo: paralelo y contiguo a la presa con sección rectangular.
- Modelo perpendicular: se define a través de un plano vertical perpendicular al eje de la presa que pasa por su punto medio.

La [Figura 3](#) muestra en línea de trazos la geometría real del embalse, y en línea continua la geometría adoptada para los cálculos. El modelo paralelo posee 1500 m de ancho y 52.5 m de profundidad, y se discretiza con nudos separados cada 2.5 m tanto en dirección vertical como horizontal, lo cual genera una malla de 13222 nudos. El modelo perpendicular posee 7200 m de ancho y 52.5 m de profundidad, y se discretiza con una separación de nudos de 3.5 m en dirección vertical y 9.0 m en dirección horizontal, lo cual genera una malla de 12816 nudos.

La [Tabla 1](#) muestra las frecuencias naturales de los 10 primeros modos de ambos modelos, mientras que la [Figura 4](#) muestra las formas modales de los 4 primeros modos. Estas formas modales se discretizan con 601 y 801 nudos sobre la superficie para los modelos paralelo y perpendicular, respectivamente. En el caso de embalses con sección rectangular, la frecuencia natural del modo n se calcula en forma exacta a través de la siguiente expresión:

$$f_n = \sqrt{n \frac{g}{4\pi L} \tanh\left(n \frac{\pi H}{L}\right)} \quad (6)$$

Esta ecuación permite verificar la validez de los modelos utilizados. Debido a efectos de discretización, las frecuencias más altas son las más imprecisas, y aún así las frecuencias del modo 10 poseen errores menores a 0.001%. Una fórmula aproximada ampliamente difundida en la literatura, y que proporciona buenos resultados para cuando $H \ll L$ es la siguiente:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{gH} \quad (7)$$

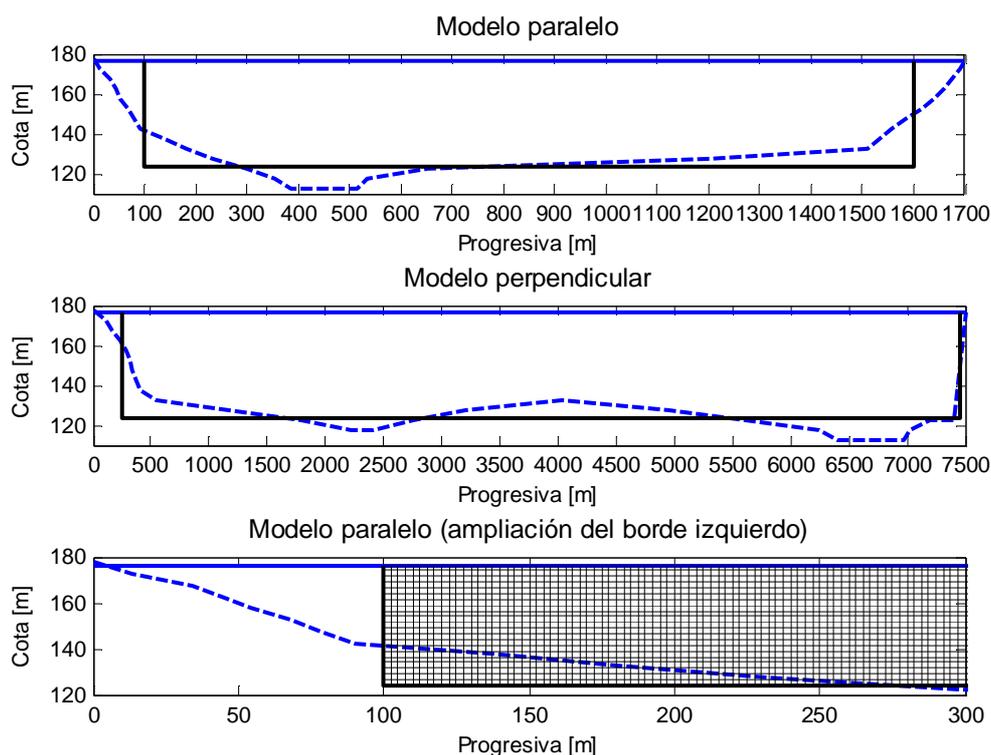


Figura 3: Geometría de los modelos del embalse de la presa

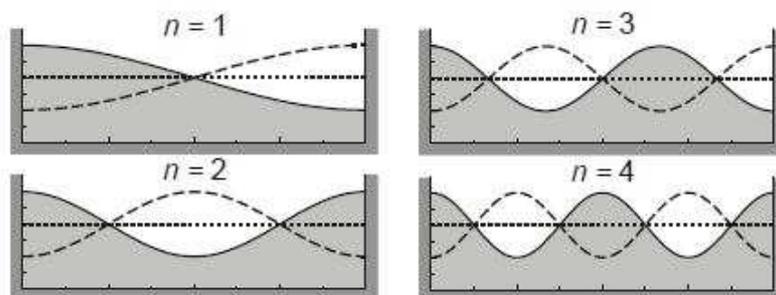


Figura 4: Formas modales de un embalse rectangular

Tabla 1. Frecuencias naturales del embalse [Hz]

Modo	Modelo paralelo L = 1500 m H = 52.50 m	Modelo perpendicular L = 7200 m H = 52.50 m
1	0.00755	0.00158
2	0.01501	0.00315
3	0.02229	0.00472
4	0.02934	0.00629
5	0.03608	0.00786
6	0.04248	0.00942
7	0.04853	0.01098
8	0.05422	0.01254
9	0.05955	0.01408
10	0.06453	0.01562

De acuerdo a los valores de la [Tabla 1](#), los periodos naturales de los modos fundamentales resultan de 132 s y 633 s, respectivamente, para cada uno de los modelos. El contenido de frecuencias típico de un sismo se encuentra en el intervalo de 0.2 a 25 Hz, mientras que los períodos naturales de los 10 primeros modos del embalse paralelo se encuentran en el intervalo de 0.0075 a 0.065 Hz, es decir que son frecuencias inferiores a las dominantes de los sismos, hecho que permite explicar las bajas amplitudes de las olas resultantes con los acelerogramas basados solamente en el estudio de riesgo sísmico. La influencia de posibles componentes de baja frecuencia ausentes en los acelerogramas originales se considera en un análisis posterior donde se agregan a estos acelerogramas ciertas funciones adicionales de baja frecuencia que no afectan los espectros de respuesta usados para la definición de las acciones sísmicas.

3.2 Definición de las acciones sísmicas

Los acelerogramas para el cálculo de la respuesta sísmica del embalse se obtienen en base a espectros definidos en el estudio de riesgo sísmico. Las propiedades del perfil de suelo de la presa se extraen de los estudios geológicos y geotécnicos. Para tener en cuenta la variabilidad de estas propiedades, y de acuerdo con lo recomendado por las normas para obras de estas características, se consideran 2 perfiles de suelo adicionales donde los módulos de elasticidad se dividen y multiplican por 1.5, respectivamente, para obtener un perfil “flexibilizado” y otro “rigidizado”. De esta forma, los acelerogramas definidos para afloramiento de roca han sido deconvolucionados utilizando perfiles con diferentes propiedades de rigidez para analizar su posible influencia sobre la amplitud alcanzada por las olas producidas en los embalses.

