



SERVICIOS DE CONSULTORÍA PARA ELABORAR EL
PROYECTO BÁSICO Y LOS DOCUMENTOS DE LICITACIÓN
PARA LA POSTERIOR CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DEL
ARROYO CASUPÁ

Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debía a
formación de lo embalse



■ HOJA DE CONTROL DE CALIDAD						
DOCUMENTO	Proyecto Ejecutivo. Estudios Sismológicas					
PROYECTO	SERVICIOS DE CONSULTORÍA PARA ELABORAR EL PROYECTO BÁSICO Y LOS DOCUMENTOS DE LICITACIÓN PARA LA POSTERIOR CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DEL ARROYO CASUPÁ					
CÓDIGO	HY2261-AN-GE-1000 Estudios Sismologicos-V0b					
AUTOR	FIRMA	MA	MA			
	FECHA	06/07/2026	06/06/2026			
VERIFICADO	FIRMA	CMN	APR			
	FECHA	07/07/2026	07/07/2026			
DESTINATARIO	OBRAS SANITARIAS DEL ESTADO (OSE)					
NOTAS						



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debía a
formación de lo embalse



■ ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
RESUMEN EJECUTIVO	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. SISMICIDAD NATURAL EN URUGUAY.....	8
2.1. PREPARACIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO.....	8
2.2. TERREMOTOS MÁS GRANDES	9
2.3. ZONAS SÍSMICAS.....	10
2.4. RIESGO SÍSMICO PROBABILÍSTICO	12
3. SISMICIDAD INDUCIDA POR EL EMBALSE.....	13
3.1. PROBABILIDADES DE OCURRENCIA DE SISMICIDAD INDUCIDA POR EMBALSES (RTS)...	13
3.2. RIESGO SÍSMICO CAUSADO POR TERREMOTOS INDUCIDOS LOCALMENTE	15
3.3. MONITOREO SÍSMICO	17
4. CONCLUSIONES.....	18
5. REFERENCIAS.....	18



INTRODUCCIÓN

Este informe tiene por objetivo presentar los estudios sismológicos desarrollados por nuestros expertos Marcelo Assunção y João Carlos Dourado para avaliar la posibilidad de ocurrencia de sismos inducidos debido la formación del embalse de la Presa de Casupá.

Abajo se transcribe estos estudios:



1SeisNode Sismologia Brasil



Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debía a formación de lo embalse July, 2026

Doc N°: 0012-26

SeisNode Sismologia Brasil

Marcelo Assumpção, João Carlos Dourado, Bruno Collaço



Estudios Sismológicos para avaliar los Sismos Inducidos debido a formación de lo embalse

Informe Técnico a cerca de Sismicidad Inducida debido
a la formación de lo Embalse de de La Presa de Casupá
(Uruguay), solicitada por Engecorps y desarrollada por
SeisNode Sismologia

Julio, 2026

Doc N°: 0012-26



Responsables por los Estudios

**Analices de Datos y Estudios
Técnicos**

Prof. Dr. Marcelo S. Assumpção

**Analices de Datos y Estudios
Técnicos**

Prof. Dr. João Carlos Dourado

Analysis and Reporting

M.Sc. Bruno Collaço

**Gerenciamiento de los
Estudios**

Esp. Jackson Calhau

Versión

- **Primera versión - 06/07/2026:** Preparación y Presentación de los Estudios
- **Versión final - 14/07/2026:** Finalización de lo Informe con la inclusión de las Especificaciones de los Sismógrafos



RESUMEN EJECUTIVO

El área del embalse Casupá había sido clasificada como "asísmica", según CNEGP (Comité Nacional Español de Grande Presas = SPANCOLD). Esta clasificación se examinó considerando un catálogo de terremotos revisado y actualizado, así como estimaciones del riesgo sísmico probabilístico. El CNEGP utiliza como referencia para la clasificación sísmica un mapa español de peligros para el periodo de retorno de 475 años. Considerando que las presas son construcciones de "interés especial", CNEGP recomienda el uso de periodos de retorno de 1000 años.

Se construyó un catálogo actualizado de terremotos basado en las detecciones de la Red Sísmica Brasileña, que utiliza algunas estaciones en Uruguay. Este catálogo inicial se complementó con recientes sismicidades históricas e instrumentales publicadas por el Observatorio Geofísico de Uruguay. El catálogo fusionado fue revisado y podado para descartar algunos eventos falsos de antiguos catálogos internacionales preliminares.

Se analizó la sismicidad regional (Uruguay, noreste de Argentina y sur de Brasil) para definir dos zonas sísmicas: una amplia zona continental y una zona estrecha a lo largo de la plataforma continental.

Un Análisis Probabilístico de Riesgo Sísmico (PSHA) mostró que las aceleraciones en la roca ($V_{s30} = 760$ m/s) durante periodos de retorno de 1.000 años son de 0,011 g. Teniendo en cuenta los percentiles del 15% y 85%, el PGA oscila entre el 0,6% y el 1,5%. Por lo tanto, el análisis revisado con un catálogo actualizado confirma la clasificación del área de Casupá como baja sismicidad ("baja sismicidad" = $\text{PGA} < 4\%$), según los criterios del CNEGP. Otras normas internacionales, como la CDA (Asociación Canadiense de Presas), recomiendan un valor PGA basado en el impacto de una posible ruptura ("impacto de rotura de presa"). Para un impacto extremo, la PGA recomendada es que tenga un periodo de retorno de 10.000 años. Para la zona de Casupá, el PGA de 10.000 años es del 4,9% g.

A pesar del bajo riesgo sísmico causado por un terremoto natural, también se evaluó la probabilidad de sismicidad desencadenada por embalses. La baja altura de la presa (30 m) implica una probabilidad de desencadenar sismicidad de aproximadamente el 1,6%. Dado que la magnitud máxima desencadenada suele ser menor que el terremoto natural máximo, la magnitud máxima creíble para un evento desencadenado es de unos 4,7 mb (4,5 MW). Se estima que la probabilidad de aceleración máxima del suelo del 1% g en el emplazamiento de la presa para cualquier sismicidad desencadenada es del 0,2 %, incluso menor que el riesgo de eventos naturales. A pesar de la baja probabilidad de altas aceleraciones por terremotos provocados, se recomienda instalar al menos una estación (idealmente tres), cerca de la parte más profunda del embalse, para monitorizar la microsismicidad eventual. Esto es importante para el posible impacto social de cualquier microsismicidad que pueda sentirse la población local. El monitoreo de posibles sismicidades locales podría realizarse en colaboración con las otras estaciones de la red sísmica uruguaya.



