

**Sismicidad desencadenada por embalses Análisis de Casos Recientes**

**Leidy Carolina Luna Navas**

**Trabajo de grado para optar título de Especialista Estructural**

**Director:**

**Álvaro Viviescas Jaimes**

**Ph.D. en Ingeniería de la Construcción**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Especialización en Estructuras**

**Bucaramanga**

**2017**

**Dedicatoria**

*Dedicado a mi familia, mis padres, mi esposo y en especial mi hija Salomé, quienes con su ayuda, perseverancia y motivación me permitieron realizar esta monografía para obtener el título de Especialista Estructural, un logro que he anhelado para continuar mi crecimiento profesional y personal*

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivo.....	12
1.1 Objetivo General.....	12
1.2 Objetivo Específico.....	12
2. Marco Teórico.....	13
2.1 Sismos y sus componentes.....	13
2.1.1 Causas .....	13
2.1.2 Componentes.....	14
2.1.3 Magnitud de un sismo.....	15
2.2 Desencadenamiento sísmico embalses (RTS) .....	16
2.2.1 ICOLD .....	18
3. Casos antiguos de RTS .....	19
4. Casos recientes de RTS.....	24
4.1 Embalse Koyna y Warna (India): .....	25
4.2 Embalse de Govind Ballav Pant (India).....	30
4.3 Presa de las tres gargantas (TGS), China.....	33
4.4 Presa Zipingpu (China).....	35
4.4 Hidroeléctrica Song Tranh 2 (ST2) (Vietnan) .....	39

---

4.6 Presa de Enciso, España.....	40
4.7 Embalse de Itoiz, Navarra, España .....	41
4.5 Embalse de Camiña (Chile) .....	42
5. Comparativo causas naturales vs RTS .....	44
6. Conclusiones .....	45
Referencias Bibliográficas .....	47

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Puntos clave de un sismo .....	15
<i>Figura 2.</i> Epicentros de sismos de magnitud mayores de 4 desde 1963, Koyna.....	16
<i>Figura 3.</i> Cantidad de embalses con RTS (1933 – 1997).....	23
<i>Figura 4.</i> Eventos sísmicos en Europa (1950-2013) .....	25
<i>Figura 5.</i> Falla, lineamientos y actividad sísmica en la región de Koyna-Warna, .....	29
<i>Figura 6.</i> Embalse Govind Ballav Pant, India.....	30
<i>Figura 7.</i> Características tectónicas de la Región Narmada-Son y Tapti .....	32
<i>Figura 8.</i> Embalse de las tres gargantas, China.....	33
<i>Figura 9.</i> Presa de tres gargantas, China .....	34
<i>Figura 10.</i> Embalse de Zipingpu, China.....	36
<i>Figura 11.</i> Red sísmica local de Zipingpu.....	38
<i>Figura 12.</i> Embalse de Enciso, España .....	41
<i>Figura 13.</i> Embalse de Itoiz, España.....	42
<i>Figura 14.</i> Epicentros de sismos ocurridos entre 1900 a 2012 en la zona de estudio. ....	43

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Casos antiguos RTS, Tomado de H.K. Gupta / Earth-Science Reviews 58 (2002) 279–310</i> .....	20
Tabla 2 <i>Cronologia acontecimientos importantes caso de Koyna y Warna</i> .....	26

## Resumen

**Título:** Sismicidad desencadenada por embalses, análisis de casos recientes\*

**Autor:** Leidy Carolina Luna Navas\*\*

**Palabras Claves** Sismicidad desencadenada por embalses, presión de poros, falla geológica, embalse

### Descripción:

La presente monografía recopila información de la literatura científica internacional para estudiar los últimos aportes a la comprensión de la Sismicidad desencadenada por embalses con lo cual se realiza un estado del arte de investigaciones más recientes.

Actualmente la Sismicidad desencadenada por embalses es un tema muy debatido en el mundo, ya que NO hay un modelo único que determine la génesis del fenómeno. Es también un fenómeno que no ha sido confirmado en Colombia, sin embargo, es nuestro deber estudiar y documentar el tema, para así poder monitorear y controlar los 26 embalses principales de Colombia que hoy en día sirven para la generación de energía hidroeléctrica, almacenamiento y suministro de agua potable, riego agrícola, control de inundaciones y regulación de avenidas torrenciales.

El estudio de la actividad sísmica en zonas de embalse es una hipótesis que se ha venido discutiendo desde la década de 1930, tomando mayor relevancia después de haber observado la ocurrencia de los eventos en otros lugares del mundo como Koyna (India), Aswan (Egipto), Oroville (USA) y Kariba (Zambia-Zimbabwe) entre otros. Aunque el caso del sismo de Koyna ha sido el más relevante por su magnitud (M6.5) y el más destructor, en este estudio confirmamos que no ha habido ningún otro caso semejante a este.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras, Director Álvaro Viviescas Jaimes

## Abstract

**Title:** Reservoir triggered Seismicity, recent case analysis \*

**Author:** Leidy Carolina Luna Navas \*\*

**Keywords:** Reservoir Triggered Seismicity (RTS), pore pressure, geological fault, water table, reservoir.

### Description:

This monograph compiles information from the international scientific literature to study the latest contributions to the understanding of Reservoir Seismicity triggered with which a state of the art of more recent investigations is realized.