La [Tabla 2](#) presenta las propiedades del perfil de suelo nominal adoptadas para el sitio de emplazamiento de la presa. La [Tabla 3](#) muestra valores máximos de aceleración (PGA) de las distintas componentes de los acelerogramas obtenidos por deconvolución, para cada sismo y perfil de suelo. Los acelerogramas horizontales no se asocian a una dirección determinada, por lo que ambos se aplican en forma separada en los diferentes modelos del embalse.

Tabla 2. Propiedades originales del perfil de suelo nominal en la zona de la presa

Estrato	Tipo	Espesor [m]	Profundidad [m]	Presión total [KPa]	Módulo de corte [MPa]	Amortiguamiento	Peso específico [KN/m ³]	Vel. ondas corte [m/s]
1	1	5.00	2.50	50.0	183.5	0.010	20.00	300
2	1	5.00	7.50	150.0	196.0	0.010	20.00	310
3	1	5.00	12.50	250.0	228.9	0.010	20.00	335
4	1	5.00	17.50	352.5	293.1	0.010	21.00	370
5	1	5.00	22.50	457.5	342.6	0.010	21.00	400
6	1	5.00	27.50	562.5	514.1	0.010	21.00	490
7	2	5.00	32.50	670.0	2473.2	0.010	22.00	1050
8	2	5.00	37.50	780.0	2473.2	0.010	22.00	1050
9	2	5.00	42.50	890.0	2473.2	0.010	22.00	1050
10	2	5.00	47.50	1000.0	2473.2	0.010	22.00	1050
11	Semiesp.	—	—	—	5047.4	0.010	22.00	1500

Tabla 3. Valores PGA de los acelerogramas utilizados para la presa [g]

Sismo	Perfil de suelo	Dirección		
		H ₁	H ₂	V
Iwate	Nominal	0.438	0.460	0.667
	Flexibilizado	0.331	0.365	0.714
	Rigidizado	0.589	0.545	0.642
Loma Prieta	Nominal	0.532	0.448	0.744
	Flexibilizado	0.488	0.365	0.681
	Rigidizado	0.609	0.448	0.776
Northridge	Nominal	0.419	0.499	0.701
	Flexibilizado	0.374	0.436	0.718
	Rigidizado	0.448	0.443	0.716

3.3 Oleajes producidos por acciones sísmicas directas

Los escenarios sísmicos considerados para calcular la amplitud máxima del oleaje son:

- I. Ambas componentes horizontales de cada sismo y cada perfil de suelo se aplican por separado en los bordes verticales del embalse en forma sincrónica. Por otra parte, la componente vertical de cada sismo y cada perfil de suelo se aplica sincrónicamente en el fondo del embalse (borde inferior).
- II. Se utilizan ondas superficiales propagándose en dirección horizontal con velocidades de 250 m/s, 500 m/s y 1000 m/s. Se emplean las componentes horizontales de cada sismo, y se reemplazan las componentes verticales por otras consistentes con ondas de Rayleigh adoptando el perfil de suelo nominal. Asumiendo un coeficiente de Poisson $\nu = 0.25$, la componente vertical posee una amplitud 1.468 veces mayor a la horizontal correspondiente, y un desfase de 90° para cada componente de frecuencia. Ambas componentes se aplican simultáneamente y desfasadas en los distintos puntos de los bordes en función de la correspondiente velocidad de propagación.

Las amplitudes de las olas resultan insensibles tanto a la flexibilización o rigidización del perfil de suelo como a la velocidad de propagación de ondas de Rayleigh para el escenario II, por lo que solamente se presentan los resultados considerando el perfil de suelo nominal y una única velocidad de propagación de ondas de 500 m/s. A modo de ejemplo, la [Figura 5](#) muestra la variación en el tiempo de las olas en uno de los extremos del embalse del modelo paralelo.

Las amplitudes máximas de olas en las tablas descriptas a continuación se definen respecto a la superficie del embalse en reposo, y se obtienen como el valor absoluto de amplitudes que toman valores positivos y negativos. Esto se justifica por el hecho de que los acelerogramas pueden cambiar de signo representando el mismo espectro de diseño, y lo que en un caso resulta un valle (depresión de la superficie) puede transformarse en un pico (u ola).

La [Tabla 4](#) muestra las amplitudes máximas de olas para el modelo paralelo, donde el valor máximo de cada escenario se resalta en negrita. Se observa que las olas para el escenario I no superan 0.30 m de amplitud, mientras que para el escenario II apenas superan 0.40 m. La [Tabla 5](#) muestra las amplitudes máximas de olas para el modelo perpendicular. Las olas para el escenario I no superan 0.25 m, y para el escenario II apenas superan 0.35 m.

Un análisis análogo realizado para un embalse proyectado unos 50 km aguas abajo sobre el Río Santa Cruz, y que se encuentra más alejado de posibles epicentros de los sismos, muestra que las amplitudes máximas de las olas son similares. Esto se atribuye a que este fenómeno es controlado por las componentes de baja frecuencia de los sismos que se propagan a grandes distancias dado que se atenúan más lentamente que las componentes de alta frecuencia.

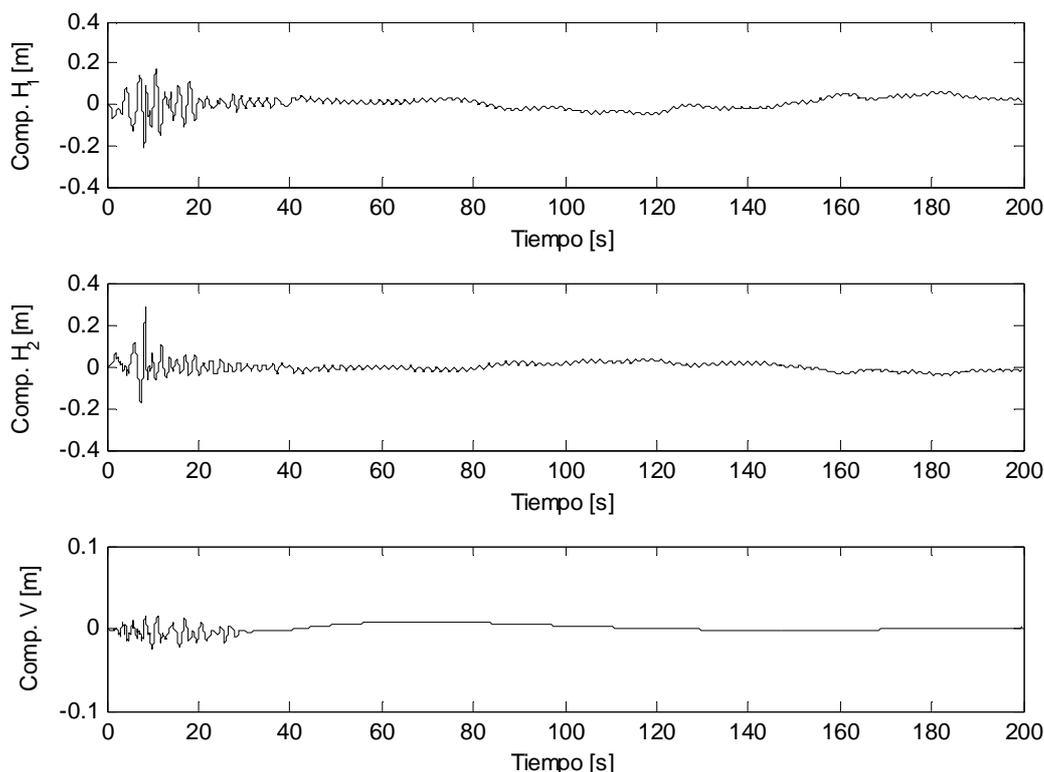


Figura 5: Modelo paralelo – Escenario I – Sismo Northridge

Tabla 4. Amplitud máxima de olas por excitación sísmica para el modelo paralelo [m]

