
4015027.2

Georg Heim, Markus Liniger

**Ministerio de Energía
División Desarrollo Sustentable
Evelyn Stevens**

**Línea Base Geológica de Proyec-
tos Hidroeléctricos
Estándares Suizos**

Santiago, 18 de diciembre de 2015

GEOTEST SPA
LA CONCEPCIÓN 191
OF. 1201, PROVIDENCIA
CL-SANTIAGO DE CHILE
T + 56 2 2573 85 62
M + 56 9 8664 40 17
www.geotest.ch

Contenido

1. Antecedentes generales 3

2. Objetivos 3

3. Procedimiento 3

4. Marco legal..... 4

 4.1 Requerimientos legales 4

 4.2 Criterios de pertinencia al reglamento de embalses..... 4

5. Amenazas gravitatorias..... 6

 5.1 Requerimientos de seguridad 6

 5.2 Análisis de amenazas 8

 5.2.1 Condiciones de borde para la definición de escenarios 8

 5.2.2 Procesos analizados 8

 5.2.3 Metodología de análisis 8

6. Amenazas naturales tectónicas (terremotos) 9

 6.1 Consideraciones de seguridad 9

 6.2 Análisis de amenazas 10

 6.2.1 Procesos analizados 10

 6.2.2 Metodología de análisis 11

7. Documentos a presentar 12

8. Observaciones finales..... 12

1. Antecedentes generales

Ante la inexistencia de estándares nacionales en algunos componentes ambientales, la Agenda de Energía busca generar guías específicas que permitan mejorar la calidad de la información de los proyectos energéticos que ingresan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Esta iniciativa está en línea con lo que plantea el Eje 1 de la Agenda de Energía - nuevo rol del estado - y la Línea de Acción N°7 - Generar mayor compromiso del sector energía por el resguardo ambiental y social de los proyectos del sector.

Necesidad del estudio

En vista de las centrales hidroeléctricas actualmente en evaluación ambiental, es de interés conocer los estándares exigidos en la legislación internacional para levantar la línea base geológica y posterior análisis de riesgo ante desastres naturales del tipo tectónico y gravitatorio para proyectos hidroeléctricos.

Con la intención de trabajar en el mejoramiento de la calidad de los Estudios de Impacto Ambiental de los proyectos hidroeléctricos, el Ministerio de Energía ha planteado la necesidad de investigar la situación de Suiza por ser un país a la vanguardia en temas de prevención de desastres naturales.

Mandato

2. Objetivos

El objetivo del presente análisis es revisar los estándares exigidos en la normativa suiza para la elaboración de la línea base geológica durante el proceso de evaluación ambiental de proyectos hidroeléctricos.

3. Procedimiento

En la presente síntesis de los requerimientos en temas de evaluación de amenazas naturales en el diseño de centrales hidroeléctricas de embalse, se describirá en primer lugar un resumen del marco legal vigente. Posteriormente se detallará que tipos de instalaciones requieren de una evaluación especial relacionada a amenazas naturales. Finalmente se listan los requerimientos de seguridad para estas centrales y la metodología práctica que se utiliza para la evaluación de amenazas.

Contenidos del estudio

4. Marco legal

4.1 Requerimientos legales

La ley de embalses del 1.10.2010 y el respectivo reglamento del 17.10.2012 regulan los requerimientos relativos a seguridad de infraestructura de embalses. Para instalaciones que se encuentren subordinadas a la ley de embalses (capítulo 4.2.), deben presentar un estudio de verificación de protección frente a amenazas naturales. Esto incluye los siguientes elementos:

Ley de embalses, reglamento de embalses

- Seguridad constructiva
- Mantenimiento y monitoreo
- Concepto de emergencia

La seguridad constructiva incluye la verificación de la capacidad de carga de la instalación considerando las cargas generadas por amenazas gravitatorias y tectónicas. El aspecto de seguridad constructiva es el tema central de esta visión general. Los otros elementos, mantenimiento y monitoreo, así como concepto de emergencia, son elementos de seguridad operacional. Serán descritos brevemente en este documento.

Enfoque en la seguridad constructiva

Proyectos de construcción y renovación de embalses y sus instalaciones complementarias en relación a la seguridad deben ser aprobados por la autoridad correspondiente antes de que comience la construcción.