1. INTRODUCCIÓN

La región de la presa del Arroyo del Casupá fue clasificada como "baja sismicidad" en el proyecto inicial (Engecorps-Typsa, 2017). La norma sísmica española para presas (CNEGP 1999; El Comité Nacional Español de Grande Presas = SPANCOLD) no requiere estudios sísmicos específicos para regiones de baja sismicidad. La clasificación de Uruguay como baja sismicidad se basó en mapas de peligros como GSHAP (Shedlock & Tanner, 1999) o el modelo GEM-2018 (Pagani et al., 2020). Dado que se han publicado nuevos datos de sismicidad para Uruguay (por ejemplo, Baxter et al., 2021; Sánchez-Bettucci et al. 2022, 2025), se recomendó una revisión de la sismicidad uruguaya, incluyendo una estimación del Riesgo Sísmico Probabilístico.

Además, aunque la guía técnica española (CNEGP, 1999), basada en la norma española NCSE-94 (*Norma de Construcción Sismorresistente Española*), menciona que no son necesarios estudios sísmicos específicos para regiones de "baja sismicidad" (definidas como $PGA < 0,04$ g, para un periodo de retorno de 475 años), es común en otras normas internacionales (como la Asociación Canadiense de Presas) especificar la aceleración de diseño basada en el impacto de una falla de presa, similar a la clasificación CNEGP de presas en las clases A (alto impacto), B (mediana) y C (bajo impacto). Para presas con impacto extremo, se recomiendan aceleraciones con un periodo de retorno de 10.000 años, incluso para interiores continentales estables y de baja sismicidad, como Canadá (CDA) y Australia (ANCOLD). En este caso, se requiere un análisis probabilístico de riesgos.

En esta evaluación, se realiza un Análisis Probabilístico de Riesgo Sísmico para a) confirmar la clasificación española de "baja sismicidad" y b) derivar una curva de peligro que se utilice en cualquier futura evaluación sísmica bajo normas más restrictivas.

2. SISMICIDAD NATURAL EN URUGUAY

2.1. PREPARACIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO

El catálogo del Centro de Sismología de la Universidad de São Paulo, llamado "SISBRA" (<https://www.sismo.iag.usp.br/eq/bulletin/>), ya incluye terremotos revisados en Uruguay, el este de Paraguay y el noreste de Argentina. Este catálogo se actualizó hasta 2025 con otras listas de eventos más recientes publicadas por Baxter et al. (2021) y Bettucci et al. (2022, 2025). El catálogo fusionado fue revisado para eliminar eventos dudosos y falsos listados en antiguos catálogos internacionales preliminares. Algunos de los eventos falsos fueron, por ejemplo:

- a) 1967-02-15 mag 5.3 (Sánchez-Bettucci et al., 2022, mencionando el catálogo CERESIS). Este evento no estaba en el catálogo original de CERESIS ni en la ISC-Rebuild revisada. Una magnitud de 5,3 habría sido detectada por estaciones internacionales y se habría sentido hasta ~200 km. No existe tal confirmación. Evento eliminado.
- b) 15-10-1968 (Chaco, NE Argentina) fuente original=INPRES/CERESIS, evento no confirmado basado en el informe de intensidad VI MM. La magnitud asignada de 5,0 mb es incorrecta: un evento tan grande habría sido detectado por estaciones internacionales y se habría sentido hasta ~200 km. No se incluyeron datos en el boletín revisado del ISC. La magnitud se redujo a 3,5.
- c) 1974-08-06 (NE Argentina, Sánchez-Bettucci, 2022) -> posteriormente eliminado del catálogo revisado de ISC-Rebuild

- d) 1975-06-27 (NE Argentina, Sánchez-Bettucci, 2022) -> en realidad un evento profundo en La Rioja, Argentina (ISC)

Además de limpiar el catálogo fusionado, la magnitud se homogeneizó. Diferentes catálogos proporcionan las magnitudes de Richter en escalas ligeramente distintas, como ML, M o mb. El catálogo final tenía todas las magnitudes convertidas a mb. Para eventos grandes antiguos y históricos, se estimaron las magnitudes según el tamaño del área fieltrada, utilizando correlaciones empíricas de *mb-magnitud x área de que urean area percebida* de terremotos brasileños (Assumpção et al., 2014).

2.2. TERREMOTOS MÁS GRANDES

La Fig. 2.1 muestra el mapa con todos los epicentros del catálogo regional revisado. La Tabla 1 a continuación enumera los cuatro eventos más grandes. Los eventos de 1848 y 1888 fueron los terremotos históricos mejor documentados, con un área fieltrada que permite una estimación razonable de la magnitud (Benavidez-Sosa, 1998)

El evento de 1948 está documentado de una forma pouco segura. Se palpó en registros de Corrientes, Buenos Aires y Uruguaiana (Estado de Rio Grande do Sul, Brasil), pero aún no se ha determinado con precisión la superficie total de percepción. Parece que se ha sentido hasta 400-500 km de distancia, lo que correspondería a una magnitud de 5,3 mb. La intensidad IV parece haberse sentido hasta unos 200 km, lo que correspondería a una magnitud de 5,0 mb. Su magnitud de 5,5 (INPRES) probablemente esté sobreestimada.

El terremoto de 1988 es el más fuerte detectado en la zona instrumental y se encuentra en la plataforma continental.

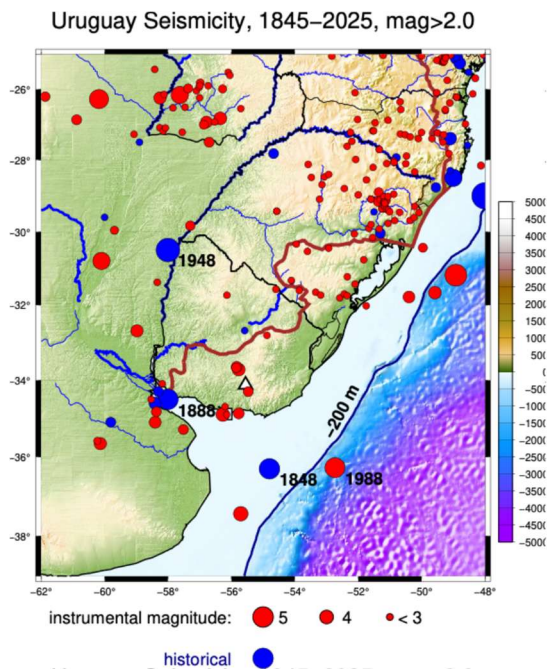


Fig. 2.1. Epicentros del catálogo regional final, con magnitudes > 2.0. Los círculos azules son terremotos históricos estudiados con los informes de percepción. Los círculos rojos son eventos más recientes situados junto a estaciones sísmicas.