Sismo	Escenario I			Escenario II	
	H ₁	H ₂	V	H ₁ – V ₁	H ₂ – V ₂
Iwate	0.239	0.231	0.043	0.338	0.311
Loma Prieta	0.190	0.215	0.029	0.258	0.271
Northridge	0.207	0.272	0.021	0.368	0.414

Tabla 5. Amplitud máxima de olas por excitación sísmica para el modelo perpendicular [m]

Sismo	Escenario I			Escenario II	
	H ₁	H ₂	V	H ₁ – V ₁	H ₂ – V ₂
Iwate	0.172	0.225	0.043	0.263	0.312
Loma Prieta	0.180	0.201	0.029	0.215	0.262
Northridge	0.155	0.177	0.021	0.332	0.303

La importancia de las componentes de baja frecuencia se debe a que son las que excitan a los primeros modos de vibración de estos embalses cuyas frecuencias naturales se encuentran entre 10^{-4} a 10^{-1} Hz. Estas frecuencias naturales tan bajas de los embalses no se presentan en otros tipos de estructuras, por lo que generalmente no son consideradas en estudios sísmicos. Por otra parte, el registro de aceleraciones sísmicas en estos rangos de frecuencias presenta dificultades experimentales por las bajas amplitudes asociadas.

A los efectos de realizar un estudio de sensibilidad de los posibles efectos sobre el oleaje de componentes de baja frecuencia, en la siguiente sección se propone un procedimiento para generar componentes sísmicas artificiales que cumplen con la condición de que su agregado a las componentes de los sismos seleccionados no distorsionan los espectros de respuesta en los rangos de frecuencia que se utilizan habitualmente en la verificación estructural.

3.4 Oleajes producidos por componentes sísmicas de baja frecuencia

La definición de las demandas sísmicas para bajas frecuencias está basada en el espectro envolvente del estudio de riesgo sísmico que se muestra en la [Figura 6](#) para un periodo de recurrencia de 9950 años. Para el rango de períodos altos, $T > T_L$, donde T_L es un período de “transición”, la envolvente de pseudoaceleraciones varía en forma inversamente proporcional al cuadrado del período T . Esta variación de las pseudoaceleraciones para $T > T_L$ se relaciona a un desplazamiento espectral constante e igual al máximo desplazamiento asignado al sismo. Este período de transición T_L varía en Argentina según el INPRES-ORSEP entre 3 a 13 seg, estando los mayores valores asociados a zonas de mayor intensidad sísmica. Siguiendo estos lineamientos, y observando el ajuste de los espectros envolventes en relación a los espectros de riesgo uniforme desarrollados por el estudio de riesgo sísmico, se toma un valor $T_L = 4$ s para el sitio de emplazamiento de las presas. Sin embargo, en función de las incertidumbres asociadas a este valor, y considerando los posibles rangos en Argentina, también se considera como probable un valor de $T_L = 13$ s.

Los espectros de pseudoaceleración y desplazamientos para las distintas suposiciones del período de transición se muestran en la [Figura 7](#), donde puede verse que el valor de T_L afecta sensiblemente a las demandas resultantes para períodos largos. La máxima pseudoaceleración espectral para $T = 15$ s resulta de 0.46 % de g para $T_L = 4$ s, y de 1.49 % de g para $T_L = 13$ s. El máximo desplazamiento resulta de 25.6 cm para $T_L = 4$ s, y de 83.2 cm para $T_L = 13$ s.

Dado que los registros sísmicos instrumentales disponibles en la literatura ya han sido filtrados de sus componentes de muy baja frecuencia, y que esa característica no afecta la respuesta de las estructuras de obras civiles, para estimar el oleaje generado en embalses se torna necesario compensar esa pérdida agregando a los acelerogramas originales funciones armónicas con frecuencias idénticas a las de los modos naturales del embalse cuyos períodos superan los 15 segundos. Las amplitudes definidas para estas funciones complementarias son adoptadas en consistencia con los espectros de respuesta descritos en la sección anterior para las demandas sísmicas de registros instrumentales. El procedimiento aproximado propuesto encuentra justificación en la dificultad de contar con registros sísmicos reales que tengan la capacidad de reproducir fielmente las componentes de baja frecuencia debido a limitaciones de los equipos de adquisición y al filtrado de los registros disponibles por características propias de los instrumentos, a lo que debe agregarse la corrección de la línea de base de los acelerogramas ya incorporada a los registros disponibles en las bases de datos sísmicos. El objetivo perseguido con esta modificación de los registros sísmicos es evaluar la influencia que estas componentes del movimiento sísmico podrían tener sobre la amplitud máxima del oleaje. Las componentes agregadas fueron definidas según el siguiente criterio:

- Cada función armónica agregada posee una frecuencia excitatriz coincidente con la frecuencia natural de cada uno de los modos con periodo mayor a 15 s para cada modelo analizado. De esta forma, para los modelos paralelo y perpendicular se agregan 10 y 50 funciones, respectivamente.
- La amplitud máxima de estas funciones es la misma para todos los modos y se expresa en términos de desplazamientos. El criterio utilizado para definir el valor de esta amplitud es que los espectros de respuesta (pseudo aceleración) para las componentes horizontales con el agregado de estas funciones posean amplitudes menores a 0.01 g para periodos mayores a 15 s. La [Figura 8](#) muestra los cambios producidos en el espectro de respuesta promedio para el modelo paralelo por el agregado de componentes de baja frecuencia con diferentes amplitudes. Este espectro no presentan cambios apreciables para periodos menores a 5 s respecto al espectro original, y para periodos mayores a 15 s, la amplitud más representativa (línea de trazos y puntos

verdes) produce un espectro de respuesta en una zona intermedia entre los espectros correspondientes a los periodos de transición $T_L = 4$ s y $T_L = 13$ s.

- Las funciones agregadas poseen una duración total de 300 segundos (5 minutos), y se han modulado con una ventana de Hanning que suaviza su amplitud a comienzos y al final del acelerograma.