4.2 Criterios de pertinencia al reglamento de embalses

Todas las obras de represamiento diseñadas con una altura de muro > 5 m y un volumen de embalsamiento $> 50'000$ m³ son sometidas al reglamento de embalses. Instalaciones de menor envergadura deben someterse a este reglamento si en caso de inundación se ven afectadas personas o bienes de alto valor con profundidades de flujo > 0.5 m o si el producto entre la profundidad y velocidad de escurrimiento es > 0.5 m²/s. Dependiendo del tipo de potencial de daño, pueden permitirse mayores niveles de amenazas. Dependiendo del tipo de represamiento se deben considerar diferentes escenarios de falla de las obras de represamiento, cuya amenaza de inundación debe ser definida por medio de modelos bidimensionales de inundación (ecuación de aguas someras):

Criterios de pertinencia

- Para presas de arco y de gravedad: Falla abrupta y completa de todo el muro.

Escenarios de falla

- Para presas de material suelto: Falla de forma trapezoidal con una base de 2 veces la profundidad de agua con pendientes laterales 1:1, cuyo máximo corresponde al ancho de la presa.
- Se considera un llenado completo del volumen de embalsamiento (nivel de embalsamiento proyectado).

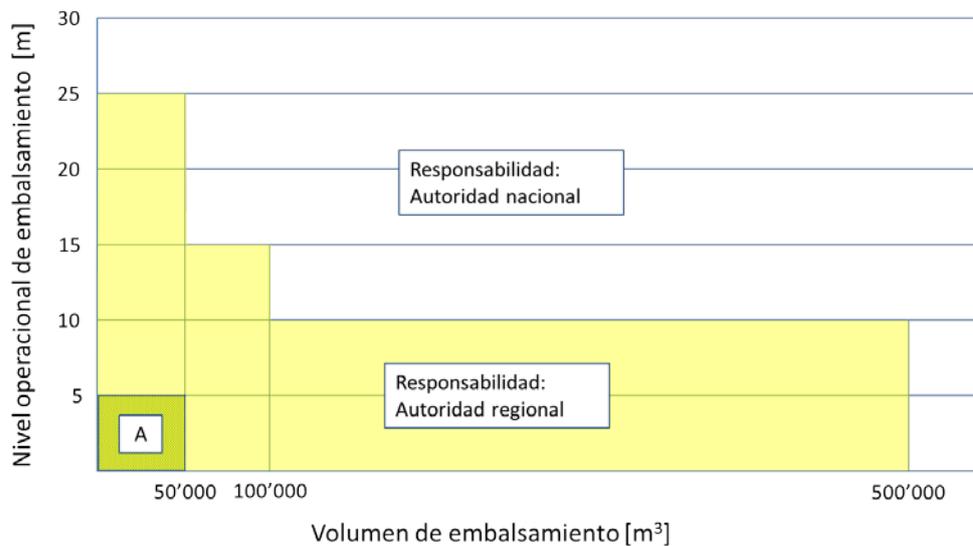


Figura 1: Criterios de pertinencia a la regulación de embalses. El nivel de represamiento corresponde a la diferencia entre la altura del aliviadero y el punto de referencia de fondo en el espacio de embalsamiento. Estructuras con alturas de embalsamiento < 5 m y volúmenes de embalsamiento < 50'000 m³ deben considerar una verificación de seguridad, de acuerdo a la ley de embalses, si en caso de colapso de la instalación exista una amenaza significativa a personas o a bienes de alta valoración.

Si un solicitante declara que su instalación no es pertinente a la ley de embalses, debe justificarlo ante las autoridades cantonales. La autoridad competente (nivel federal o cantonal) decide si la instalación debe someterse a la ley de embalses.