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debía a
formación de lo embalse



Tabla 2.1.: Mayores terremotos en la región noreste de Argentina / Uruguay. "err" = error epicentral. "mb"= magnitud telesísmica de Richter mb. Tipo de dato "C": A/B = área de percepción. I = instrumental. "Af"= area de percepción (10^3 km^2)

'Año	MMDD	hhmmss	Latitud'	Longitud	err	Pais	mb	C	lo	Af	Localidad (Referencia)
1848	0809	1835L	-36.3	-54.8	100	UR	5.0	B	5-6	170	Shelf (Benavidez 1998)
1888	0605	0020L	-34.5	-58.0	80	AR	5.0	A	5	245	B.Aires; Colonia(Benavidez 1998)
1948	0121	164740	-30.5	-58.0	30	AR	5.5	B	6	-	M.Caseros; Corrientes (SJA/INPRES)
1988	0626 0	032422	-36.27	-52.73	40	UR	4.9	I	-	-	Estantería (ISC; USP) profundidad=18 km

2.3. ZONAS SÍSMICAS

La determinación de probabilidades de gran aceleración del terreno (Análisis Probabilístico de Riesgos Sísmicos, PSHA) requiere la definición de "zonas sísmicas" y una relación frecuencia-magnitud para cada zona. En regiones intraplaca de baja sismicidad, la correlación de los terremotos con características geológicas/geofísicas es muy pobre y es difícil asignar una causa a los terremotos (como zonas de falla o zonas débiles de la corteza). Excepto por lo grupo de epicentro en el sur de Paraguay, la sismicidad está dispersa en toda la región (Fig. 1). La aparente concentración de epicentros cerca de Buenos Aires puede deberse a que una gran población reporta eventos históricos antiguos con mayor frecuencia que en otras regiones, o a la presencia de la estación sísmica de la LPA (La Plata) que registra pequeños eventos cercanos.

Por otro lado, la sismicidad a lo largo de la plataforma continental, especialmente cerca de la ladera continental (cerca de la batimetría de -200 m), es típica de Uruguay y del sureste de Brasil hasta la cuenca del Espírito Santo. Esta zona había sido estudiada y los terremotos presentan fallas inversas debido a una combinación de tensiones compresivas interplaca y tensiones de flexión locales causadas por la carga de gruesas cuencas sedimentarias offshore (Assumpção, 1998).

Para la PSHA, fue definido las zonas sísmicas: a) una que abarca la amplia región continental que incluye Uruguay, el sur de Corrientes y las provincias de Buenos Aires en Argentina, y la parte sur del estado del Río Grande do Sul en Brasil, y b) otra zona a lo largo de la plataforma continental. Estas zonas se muestran en las Figuras 3 y 4, junto con su distribución magnitud-frecuencia.

Para cada zona, se determinó un limit de magnitud que define la magnitud de completitud, que varía con el tiempo. Esta completitud depende de la distribución de la población (que explica los terremotos históricos) y del número de estaciones sísmicas internacionales y regionales que registren las magnitudes instrumentales más recientes.



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debía a
formación de lo embalse



Grupo TYPISA

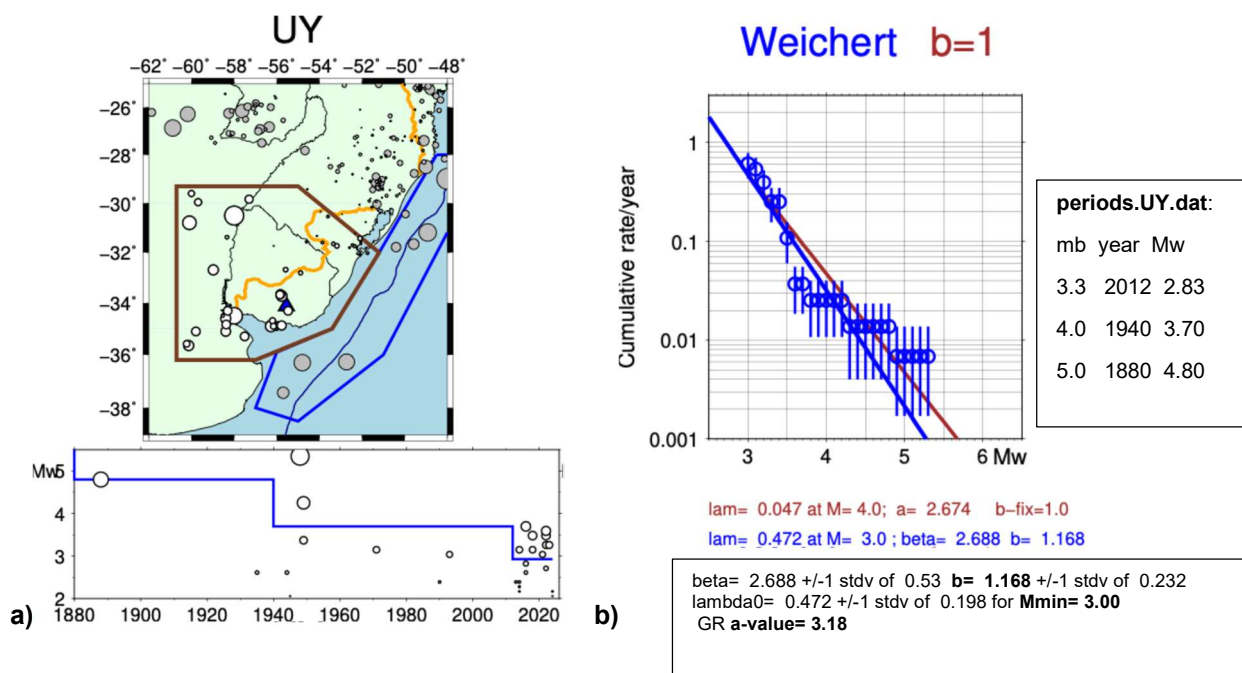


Fig. 2.2. Zona sísmica n° 1 (Uruguay, UY). mapa arriba) con la zona UY definida por la línea marrón. A-abajo) evolución temporal de las magnitudes que muestran el limit de completitud como línea azul. Solo los eventos por encima de la línea de completitud se utilizan en la estimación de frecuencia-magnitud de Gutenberg-Richter (GR). b) Frecuencia acumulada anual de la RG: línea azul = método de Weichert; Línea marrón = valor B fijado en 1.0 para referencia.