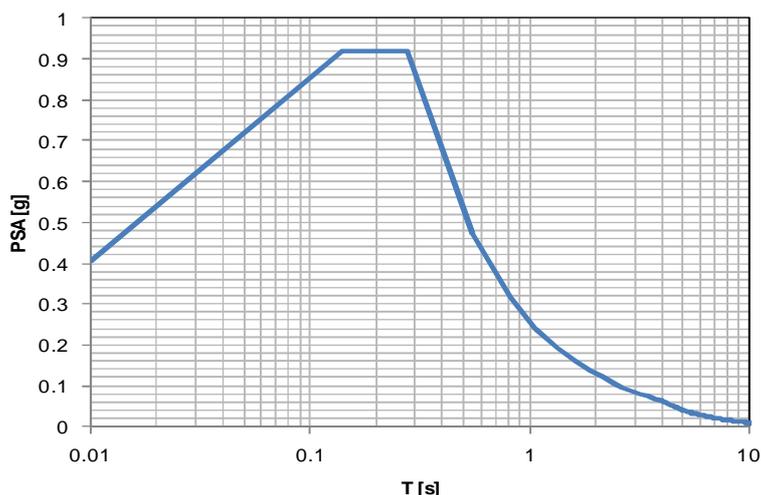


Figura 6: Espectro envolvente resultante del estudio de riesgo sísmico para una recurrencia de 9950 años

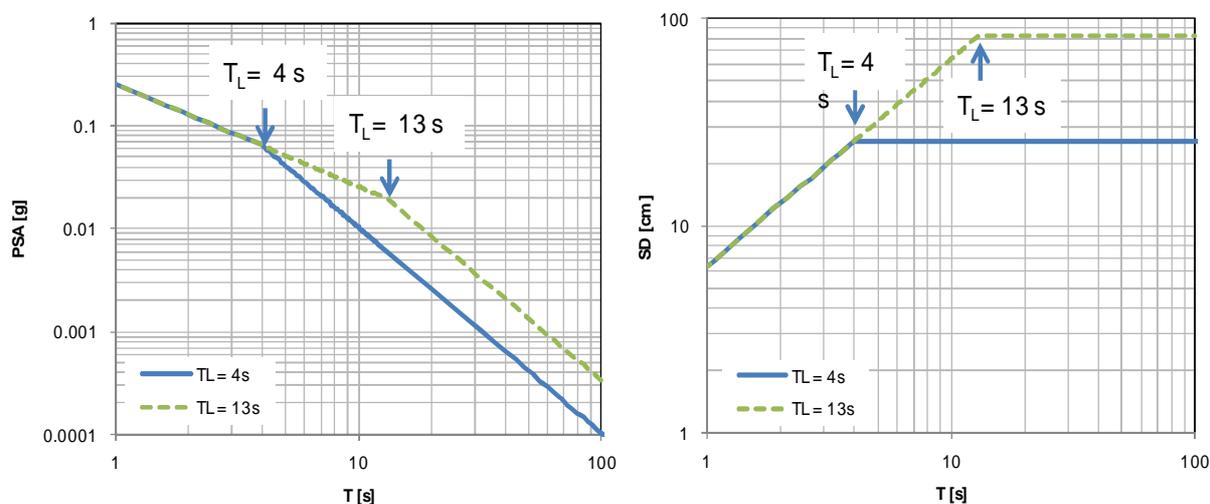


Figura 7: Espectros envolventes de pseudoaceleración y desplazamiento para 9950 años

Las funciones agregadas adoptan en términos de desplazamientos la siguiente forma:

$$u_n(t) = \sum_{m=1}^M A \sin(2\pi(f_m t + \theta)) \sin(\pi t/300)^2 \quad (8)$$

donde:

- A amplitud máxima para todas las funciones agregadas de un mismo modelo [m]
- M número de modos con periodos naturales mayores a 15 segundos para cada modelo
- f_m frecuencia natural del modo "m" del modelo del embalse [Hz]
- θ fase aleatoria normalizada de las funciones armónicas ($0 \leq \theta \leq 1$)

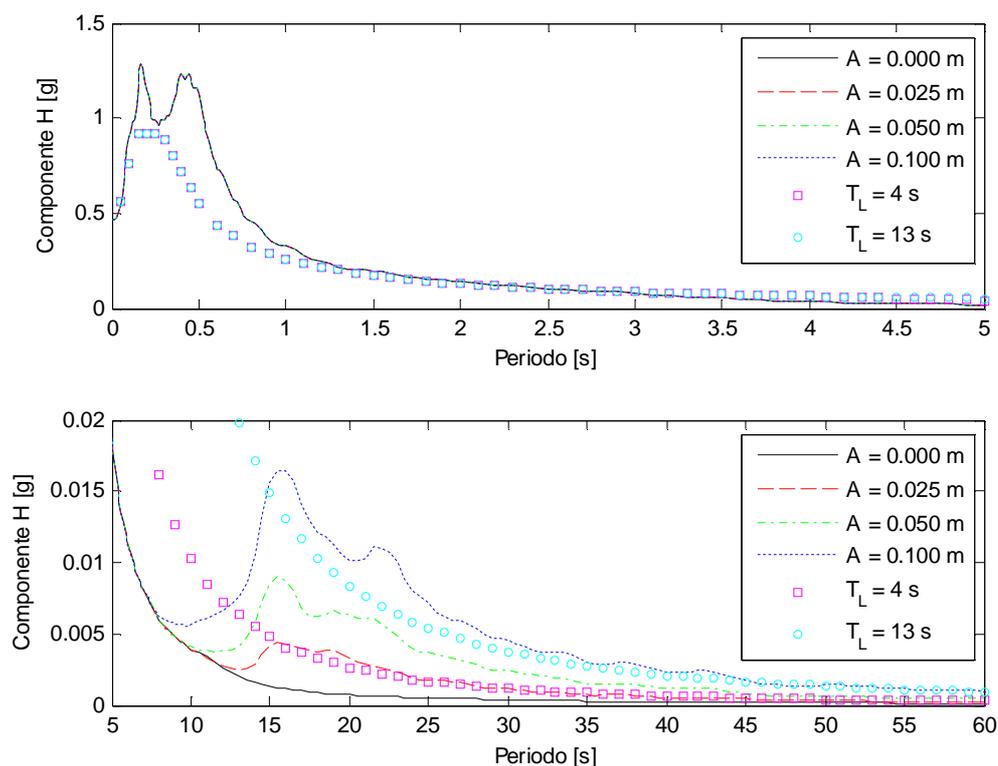


Figura 8: Espectro de respuesta promedio con el agregado de componentes de baja frecuencia para el modelo paralelo

A modo de ejemplo, la [Figura 9](#) muestra la forma de las funciones agregadas en términos de aceleraciones, asociadas a los modos 1 y 4 del modelo paralelo. Estas aceleraciones se obtienen derivando 2 veces la expresión en (8) respecto al tiempo. Una vez agregadas estas funciones de baja frecuencia, se repiten los cálculos de las amplitudes de los oleajes para el escenario II de acciones sísmicas definido en la sección 3.3.

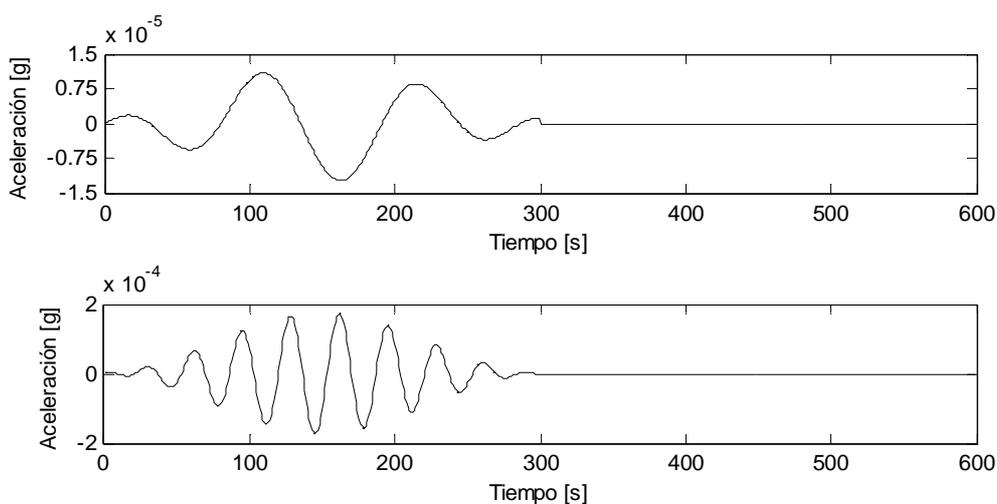


Figura 9: Funciones agregadas con desplazamientos máximos de 0.05 m, modos 1 y 4 del modelo paralelo