Exclusión a la legislación de embalses

5. Amenazas gravitatorias

5.1 Requerimientos de seguridad

<p>Los embalses deben ser calculados de acuerdo al estado arte de tal forma que su estabilidad pueda ser garantizada ante todos los casos de carga y operación pre-visibles. Los requerimientos de seguridad en el diseño de presas se definen por consiguiente por la amenaza existente y no a base de los riesgos calculados.</p>	<p>Requerimientos ba-sados en amenazas y no en riesgos</p>
<p>Básicamente el caudal de crecida de diseño con un período de retorno de 1000 años (HQ1000) debe ser desaguado por las instalaciones sin que el dique sufra daños. A su vez el caudal de diseño de crecida con factor de seguridad (1.5 x HQ1000), debe ser posible de desviar sin daños substanciales en el dique.</p>	<p>Caudal de diseño y caudal de diseño in-cluyendo factor de se-guridad</p>
<p>Movimientos naturales de tierra, de roca o de hielo que en embalses provocan olas, no deben generar la falla del embalse. En caso que exista la amenaza que genere un impacto mayor que el caudal de crecida de diseño con factor de seguri-dad, deben considerarse medidas de monitoreo y un concepto de emergencia.</p>	<p>Monitoreo y concep-to de emergencia</p>
<p>Amenazas agudas por movimientos de masas, que pueden causar vertimientos mayores a los caudales de crecida de diseño y que no sean evitables por medio de medidas de protección, hacen no factibles los proyectos.</p>	<p>Amenazas agudas</p>
<p>Debe asegurarse que el proyecto previsto no conduzca a un aumento de la inten-sidad y frecuencia de crecidjas aguas abajo del embalse (por ej. por desprendi-mientos o deslizamientos de tierra inducidos artificialmente por el proyecto con la generación de olas de inundación que no pueden ser interceptados en el área de embalsamiento).</p>	<p>El proyecto no debe conducir a mayores amenazas</p>
<p>Adicionalmente existen requerimientos de seguridad geotécnicos en relación a la estabilidad de la presa. Pueden mencionarse en este tema análisis de subsuelo en términos de permeabilidad y estabilidad (falla subterránea). Los requerimientos geotécnicos son regulados en el marco de las normas de construcción. En el ám-bito de este trabajo no serán detallados, ya que no son parte de los análisis de amenazas naturales.</p>	<p>Aspectos geotécni-cos</p>
<p>La disposición a las amenazas tiene influencia en la formulación del plan de ope-ración (definición de las condiciones de servicio) y el plan de seguridad (base para el dimensionamiento de las obras). Estos planes deben definirse en la presenta-ción del proyecto.</p>	<p>Plan de operación y seguridad.</p>

Crecidas		Requerimientos de Seguridad	
		Movimiento de masas	Seguridad de fundación
Crecida de diseño (HQ1000)	Desvío sin daños	<p>Superficie de rotura / Superficie de deslicamiento</p> <p>Bajo la cota de embalsamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> No se permiten aumentos del período de retorno e intensidad natural existente de crecidas aguas abajo del embalse No se permite amenaza estructural de las obras de presa No se toleran amenazas agudas, que puedan conducir a flujos \geq flujos de diseño 	<ul style="list-style-type: none"> Se piden análisis geotécnicos Verificación de la permeabilidad del subsuelo (fisura, pérdida de agua) Integración segura lateral de la presa debe ser garantizada Verificación de cimientos en la zona de fundaciones
Crecida de diseño con factor de seguridad (1.5 x HQ1000)	Desvío sin falla de la presa	<p>Sobre la cota de embalsamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> No hay falla de la presa En caso de olas de inundación con derrames mayores al flujo de seguridad, entonces concepto de monitoreo y emergencia No se aceptan amenazas agudas, que puedan conducir a flujos \geq flujos de diseño 	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> No se analiza el tema de seguridad de cimientos en este informe </div>

Figura 2: Requerimientos de seguridad para el diseño de presas para procesos gravitatorios de amenaza. Los requerimientos con respecto a la seguridad sísmica se detallarán en un capítulo separado. HQx significa el caudal máximo con un período de retorno de x años.

5.2 Análisis de amenazas

5.2.1 Condiciones de borde para la definición de escenarios

En el desarrollo de escenarios se considera la regla n-1. Esta define que en caso de un evento peligroso el elemento de drenaje de mayor capacidad se encuentra obstruido (por lo general el desagüe inferior). El volumen de agua turbinable no debe ser considerado. Además se supone que el embalse se encuentra en su cota máxima (derrame menos francobordo).

Regla n-1

5.2.2 Procesos analizados

Requerimientos previos para la planificación y ejecución de embalses es el conocimiento de posibles amenazas naturales, y las cargas que generan sobre la presa y en el valle río abajo de la instalación. El análisis de amenazas debe incluir tanto el estado inicial así como el estado proyectado. Los siguientes procesos y sus interacciones deben ser analizados:

Situación de amenazas en estado inicial y proyectado.

- **Movimientos de tierra /Aluviones** (deslizamientos de tierra, rocas, avalanchas, rotura de glaciares, aluviones). Se analiza la amenaza de una gran masa que cae en el volumen de embalsamiento que generan olas. También pueden generarse daños directos a las estructuras de contención.
- **Crecida:** Si la capacidad de los elementos de desagüe son insuficientes, la corona de la presa puede verse sobrepasada. Además una crecida puede transportar material, el que puede bloquear los desagües.
- **Sedimentación del embalse:** La sedimentación del volumen de embalsamiento puede llevar a la obstrucción del desagüe o una modificación del escurrimiento y así no permitir un desagüe seguro.