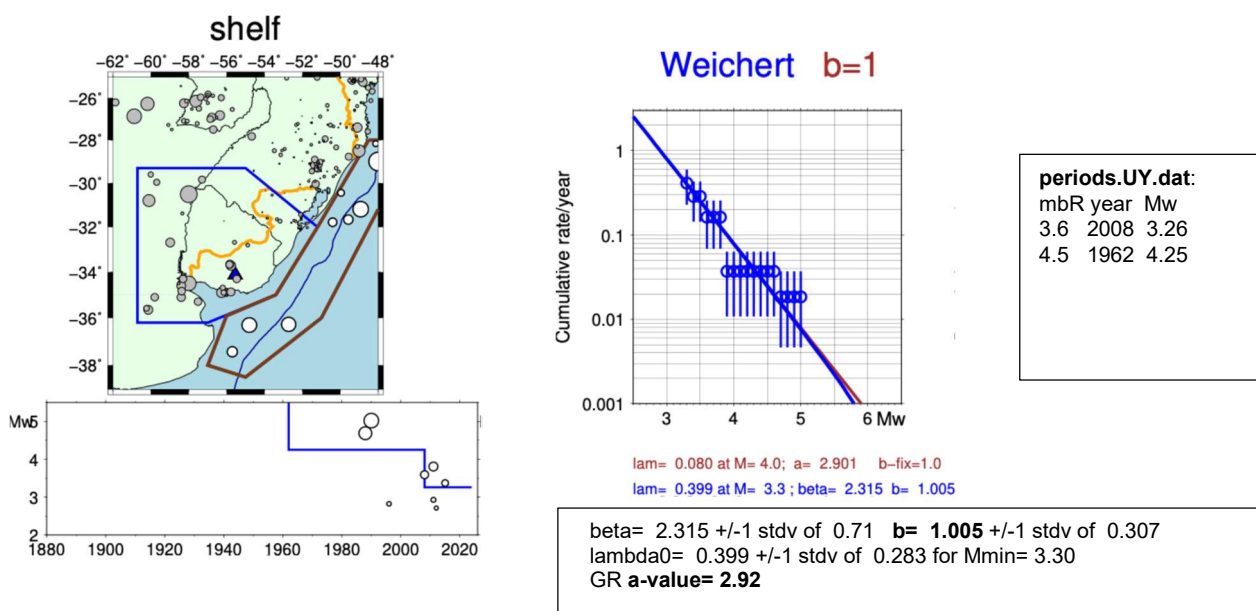


Fig.2. 3. Zona sísmica n° 2 (plataforma continental, "plataforma"). A-Top) con la zona de estantería definida por la línea marrón. A-abajo) evolución temporal de las magnitudes que muestran el limit de completitud como línea azul. Solo los eventos por encima de la línea de completitud se utilizan en la estimación de frecuencia-magnitud de Gutenberg-Richter (GR). b) Frecuencia acumulada anual de la RG: línea azul = método de Weichert; Línea marrón = valor B fijado en 1.0 para referencia. El triángulo negro es la ubicación de la presa de Casipó.



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debía a
formación de lo embalse



2.4. RIESGO SÍSMICO PROBABILÍSTICO

Todas las magnitudes mb del catálogo sísmico final se convirtieron a Mw para ser utilizadas en el cálculo de peligro. Fue utilizada la conversión mb:Mw de Assumpção et al. (2022) desarrollada para la región continental estable de Sudamérica.

Para el cálculo de la Curva de Peligro, fue utilizada las dos zonas sísmicas definidas anteriormente, junto con cuatro escenarios de "Ecuaciones de Predicción del Movimiento del Suelo" (GMPEs) consideradas más representativas de la atenuación cortical en el interior continental estable de Brasil (Collaço et al., 2026). La curva de peligro final se muestra en la Fig. 4 y los resultados principales en la Tabla 2.

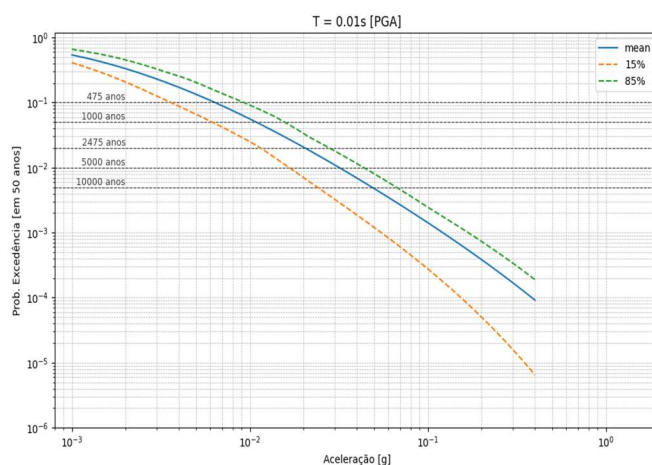


Fig. 2.4. Curva de riesgo que muestra la probabilidad de superación en 50 años para los valores de la Aceleración Máxima en Terreno (PGA). Por ejemplo, para una probabilidad de exesión del 10% en 50 años (que corresponde a un periodo de retorno de 475 años), el PGA es 0,0064 g (0,64% g). Para el periodo de retorno de 1.000 años (como empleado en la norma española) PGA = 1,1% g. Se consideró un macizo rocoso con Vs30=760 m/s (clases de suelos geotécnicos B/C).

Tabla 2.2. Resultados de PGA (Aceleración Máxima del Suelo) para un macizo rocoso con Vs30=760 m/s (suelos clase B/C, roca blanda / sedimentos duros) en la ubicación de la presa de Casipá. Estos valores de PGA consideran la ocurrencia de terremotos en cualquier punto de las dos zonas sísmicas, con cualquier magnitud.

Periodo de retorno (años):	475	1.000	2,75	50.00	10.000
PGA (g):	0.0064	0.0109	0.0205	0.0320	0.0487

Estos resultados confirman la clasificación de Uruguay como una región de baja sismicidad ("baja sismicidad") según los criterios del CNEGP (1999), que utiliza un periodo de retorno de 475 años. La norma CNEGP también considera que las presas hidroeléctricas son "estructuras especiales" y recomienda un periodo de retorno de 1.000 años para la aceleración del diseño. En este caso, se podría usar un PGA de 1,1 % g.



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para evaluar los sismos Inducidos debida a
formación de lo embalse



3. SISMICIDAD INDUCIDA POR EL EMBALSE

3.1. PROBABILIDADES DE OCURRENCIA DE SISMICIDAD INDUCIDA POR EMBALSES (RTS)

Los embalses hidroeléctricos pueden, a veces, inducir sismicidad local (por ejemplo, Gupta, 2002; Assumpção et al., 2002). En Brasil, por ejemplo, 26 embalses han provocado terremotos de hasta una magnitud de 4,2 mb. La sismicidad ocurre cuando la presión de los poros de agua del embalse se difunde hacia la masa rocosa subyacente y alcanza fallas o zonas de fractura con zonas traccionadas críticas. En la práctica, es imposible evaluar la existencia de zonas traccionadas críticas bajo un embalse. Por esta razón, no existe información geológica, geofísica ni geotécnica, previa a lo embalse que pueda utilizarse para estimar la probabilidad de que un embalse provoque terremotos. Dadas las dificultades para prever posibles eventos desencadenados, el mejor enfoque es utilizar resultados estadísticos de estudios de embalses anteriores. Las principales características de la sismicidad de embalses pueden resumirse así:

a) Altura y volumen de la presa:

La probabilidad de ocurrencia de sismicidad desencadenada por embalses aumenta con la altura de la presa (o profundidad máxima del agua) y también con el volumen del embalse. Estudios de embalses brasileños (Barros et al., 2018) indican que esta probabilidad puede ser tan alta como un 70% para presas de más de 150 m, y un 61% para $100 < \text{altura} < 150$ m. Para alturas de presas en el rango de 20-50 m (como la presa de Casupá), la probabilidad RTS es solo del 1,6%. La probabilidad también aumenta con el volumen del embalse: 0,7% para embalses pequeños ($< 1 \text{ km}^3$) al 47% para embalses muy grandes ($> 10 \text{ km}^3$). Los casos mundiales recopilados y estudiados por Baecher y Keeney (1982) indican una probabilidad del 27 % para embalses muy profundos (> 150 m) y del 11 % para profundos (> 92 m). Para un volumen de agua muy grande ($> 10 \text{ km}^3$), los casos mundiales indican una probabilidad del 12%. Las probabilidades de la compilación mundial de Baecher y Keeney (1982) son menores que las del estudio brasileño, probablemente porque solo RTS con magnitudes > 3 fueron incluidos en la compilación mundial. Barros et al. (2018), por otro lado, incluyeron casos de RTS tan bajos como magnitud 2.