La amplitud de olas obtenidas con componentes artificiales de baja frecuencia de 0.05 m de amplitud para el modelo paralelo se muestran en la [Tabla 6](#), con un valor máximo que alcanza 1.22 m. Estos son los resultados más conservadores que se obtienen realizando varias corridas para diferentes fases aleatorias de las funciones sumadas a los acelerogramas originales. Dado que las amplitudes de las funciones agregadas se definen en forma tentativa, también se analiza lo que sucede si la amplitud de estas funciones fuese de 0.10 m, valor que según la [Figura 8](#) corresponde a un periodo de transición $T_L = 13$ s. En este caso, la amplitud máxima de las olas alcanza 2.26 m, es decir que varía aproximadamente en forma lineal con la amplitud de las funciones agregadas. La [Tabla 6](#) también muestra las amplitudes máximas de las olas para el modelo perpendicular, con un valor máximo de 0.71 m.

La [Tabla 7](#) presenta las amplitudes máximas de olas que produce cada función individual para el modelo paralelo. La suma aritmética arroja un valor de 1.151 m, que sumado a la amplitud de 0.338 m de la [Tabla 4](#) para el acelerograma original produce una cota superior de 1.49 m. El valor de 1.22 m de la [Tabla 6](#) representa un 82% de esta cota superior, que no se alcanza dado que los valores máximos para cada función agregada no coinciden en el tiempo.

Tabla 6. Amplitud máxima de olas con componentes de baja frecuencia [m]

Sismo	Modelo paralelo		Modelo perpendicular	
	$H_1 - V_1$	$H_2 - V_2$	$H_1 - V_1$	$H_2 - V_2$
Iwate	1.22	1.07	0.60	0.55
Loma Prieta	1.09	1.13	0.53	0.50
Northridge	1.03	1.18	0.55	0.71

Tabla 7. Amplitud máxima de olas para cada componente de baja frecuencia – Modelo paralelo [m]

Modo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amp. [m]	0.075	0.084	0.111	0.088	0.165	0.090	0.090	0.124	0.147	0.177

La [Figura 10](#) muestra la evolución de la amplitud de las olas en 3 puntos sobre la superficie del embalse en el caso que resultó más desfavorable para el modelo paralelo (sismo de Iwate en dirección $H_1 - V_1$). Se observa que la excitación sísmica genera un cierto número de ondas en las que algunas son notoriamente más altas que el resto. En general, pueden llegar a surgir varios ciclos de similar amplitud aunque en un número bastante acotado (por ejemplo, entre 4 y 8 ciclos). Dado que las componentes agregadas de baja frecuencia en los casos analizados son dominantes, las demás componentes y sismos producen resultados con un aspecto similar.

La longitud de onda del oleaje resulta un parámetro de particular interés para el cálculo de la altura del agua sobre la presa por efecto del *run-up*. Una forma de estimar esta longitud de onda en el momento de máxima amplitud consiste en graficar la variación de las amplitudes de las olas en el ancho del embalse. Por ejemplo, la [Figura 11](#) muestra las olas para el modelo paralelo en dos instantes donde se producen las amplitudes máximas en coincidencia con la progresiva $x = 0$ m. A pesar de que las ondas no son perfectamente armónicas, la primera onda del Ejemplo 1 tiene una longitud aproximada de 400 m, mientras que la primera onda del Ejemplo 2 posee una longitud de unos 360 m. Además, se observan 4.5 ondas en el ancho del embalse para ambos ejemplos, por lo que la longitud de onda puede calcularse como:

$$\lambda = L / 4.5 = 1500 / 4.5 \approx 350 \text{ m} \quad (9)$$

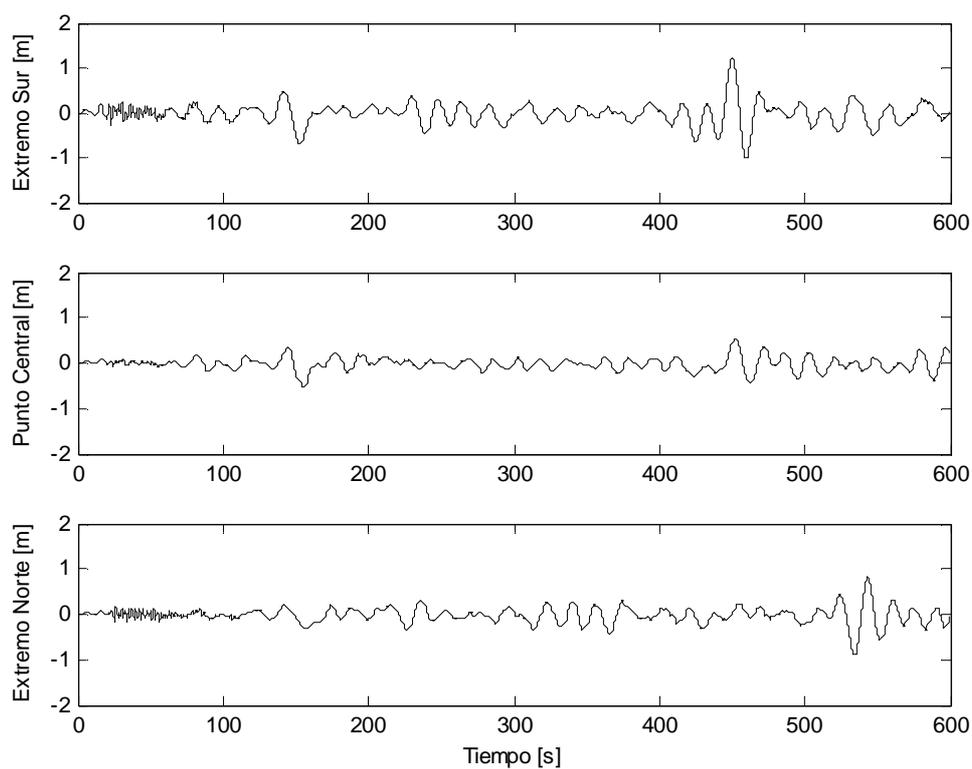


Figura 10: Amplitud máxima de olas con componentes de baja frecuencia de amplitud $A = 0.050$ m para el modelo paralelo [m]