5.2.3 Metodología de análisis

La metodología de análisis no se encuentra explícitamente definida en las directrices nacionales. Las siguientes definiciones se orientan al procedimiento común por especialistas:

Movimientos de masa / Aluviones: Debe distinguirse entre movimientos de masas naturales con línea de afloramiento, superficie de deslizamiento y zona de rotura sobre la cota de embalsamiento de aquellos que ocurren en el área de embalsamiento del proyecto. En el primer caso los movimientos por lo general no son

Diferenciación entre movimientos de masa inducidos artificialmente y naturales

inducidos artificialmente. Cuando el área de embalsamiento alcance superficies de deslizamiento, pueden generarse tensiones normales que disminuyen las fuerzas de resistencia y pueden producirse movimientos de masas inducidas artificialmente. Los métodos de análisis incluyen la revisión de antecedentes históricos y la consulta a habitantes de la zona, evaluaciones de detalladas de procesos geológicos en terreno, cálculos de estabilidad y modelaciones, si fuera necesario considerando los efectos del cambio climático. La amenaza debe evaluarse en la zona de embalsamiento así como en la zona de la presa (impacto directo). Deben definirse los esfuerzos y presiones en la presa.

Crecidas: Basado en modelaciones de precipitaciones-escurrimiento se definen los hidrogramas de crecida para diferentes períodos de retorno. La propagación de las amenazas se calcula por medio de una modelación de olas de inundación en 2-D (ecuaciones de flujos inestacionarios). En esto se consideran los impactos generados por los movimientos de masas de los escenarios definidos. Para pilares de puentes u otras obras que obstruyan el flujo libre pueden utilizarse modelaciones 3-D. El análisis de crecidas incluye la estimación de madera flotante y los escenarios de obstrucción considerados en el proyecto.

Modelación de olas de inundación, consideración de madera flotante y obstrucciones

Sedimentación del embalse: En base a análisis en terreno y cálculos de la capacidad de transporte se determina el volumen de detritos y sedimentos finos que pueden ingresar al área de embalsamiento en caso de crecida y la carga media anual. Se realizan investigaciones si por sedimentación en la base del embalse pueden generarse déficits en la protección de crecidas. Además se modelará la sedimentación y velocidad de almacenamiento en el área del embalsamiento.

Investigaciones de detritos y sedimentos finos

6. Amenazas naturales tectónicas (terremotos)

6.1 Consideraciones de seguridad

Básicamente no se permite la construcción de plantas hidroeléctricas en zonas con fallas tectónicas activas.

Zonas sísmicas activas

El solicitante debe presentar la verificación que la instalación proyectada (obra completa) se mantiene operativa hasta un nivel definido de magnitud sísmica. Dependiendo de la altura y tamaño de la presa se definen tres clases de obras con diferentes niveles de requerimientos de seguridad (frecuencia e intensidad de los terremotos).