b) Geología del área del embalse:

Las características geológicas del área del embalse influyen mucho menos en la probabilidad de RTS. Baecher y Keeney (1982) analizaron la geología predominante de las rocas, bajo embalses profundos o grandes, y encontraron que las probabilidades de RTS variaban desde el 19% para cuencas sedimentarias, 11% para rocas metamórficas y 14% para macizos ígneos. El estudio de embalses brasileños indicó un 4% para cuencas sedimentarias, un 3% para metamórficas y un 8% para macizo ígneo. Dada la gran variabilidad de estas estadísticas (debido a las pequeñas muestras), se concluye que las características geológicas tienen muy poca influencia en las probabilidades de RTS.

c) Magnitud máxima:

A pesar del aumento de la probabilidad de RTS con la profundidad del agua y el volumen del embalse, no existe correlación entre la magnitud máxima observada y el tamaño del embalse. Tanto los casos brasileños como otros casos mundiales (Fig. 5) muestran que embalses relativamente pequeños pueden provocar terremotos mayores y que los embalses grandes no necesariamente provocan grandes magnitudes. Sin embargo, el número de casos RTS de grandes magnitudes parece seguir una ley de Gutenberg-Richter, como se ve en la Fig. 6 (Assumpção, 2021).



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debía a
formación de lo embalse



Por otro lado, existe consenso en que el terremoto desencadenado máximo es menor que el terremoto natural regional máximo. Esta es una información útil para estimar el riesgo sísmico en casos de RTS.

d) Distancia al embalse:

El análisis de casos anteriores de RTS muestra que el epicentro del terremoto máximo puede estar dentro del embalse o a pocos kilómetros fuera del límite del embalse. En general, el evento más grande no ocurre cerca de la profundidad máxima del agua, pero puede estar más lejos de la presa. En la mayoría de los casos, el epicentro del mayor terremoto puede ocurrir hasta 20 km de la presa.

c) Hora de la ocurrencia:

Es común que la sismicidad comience poco después del llenado del embalse, lo que se denomina "sismicidad inicial". Es poco habitual que la sismicidad comience más de dos años después del llenado del embalse. Sin embargo, tras el inicio (y posible decaimiento) de esta fase inicial, es común que la sismicidad reaparezca varios años después. Esto se denomina sismicidad retardada y se atribuye al retardo temporal para que la presión del poro del agua se difunda y aumente en zonas traccionadas críticas a varios kilómetros de profundidad. La mayoría de los embalses tuvieron el mayor evento antes de los cinco años del llenado del embalse, pero en algunos casos el retraso fue de más de una década.

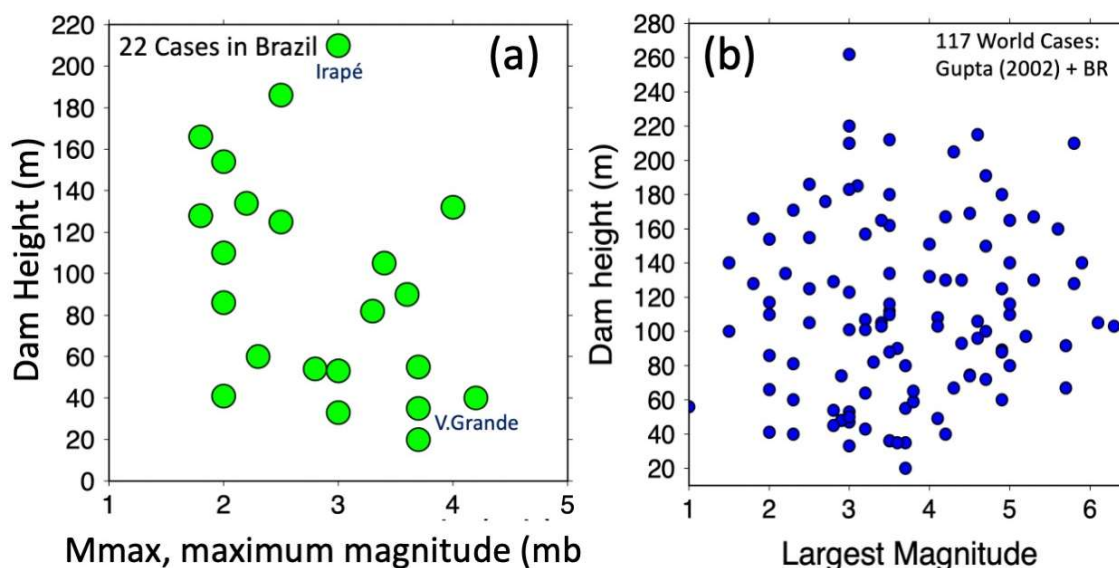


Fig. 3.1. RTS maximum magnitude (Mmax) for embalses in Brazil (a) and mundiales (b) en comparación con la altura de la presa (según Barros et al., 2018). Cabe señalar que no es posible estimar la probabilidad de Mmax a partir de la altura de la presa (o profundidad máxima del agua).



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debia a
formación de lo embalse