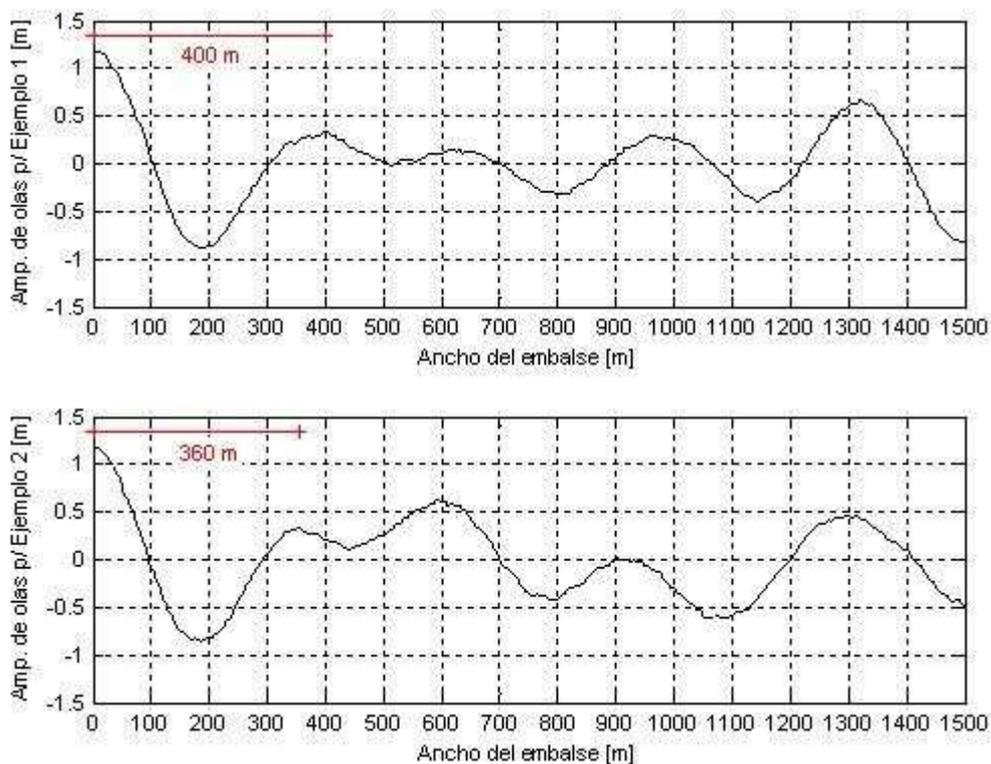


Figura 11: Ejemplos de perfiles de amplitud de olas para el modelo paralelo [m]

La velocidad de propagación de estas ondas se define como el cociente entre la longitud de onda y el tiempo entre los picos de amplitud de las olas más relevantes de la [Figura 10](#), que es del orden de 18.5 s

$$v = \lambda / T = 350 / 18.5 \approx 18.9 \text{ m/s} \quad (10)$$

Esta velocidad se encuentra un 17% por debajo de la velocidad de propagación de ondas largas en aguas poco profundas (c), que constituye una cota superior para ondas largas en relación a la profundidad ($\lambda > 20 H$)

$$v = 18.9 \text{ m/s} < c = \sqrt{gH} = 22.69 \text{ m/s} \quad (11)$$

Otra alternativa ligeramente más conservadora para calcular la longitud de ondas del oleaje en los extremos consiste en obtenerla a través del producto de la velocidad c por el tiempo transcurrido entre picos relevantes de la respuesta, que para ambos modelos de la presa resulta $\lambda \approx 400$ m. Esta velocidad c es la que se observa como dominante en los casos de derrumbe de laderas que se analizan más adelante, por lo que este último procedimiento de cálculo es el que se aplica en los restantes casos.

3.5 Oleajes producidos por desplazamientos permanentes del fondo o de las laderas

Las máximas amplitudes del oleaje por posibles desplazamientos del fondo o de las laderas cercanas a las márgenes de los embalses se calculan considerando los siguientes escenarios:

- I. Corrimiento horizontal de 1 m de la pared vertical completa de una de las márgenes a distintas velocidades para simular el desplazamiento del agua debido a la ocupación de su espacio por el material desprendido. Estas velocidades se definen a través de las siguientes duraciones del proceso de desmoronamiento: 5 s, 10 s y 20 s. La variación en el tiempo del corrimiento posee la forma de la mitad de una ventana de Hanning que arranca con un valor nulo y finaliza con un valor unitario mantenido constante.
- II. Levantamiento del fondo del embalse en forma de cuña contra una de las márgenes hasta una longitud horizontal igual a la profundidad del embalse en dicha margen. La ley de variación temporal resulta la misma que se utiliza en el escenario anterior, mientras que la ley de variación espacial es lineal y alcanza un valor máximo de 2 m en correspondencia con la pared vertical. De esta forma se impone al final del proceso de desmoronamiento una variación de volumen idéntica a la del escenario anterior.

La [Figura 12](#) y la [Figura 13](#) muestran la evolución en el tiempo de la amplitud de las olas para los escenarios I y II de desmoronamiento, respectivamente, para el modelo paralelo y en tres puntos característicos en la superficie libre del agua: borde activo (margen donde se introduce la perturbación) representado con línea continua (negra), centro del embalse con línea de trazos (verde) y borde pasivo (margen opuesta a la perturbación) con línea de puntos (roja). Se observa que el tiempo que demora la perturbación en ir y volver al borde activo prácticamente coincide con el periodo natural de 132 s del modo fundamental de este modelo. Este tiempo de demora también resulta igual al que se obtiene dividiendo el ancho del modelo en ida y vuelta (2x1500 m) por una velocidad de propagación $c = 22.69$ m/s (ya calculada para $H = 52.50$ m). La longitud de onda de las olas contra ambos extremos se obtiene como el producto de esta velocidad por el tiempo que transcurre entre los primeros picos de la respuesta, resultando $\lambda \approx 400$ m.

La [Figura 14](#) y la [Figura 15](#) muestran la amplitud de las olas en el tiempo para los escenarios I y II de desmoronamiento, respectivamente, para el modelo perpendicular. Puede observarse nuevamente que el tiempo que demora la perturbación en ir y volver al borde

activo coincide con el periodo natural de 633 s del modo fundamental de este otro modelo. También resulta igual al que se obtiene dividiendo el ancho del modelo en ida y vuelta (2×7200 m) por una velocidad de propagación $c = 22.69$ m/s. La longitud de onda de las olas contra el extremo de la presa se obtiene como el producto de esta velocidad por el tiempo que transcurre entre los primeros picos de la respuesta, resultando $\lambda \approx 640$ m.

La [Tabla 8](#) y la [Tabla 9](#) recopilan los valores de la amplitud máxima de las olas para los bordes activo y pasivo de los modelos paralelo y perpendicular, respectivamente. La amplitud máxima en el borde activo para ambos escenarios y modelos es inversamente proporcional a la duración del evento, siendo algo mayor para el escenario I. En el caso del modelo paralelo se observa que para la duración de 20 s, la amplitud del oleaje en el borde activo es mayor durante el “rebote” de la perturbación para ambos escenarios. Respecto al borde pasivo, las amplitudes para ambos escenarios resultan casi idénticas y prácticamente independientes de la duración del evento. Las amplitudes máximas en este borde son mayores para el modelo paralelo que para el modelo perpendicular.