Requerimientos de seguridad específicos para la instalación

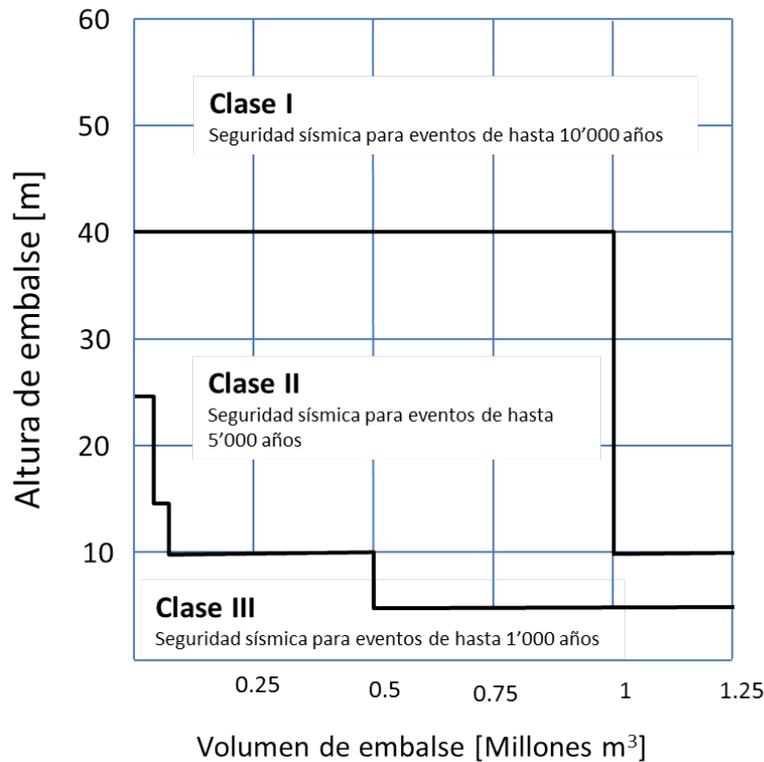


Figura 3: Diferenciación de los tipos de instalaciones en relación a los requerimientos a seguridad sísmica. La diferenciación de acuerdo a altura de embalse y volumen de embalsamiento (volumen de diseño).

6.2 Análisis de amenazas

6.2.1 Procesos analizados

Para la determinación de las amenazas por sismos deben considerarse las aceleraciones máximas verticales y horizontales, así como determinarse el espectro de respuesta.

Las siguientes verificaciones deben presentarse:

- **Análisis de estabilidad**
 Debe demostrarse que no se producirá una falla de la instalación que pueda conducir a una salida de agua descontrolada. Daños y deformaciones locales, que no influyan en la integridad de la obra, son tolerables.

- **Cálculo de desplazamiento**

Debe analizarse si en estado deformado los desplazamientos permisibles son superados y si la estabilidad de las instalaciones sigue siendo suficiente.

- **Verificación de fundaciones**

En condiciones desfavorables de fundación debe verificarse la integridad de las fundaciones para el caso de terremoto.

6.2.2 Metodología de análisis

Para la determinación de las aceleraciones máximas horizontales se consideran los siguientes pasos:

- 1) Definición de período de retorno determinante de terremoto de acuerdo a la Figura 3.
- 2) Determinación de la intensidad MSK¹ determinante de acuerdo a los mapas de intensidad existentes del servicio sismológico suizo.
- 3) Cálculo de la intensidad a la aceleración máxima horizontal (formula existente)

Para la determinación del espectro de respuesta se utiliza el Eurocode 8, capítulo 1.1, sección 4.2.2.

Concretamente deben realizarse los siguientes análisis:

Clase de Presa	Elementos de análisis
Presa clase III	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis sísmico simplificado y análisis de estabilidad (método de cargas virtuales) sólo para movimientos horizontales - Cálculo de deslizamiento del dique

Elementos de análisis

¹ MSK = Medwedew-Sponheuer-Karnik

Presa clase II	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis sísmico y de estabilidad simplificado (método del espectro de respuesta con un modo de vibración) para movimientos horizontales y verticales - Cálculo de deslizamiento del dique
Presa clase I	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculos bidimensionales estáticos y de elementos finitos dinámico. - Análisis simplificado dinámico de estabilidad, verificación de estabilidad durante y posterior al sismo. Movimiento horizontal y vertical. - Cálculo de deslizamiento del dique

7. Documentos a presentar

- Descripción de las instalaciones (entre otros modo operacional, tamaño y datos del área de embalsamiento)
- Planos generales del proyecto (locación, cortes, elevaciones, detalles importantes)
- Dimensiones de la obra (altura, largo de coronación, etc.)
- Características del área de embalsamiento (modo de operación, cotas de operación, volumen de embalsamiento)
- Resultados de las investigaciones geológicas y geotécnicas del subsuelo.
- Cálculos estáticos y dinámicos, y cálculos de estabilidad.
- Resultados de estudios hidrológicos
- Cálculos hidráulicos de los dispositivos de desagüe
- Mapa de inundación en caso de falla de la obra (con información sobre la velocidad y profundidad del flujo)
- Plan de seguridad y operación
- Estudios de amenaza de otros procesos gravitacionales

8. Observaciones finales

Dado a la inexistencia de procesos volcánicos en Suiza no existen exigencias relacionadas.

Las exigencias suizas pueden ser aplicadas directamente para la línea base en Chile. Por su amplia experiencia en la prevención de desastres naturales y en geotecnia, GEOTEST realiza estudios de factibilidad para proyectos hidroeléctricos tanto en Suiza como en el ámbito internacional en el tema de desastres naturales. Ofrecemos al Ministerio de Energía nuestro apoyo en el análisis de factibilidad de proyectos concretos o en la elaboración de directrices relacionadas.

Agradecemos por el mandato otorgado.

GEOTEST SpA



Georg Heim