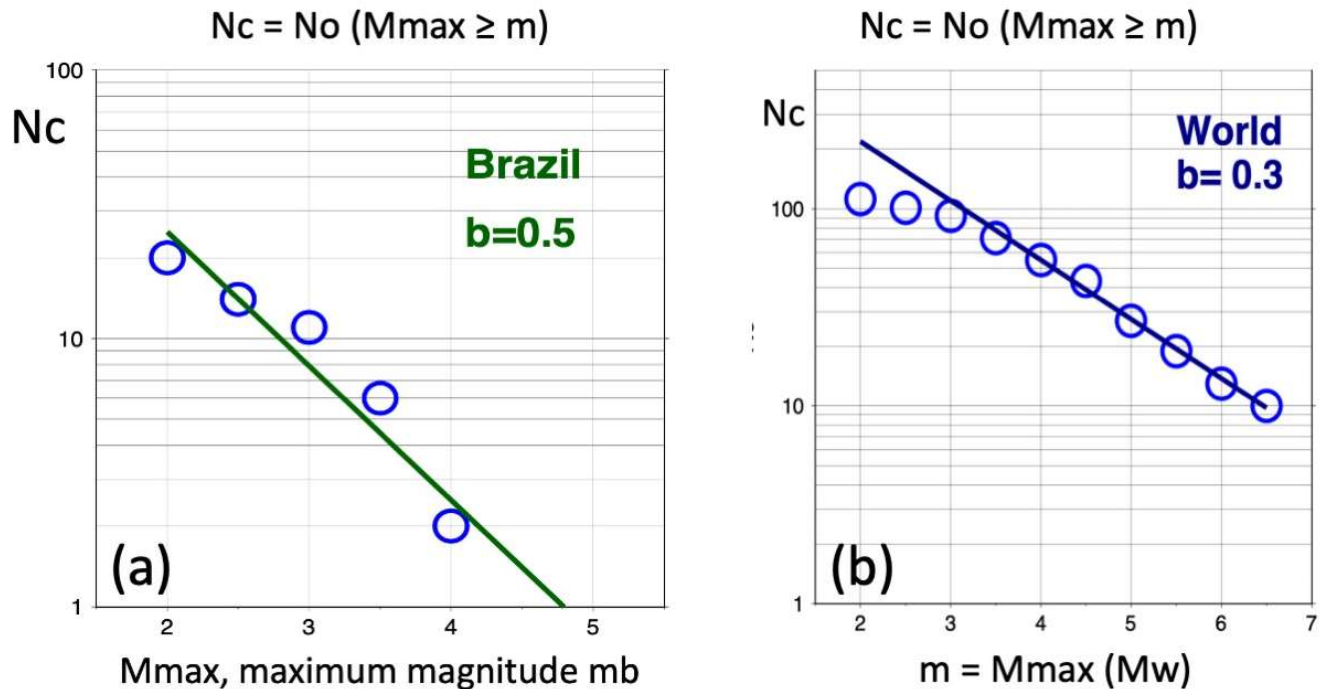


Fig. 3.2. Número acumulado de casos de RTS en función de su M_{max} . a) 22 casos brasileños, b) 117 casos de la compilación de Gupta (2002), incluyendo los 22 casos brasileños.

3.2. RIESGO SÍSMICO CAUSADO POR TERREMOTOS INDUCIDOS LOCALMENTE

El riesgo sísmico de un posible terremoto inducido puede estimarse, combinando dos factores: a) la probabilidad de que el embalse cause alguna sismicidad $\text{Prob}(\text{RTS})$, y b) dado que ocurre sismicidad, la probabilidad de máximos movimientos del terreno (PGA) en la presa.

Para el embalse de Casupá, con una presa de $\sim 30\text{m}$ de altura, la mejor estimación de la probabilidad de RTS proviene del estudio de Barros et al. (2018), que da un 1,6% de probabilidad de presas en el rango de 20-50 m. A esta probabilidad la llamamos $P(\text{RTS})$. También se podían usar otras características del yacimiento, como el volumen, pero el $P(\text{RTS})$ final no variaría demasiado. Por esta razón, tomamos

$$\text{Prob}(\text{RTS}) = 0,016 \quad (1)$$

Suponiendo que ocurra RTS, podemos calcular el peligro (probabilidad) de ciertos niveles de PGA (Aceleración Máxima del Suelo) en la presa, que llamamos $\text{Prob}(\text{PGA} | \text{RTS})$. Con las siguientes suposiciones:

- La función densidad de probabilidad de mayor magnitud, $\text{pdf}(M_{max})$, sigue una distribución de la ley de potencias de Gutenberg-Richter entre 2,0 y $M_{max-max}$. Fue definido un valor $b = 0,4$, que es un promedio de los casos brasileños y mundiales (Fig. 3.2).
- $M_{max-max}$ es la mayor magnitud RTS posible (creíble) que puede ocurrir en Uruguay. Fue estimado que el $M_{max-max}$ es de 4,7 mb. Este valor es mayor que las magnitudes máximas observadas para pequeños embalses ($20 < \text{de altura} < 40 \text{ m}$), como se ve en la Fig. 3.1. También es menor que la



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debia a
formación de lo embalse



magnitud natural máxima observada en el Uruguay continental, que fue de unos ~5 mb (véase la sección 2.2 arriba). Una magnitud de 4,7 mb corresponde a 4,5 MW. Para el cálculo de riesgos, se utiliza una magnitud mínima de 3,5 MW ("Mmin"). Esto tiene en cuenta que magnitudes menores producen vibraciones de muy corta duración y no afectan a construcciones normales en pozo, como un embalse de una presa. En países de alta sismicidad, Mmin=5.0 es comúnmente utilizado. En Brasil, Mmin=4.0 se ha utilizado para la presa de relaves. Por tanto, Mmin=3,5 para Casupá es un valor conservativo.

- c) El epicenter del mayor evento puede ocurrir hasta 15 km de la presa. Esta es aproximadamente la distancia máxima observada en casos anteriores de RTS (~20 km), tanto en Brasil como en otros lugares.
- d) Se utilizan dos ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPEs) para modelar la aceleración máxima del terreno (PGA) en función de la distancia y la magnitud: Douglas et al. (2013), derivadas para terremotos inducidos en el rango de $1,0 < M < 3,5$ a distancias entre 1,5 y 50 km, y Atkinson (2015) derivado para $3 < M < 6$, y distancias entre 3 y 40 km. Ambos GMPE se derivaron para un macizo rocoso con $V_{s30}=760$ m/s (Clase Geotécnica B/C), que es adecuado para el basamento de la presa Casupá formado por roca. Fueran utilizados los valores PGA de Douglas et al. (2013) para $2,0 \leq M_w < 3,0$, y de Atkinson (2015) para $4,0 < M_w \leq 4,5$, y la media de ambos para $3,0 \leq M_w \leq 4,0$.

Se realizó un análisis probabilístico combinando las probabilidades de Mmax, las probabilidades de distancias a la presa y las probabilidades de superar ciertos niveles de PGA. La curva final de peligro para el Prob(PGA | RTS) se multiplica entonces por el Prob(RTS), 1,6%, y se muestra en la Fig. 3.3.

La norma española (CNEGP, 1999) recomienda el uso de un periodo de retorno de 1.000 años para terremotos naturales, lo que corresponde a ~5% de probabilidad de superación en 50 años. Esto equivale a ~2% en 20 años, el mayor retraso de aparición de sismicidad inducida. La curva de riesgo de la Fig. 3.3 muestra que $PGA = 1\%$ g tiene una probabilidad de ser superada de solo el 0,2%. Esto significa que las altas aceleraciones ($PGA > 1\%$ g) derivadas de terremotos inducidos extremadamente improbables y el riesgo RTS es incluso menor que el de los terremotos naturales.