Tabla 8. Amplitud máxima de olas por desmoronamientos – Modelo paralelo [m]

Duración [s]	Escenario I		Escenario II	
	Borde activo	Borde pasivo	Borde activo	Borde pasivo
5	0.80	0.42	0.60	0.40
10	0.40	0.40	0.37	0.39
20	0.18 – 0.29	0.33	0.18 – 0.28	0.32

Tabla 9. Amplitud máxima de olas por desmoronamientos – Modelo perpendicular [m]

Duración [s]	Escenario I		Escenario II	
	Borde activo	Borde pasivo	Borde activo	Borde pasivo
5	0.79	0.24	0.60	0.23
10	0.40	0.24	0.37	0.24
20	0.18	0.23	0.18	0.22

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que la amplitud máxima sobre la superficie media del embalse de olas inducidas por la excitación sísmica adoptada para verificación del proyecto de la presa no supera 0.42 m. Sin embargo, el agregado a los acelerogramas de componentes de baja frecuencia que no afectan los espectros de respuesta utilizados para el diseño, y que son consistentes con las demandas sísmicas en bajas frecuencias, producen la excitación de los primeros modos del embalse generando que la amplitud máxima de las olas alcance 1.22 m, y con hipótesis más pesimistas hasta 2.26 m. A pesar de que las funciones agregadas poseen una duración de 300 s (pero sólo 90 s de amplitud superior al 80% del máximo) y que las frecuencias excitatrices son coincidentes con las frecuencias naturales de los 10 primeros modos naturales, el hecho de no afectar los espectros de respuesta respalda la consideración de este escenario aunque pueda ser considerado demasiado conservador. Para estas bajas frecuencias no se cuenta con registros instrumentales confiables de las aceleraciones que efectivamente pueden alcanzarse, y por lo tanto estas aceleraciones podrían superar las que normalmente se consideran en la verificación sísmica de presas y otras estructuras. Las hipótesis adoptadas permiten reproducir satisfactoriamente las amplitudes de olas observadas en los estudios empíricos sobre casos reales reportados en las referencias citadas.

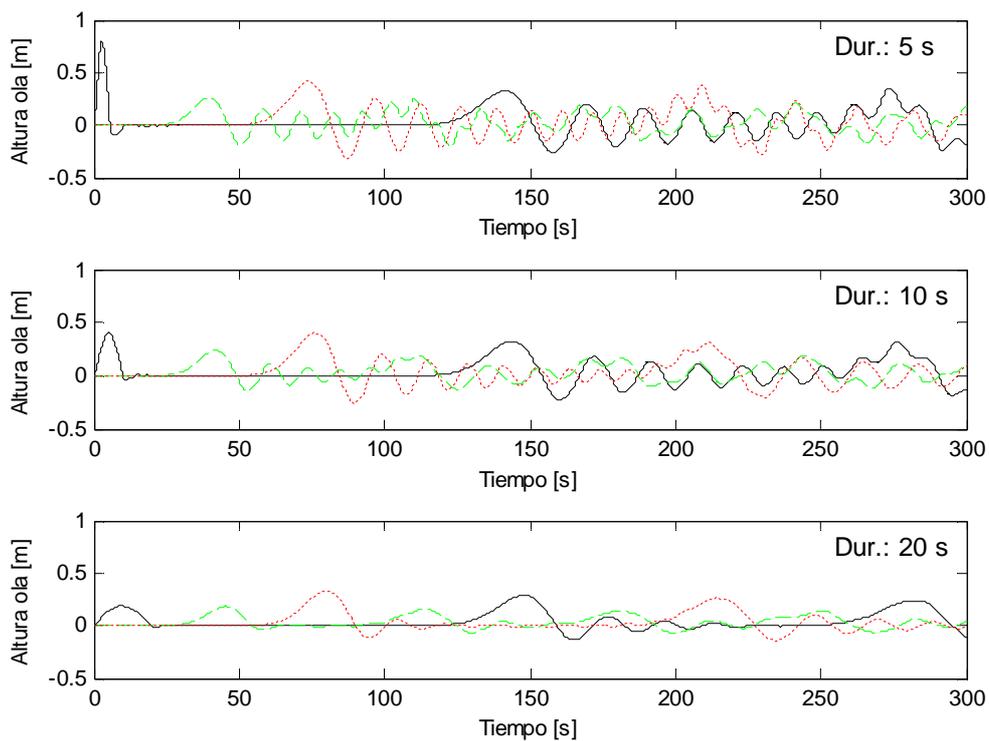


Figura 12: Amplitud de olas para escenario I de desmoronamiento – Modelo paralelo

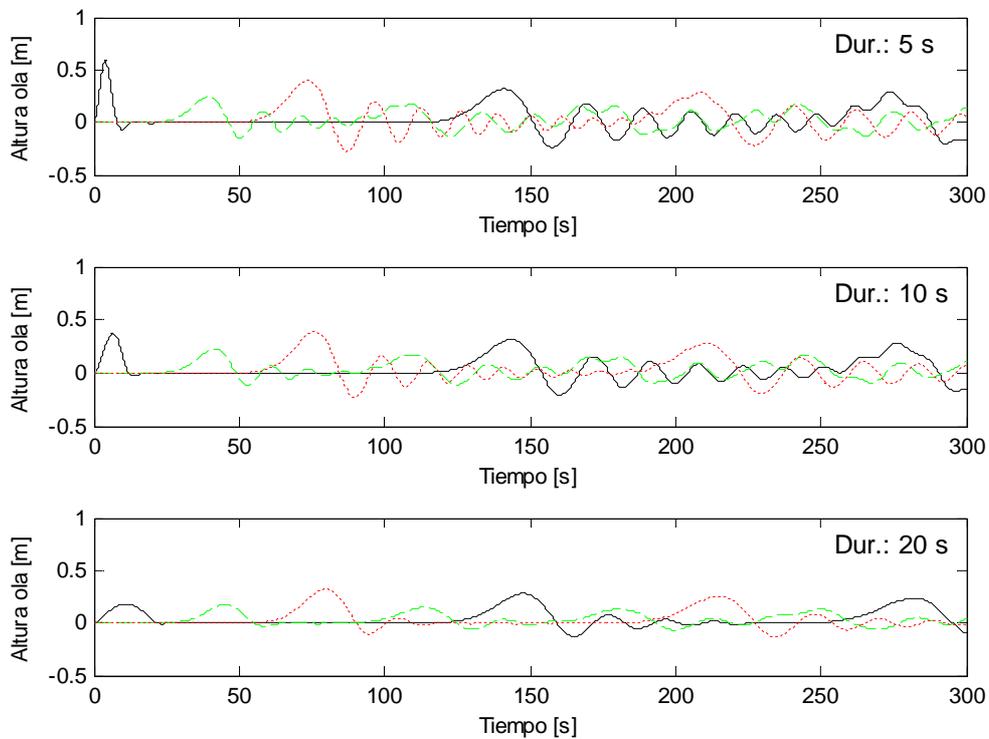


Figura 13: Amplitud de olas para escenario II de desmoronamiento – Modelo paralelo