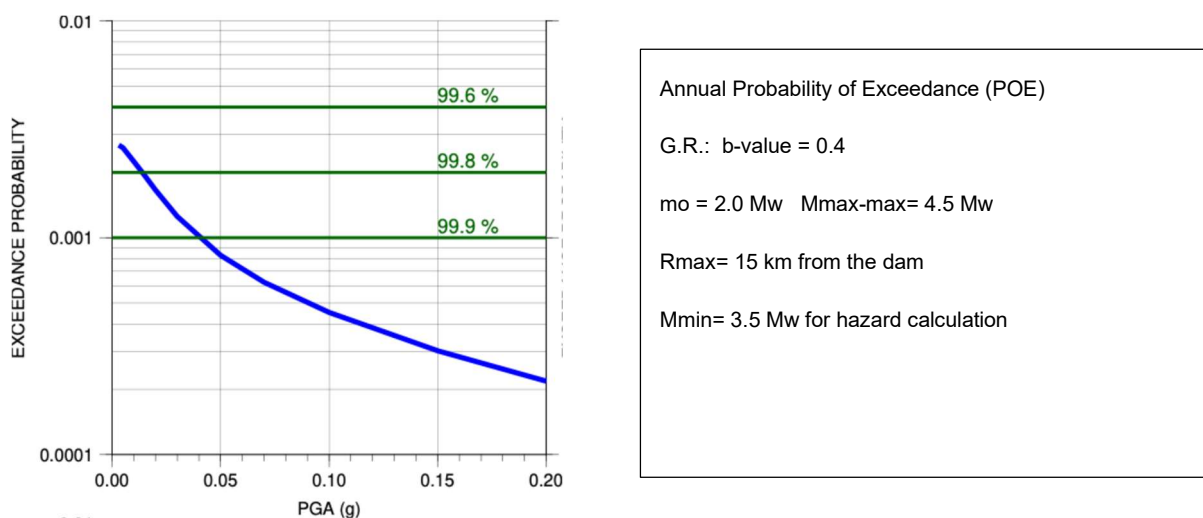


Fig. 3.3. Curva de peligro para la Aceleración Máxima en Tierra (PGA): probabilidad anual de superación para aceleraciones en la presa debido a la mayor magnitud creíble desencadenada. Curva de peligro calculada para eventos de hasta 15 km de distancia, Mmax siguiendo una función de densidad de probabilidad GR con valor $b = 0,4$ entre 2,0 y 4,5 Mw. Para el cálculo de peligro,



Mmin= 3.5 Mw (sin daño para magnitudes menores). Las líneas verdes horizontales indican las probabilidades de no superación (es decir, nivel de seguridad).

3.3. MONITOREO SÍSMICO

Aunque las probabilidades de que ocurra una sismicidad inducida son muy bajas debido a la baja altura de la presa (solo 1,6%), se recomienda instalar al menos una (o idealmente tres) estaciones de monitoreo cerca del embalse. El monitoreo de la posible microsismicidad local podría realizarse en coordinación con otras estaciones de la red permanente uruguaya, como la estación FLFL (Florida, a 60 km). Se pueden enumerar las siguientes razones para justificar lo monitoreo sísmico local.

- a) Microsismicidad (magnitudes < 2) puede ocurrir durante el llenado del embalse. Idealmente, uno o dos años de monitorización antes del embalse son útiles para demostrar si ya existe sismicidad natural local antes del relleno del embalse, lo que ayuda a distinguir entre eventos inducidos y naturales.
- b) Incluso pequeños terremotos pueden sentirse por la población cercana al epicentro. Aunque los pequeños eventos no suponen ningún peligro, la imagen pública de la empresa hidroeléctrica o de otros funciones puede verse gravemente afectada si se percibe que la empresa no se cuida o no puede responder a las preguntas de la sociedad. Los terremotos inducidos tienden a ocurrir como una larga serie de pequeños eventos, lo que puede ser una molestia para la población cercana y aumentar la preocupación. Muy a menudo, solo la información oficial sobre los epicentros y magnitudes es suficiente para aclarar las preocupaciones de la población.
- c) En Brasil, todas las nuevas presas deben instalar al menos una estación sísmica de monitorización.

Las estaciones sísmicas por instalar pueden tener sismómetros de corto periodo, que no requieren una instalación costosa. Una buena opción de coste-beneficio para las emisoras locales es el sismómetro Raspberry Shake 3D (RS3D), un instrumento “plug-and-play”, e tres componentes (vertical, norte-sur y este-oeste) basada en sensores de geófonos, con muestreo de 100 SPS y precisión de milisegundos, compatible con sistemas de alerta temprana de terremotos y fácilmente integrada en redes existentes a través de “SeedLink”. Su instalación es sencilla y no requiere una bóveda ni una infraestructura civil sofisticada, lo que reduce significativamente los costes de despliegue en el campo en comparación con los sismómetros convencionales de banda ancha. Como es un dispositivo basado en electrónica de consumo (construido sobre un Raspberry Pi), se recomienda comprar dos unidades adicionales más allá de las tres estaciones previstas, para servir como repuestos: según la experiencia de campo, las unidades RS3D tienden a ser más frágiles respecto a fluctuaciones de potencia, humedad y picos de voltaje, y pueden fallar — especialmente durante monitorizaciones continuas a largo plazo (que superan un año). Como se propone aquí, para caracterizar la sismicidad de fondo antes de la retención del embalse. Incluso incluyendo estas dos unidades de repuesto, el coste total del paquete RS3D sigue siendo considerablemente menor que el de un solo sismómetro convencional de banda ancha, lo que convierte esta estrategia de redundancia en una forma eficiente de garantizar la disponibilidad continua de datos sin un aumento significativo del presupuesto total del proyecto.

La Fig. 3.4 a continuación muestra una posible configuración de tres estaciones alrededor de la parte más profunda del embalse, hasta 5-8 km de la presa.



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debia a
formación de lo embalse

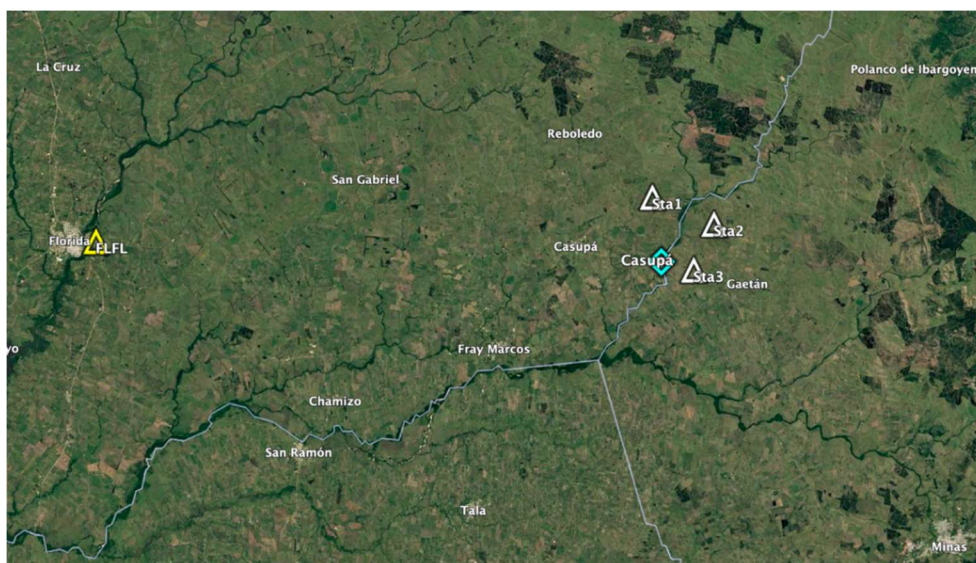


Fig. 3.4. Ubicación sugerida de una red local de 3 estaciones (Sta1,2,3) para monitorizar las eventual microsismicidad que pueda ocurrir durante el llenado del embalse de la presa de Casupá. El monitoreo sísmico podría complementarse con la estación FLFL (Florida, del Observatorio Geofísico UDELAR) a 60 km de distancia en caso de que ocurran magnitudes > 1.

4. CONCLUSIONES

El catálogo revisado de terremotos confirmó el carácter intraplaca de "baja sismicidad" de Uruguay. La aceleración máxima (PGA) con un periodo de retorno de 1.000 años (según la norma española) es de 1,1% g.

El riesgo de grandes aceleraciones por posible sismicidad inducida por el embalse es aún menor. Un PGA del 1% g tiene una probabilidad de solo 0,2 %. Es decir, hay un 99,8% de confianza en que ningún PGA provocado por llenado del embalse superior al 1% g ocurrirá en los primeros 20 años tras el embalse.

Aunque es poco probable que ocurra la sismicidad inducida debido la formación de lo embalse dela Presa de Casupá, la población puede sentir pequeños eventos que justifican la operación de al menos una estación sísmica. Se podría establecer una cooperación con el Observatorio Geofísico UDELAR para una monitorización conjunta utilizando hasta tres estaciones locales y algunas otras de la Red Sísmica Permanente de Uruguay.

5. REFERENCIAS

Almeida, A.A.D., M. Assumpção, J.J. Bommer, S. Drouet, C. Riccomini, and C.L.M. Prates, 2019. Probabilistic seismic hazard analysis for a nuclear power plant in SE Brazil. *J. of Seismology*, 23, 1-23. Doi: 10.1007/s10950-018-9755-8.

Assumpção, M., 1998. Seismicity and stresses in the Brazilian passive margin. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88(1), 160-169.



Assumpção, M., V. Mârza, L. Barros, C. Chimpliganond, J.E. Soares, J. Carvalho, D. Caixeta, A. Amorim & E. Cabral, 2002. Reservoir induced seismicity in Brazil. *Pure Appl. Geophys.*, 159, 597-617. DOI: [10.1007/PL00001266](https://doi.org/10.1007/PL00001266)

Assumpção, M., J. Ferreira, L. Barros, F.H. Bezerra, G.S. França, J.R. Barbosa, E. Menezes, L.C. Ribotta, M. Pirchiner, A. Nascimento, J.C. Dourado, 2014. Intraplate Seismicity in Brazil. In *Intraplate Earthquakes*, chapter 3, ed. P. Talwani, Cambridge U.P., ISBN 978-1-107-04038-0.

Assumpção, M., 2021. Reservoir-triggered seismicity in Brazil: How safe are we after 50 years of studies? *Jornada Técnica, 60 anos do CBDB - Barragens de Aterro: Zoneamento, Fundações, Interfaces, Segurança. Comitê Brasileiro de Barragens, Abstract.*

Assumpção, M., J.M. Carvalho, F.L. Dias, S. Drouet, J.R. Barbosa, M.B. Bianchi, B. Collaço, 2022. Magnitude relations between the teleseismic m_b , the regional m_R and M_w for intraplate earthquakes in Brazil. *J. South Am. Earth Sci.*, 120, 104038. Doi: 10.1016/j.jsames.2022.104038

Atkinson, G.M., 2015. Ground-motion prediction equation for small-to-moderate events at short hypocentral distances, with application to induced-seismicity hazards. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 981-992.

Baecher, G. B., and R. L. Keeney, 1982. Statistical examination of reservoir-induced seismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 72(2), 553–569.

Baxter, P., Bettucci, L.S. and Costa, C.H., 2021. Assessing the earthquake hazard around the Río de la Plata estuary (Argentina and Uruguay): Implications for risk assessment. *Journal of South American Earth Sciences*, 112, p.103509.

Barros, L.V., Assumpção, M., Ribotta, L.C., Ferreira, V.M., de Carvalho, J.M., Bowen, B.M. and Albuquerque, D.F., 2018. Reservoir-triggered seismicity in Brazil: Statistical characteristics in a midplate environment. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 108(5B), 3046-3061. Doi: [10.1785/0120170364](https://doi.org/10.1785/0120170364)

Benavidez-Sosa, A., 1998. Sismicidad y sismotectónica en Uruguay. *Física de la Tierra*, 10, pp.167-186.

Collaço, B., M. Assumpção, L. Assis, and M. Simão, 2026. A Brazilian Seismic Acceleration Database and GMPE Weighting for PSHA Studies. *J. of Seismology*, in review.

CNEGP, 1999. Guías Técnicas de Seguridad de Presas - Estudios Geológicos-Geotécnicos y de Prospección de Materiales. Comité Nacional Español de Grandes Presas.

Douglas, J., Edwards, B., Convertito, V., Sharma, N., Tramelli, A., Kraaijpoel, D., Cabrera, B.M., Maercklin, N. and Troise, C., 2013. Predicting ground motion from induced earthquakes in geothermal areas. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3), 1875-1897.

Engecorps, 2017. Servicios de Consultoría para Elaborar el Proyecto Básico y los Documentos de Licitación para la Posterior Construcción de la Presa del Arroyo Casupá. Anejo 4. Estudio Geológico Geotécnico Report OH2260-6-GE-AX4-Estudio_Geol_Geot-Ed1.pdf

Gupta, H.K., 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews* 58, 279–310.



Proyecto Ejecutivo

Estudios Sismológicos para avaliar los sismos Inducidos debía a
formación de lo embalse



Pagani, M. et al. The 2018 version of the Global Earthquake Model: Hazard component. *Earthquake Spectra*, v. 36, 1_suppl, p. 226–251, 2020. doi: [10.1177/8755293020931866](https://doi.org/10.1177/8755293020931866).

Petersen MD, Harmsen SC, Jaiswal KS, Rukstales KS, Luco N, Haller KM, Mueller CS, Shumway AM, 2018. Seismic hazard, risk and design for South America. *B. Seismol.. Soc Am.*, 108(2):781-800. <https://doi.org/10.1785/0120170002>.

Sánchez-Betucci, L., Loureiro, J., Castro, H., Baxter, P., Rodríguez, M., Dell'Acqua, D., Mazza, A., Demarco, P.N., Curbelo, A. and Latorres, E., 2022. Primer catálogo de la actividad sísmica en Uruguay y la Cuenca del Río de la Plata. *Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología*, 25, 52-74.

Sánchez-Bettucci, L., Kacevas, M.R., Castro, H., Olivet, J.L. and Latorres, E., 2025. Summary of the intracontinental seismicity of Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences*, 161, p.105578.

Shedlock, K.M., and G. Tanner, 1999. Seismic hazard map of the western hemisphere. *Annali di Geofisica*, 42(6), 1199-1214