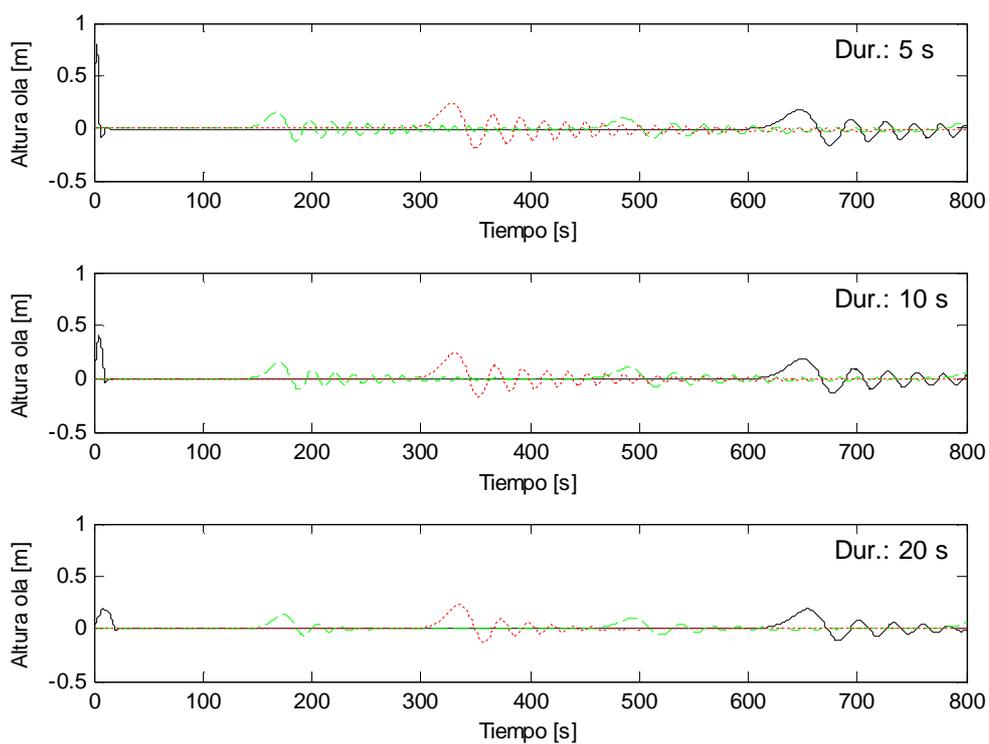


Figura 14: Amplitud de olas para escenario I de desmoronamiento – Modelo perpendicular

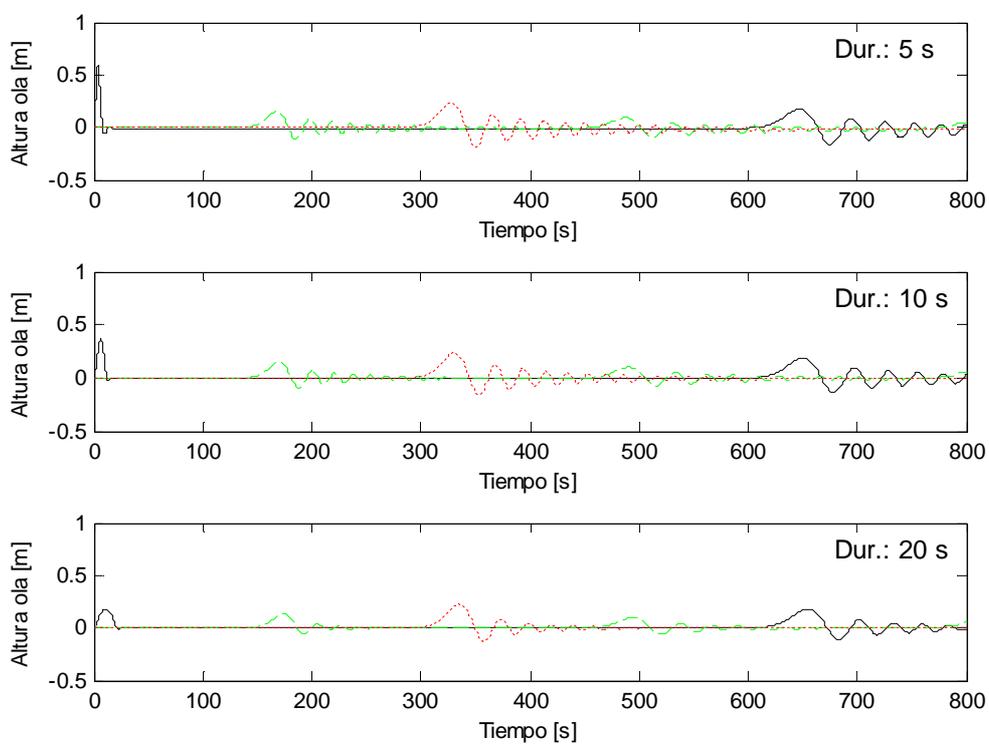


Figura 15: Amplitud de olas para escenario II de desmoronamiento – Modelo perpendicular

Por otro lado, la amplitud máxima de la ola generada por un desplazamiento permanente del fondo o de una de las márgenes del embalse resulta aproximadamente igual a 0.80 m para un desplazamiento de 1 m. Sin embargo, estos resultados están asociados a desplazamientos permanentes hipotéticos, ya sean horizontales o verticales, considerados en forma separada. Si ambos desplazamientos se produjeran en forma simultánea, la predicción del modelo lineal aplicado implicaría una suma directa de ambos efectos. Estas hipótesis fueron adoptadas a los efectos de estimar la amplitud de las olas que se podrían esperar en caso que ocurran esos desplazamientos como consecuencia directa de un sismo o un efecto co-sísmico desestabilice el fondo o las márgenes del embalse.

REFERENCIAS

- Clark, K.J., Upton, P., Carey, J., Rosser, B. and Strong, D., *Tsunami and seiche hazard scoping study for lakes Tekapo, Pukaki, Ohau, Alexandrina and Ruataniwha*, Environment Canterbury, Report No. 15/39, New Zeland, 2015.
- Freundt, A., Strauch, W., Kutterol, S. and Schmincke, H.-U., Volcanigenic tsunamis in lakes: Examples from Nicaragua and general implications, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 164, pp. 527-545, 2007.
- International Commission on Large Dams (ICOLD), *Earthquake Analysis Procedures for Dams*, Bulletin 52, 1986.
- Nakajima, T. and Kanai, Y., Sedimentary features of seismoturbidites triggered by the 1983 and older historical earthquakes in the Eastern margin of the Japan Sea, *Sedimentary Geology*, Vol. 135, pp. 1-19, 2000.
- Newmark, N.M. and Rosenblueth, E., *Fundamentals of Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, U.S.A., 1971.
- Plafker, G. and Eyzaguirre, V.R., Rock avalanche and wave at Chungar, Perú, In: Voight, B. (Ed.): *Rockslides and Avalanches, Vol. 2*, Developments in Engineering Geology, Vol. 14B, pp. 269-279, Elsevier, NL, 1979.
- Schnellmann, M., Anselmetti, F.S., Giardini, D. and McKenzie, J.A., Mass movement-induced fold-and-thrust belt structures in unconsolidated sediments in Lake Lucerne (Switzerland), *Sedimentology*, Vol. 52, pp. 271-289, 2005.
- Smoot, J.P., Litwin, R.L., Bischoff, J.L. and Lund, S.J., Sedimentary record of the 1872 earthquake and Tsunami at Owens Lake, SE California, *Sedimentary Geology*, Vol. 135, pp. 241-254, 2000.
- Villarosa, G., Outes, V., Gomez, E.A., Chapron, E. y Ariztegui, D., Origen del tsunami de mayo de 1960 en el lago Nahuel Huapi, Patagonia: aplicación de técnicas batimétricas y sísmicas de alta resolución, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol 65, pp. 593-597, 2009.
- Virella, J.C., Prato, C.A., Godoy, L.A., Linear and nonlinear 2D finite element analysis of sloshing modes and pressures in rectangular tanks subject to horizontal harmonic motions, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 312, pp. 442-460, 2008.
- Wikipedia, *Vajont Dam*, https://en.wikipedia.org/wiki/Vajont_Dam, visitado el 12.08.2016.
- Wikipedia, *1958 Lituya Bay megatsunami*, https://en.wikipedia.org/wiki/1958_Lituya_Bay_megatsunami, visitado el 12.08.2016.