Currently Reservoir Triggered Seismicity is a much debated topic in the world, since there is no single model that determines the genesis of the phenomenon. It is also a phenomenon that has not been confirmed in Colombia, however, it is our duty to study and document the subject, in order to be able to monitor and control the 26 main reservoirs of Colombia that nowadays serve for the generation of hydroelectric energy, storage and supply of drinking water, agricultural irrigation, flood control and regulation of torrential floods.

The study of seismic activity in reservoir zones is a hypothesis that has been discussed since the 1930s, taking more relevance after observing the occurrence of events in other parts of the world such as Koyna (India), Aswan (Egypt), Oroville (USA) and Kariba (Zambia-Zimbabwe), among others. Although the case of the Koyna earthquake has been the most relevant because of its magnitude (M6.5) and the most destructive, in this study we confirm that there has been no other case similar to this.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Engineering Physical Mechanical. School of Engineering Civil. Specialization Structural Director:  
Álvaro Viviescas Jaimes

## Introducción

En la actualidad, debido al crecimiento de la población en Colombia, ha habido un aumento en la construcción de embalses para el abastecimiento de agua y producción de energía mediante hidroeléctricas, a causa de ello, hay una gran incertidumbre respecto a los efectos colaterales de estas mega estructuras que según la literatura científica internacional pueden acelerar y afectar la sismicidad local, desencadenando sismos de magnitudes considerables. (Gupta H. K., 2001) (Shashidhar, 2012) (McGarr A. a., 1997). Por lo anterior, en este documento se presenta un estudio del arte de casos más recientes de investigaciones de embalse donde se ha presentado o estudiado este fenómeno, como también, posibles alertas que los nuevos investigadores e ingenieros deben tener en cuenta en la planificación y posterior construcción, garantizando la seguridad de la población aguas abajo de la presa.

El estudio tiene como propósito documentar los embalses que han sido objeto de estudios por desencadenamiento de movimientos sísmicos en los últimos años (15 años), investigar e identificar los procesos físicos asociados a este fenómeno y corroborar las afirmaciones que indican que “el llenado de un embalse puede modificar la distribución de esfuerzos en la corteza a través del efecto de carga de la columna de agua y por el incremento de la presión de poros” (Lindo, 1996). Conviene aclarar que este tema es estudiado y registrado en su mayoría cuando ocurren los hechos, sin embargo, es indispensable el análisis de estudios sismo tectónicos previos del área a intervenir ya que estos determinan su confiabilidad y seguridad al momento de diseñar y construir un embalse. Es por esto, que surge la necesidad de reunir información idónea para comparar e

identificar las posibles características típicas de un embalse propenso a desencadenar sismos, el cual contribuye a valorar este fenómeno mediante vivencias y experiencias ocurridas en diferentes partes del mundo. (McGarr A. a., 1997) (Gupta H. , 2002)

## **1. Objetivo**

### **1.1 Objetivo General**

Estudiar el fenómeno de la sismicidad desencadenada por embalses a partir de las evidencias reportadas en la literatura científica en los últimos 15 años.

### **1.2 Objetivo Específico**

- Relacionar los sismos más sobresalientes desencadenados por embalses reportados en la literatura científica.
- Comparar las causas sísmicas naturales con las desencadenadas por embalses.
- Identificar las condiciones típicas de embalses donde se ha evidenciado el fenómeno

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Sismos y sus componentes

Antes de estudiar el desencadenamiento sísmico por embalses, es importante conocer los sismos y sus componentes. La actividad sísmica es la consecuencia del fenómeno de estudio, definido como: “el proceso geofísico que se desarrolla en la corteza terrestre por el que se modifica su conformación y se libera la energía acumulada en sus estados de tensión y deformación generados por interacciones entre sus componentes” (Carmona, 2011). No solo la interacción entre placas tectónicas es la principal causa de los sismos, cualquier proceso que pueda lograr grandes concentraciones de energía en las rocas puede generar sismos cuyo tamaño dependerá, entre otros factores, de qué tan grande sea la zona de concentración del esfuerzo.

**2.1.1 Causas** Las causas más generales de un sismo, se pueden enumerar según su orden de importancia como se relacionan a continuación: (Astronomía, 2013):

- **TECTÓNICA:** son los sismos que se originan por el desplazamiento de las placas tectónicas que conforman la corteza, afectan grandes extensiones y es la causa que más genera sismos.
- **VOLCÁNICA:** es poco frecuente; cuando la erupción es violenta genera grandes sacudidas que afectan sobre todo a los lugares cercanos, pero a pesar de ello su campo de acción es reducido en comparación con los de origen tectónico.

- **HUNDIMIENTO:** cuando al interior de la corteza se ha producido la acción erosiva de las aguas subterráneas, va dejando un vacío, el cual termina por ceder ante el peso de la parte superior. Es esta caída que genera vibraciones conocidas como sismos. Su ocurrencia es poco frecuente y de poca extensión.
- **DESLIZAMIENTOS:** el propio peso de las montañas es una fuerza enorme que tiende a aplanarlas y que puede producir sismos al ocasionar deslizamientos a lo largo de fallas, pero generalmente no son de gran magnitud.
- **ACTIVIDADES ANTRÓPICAS:** realizadas por el ser humano y que al parecer tienen una relación con los movimientos sísmicos, entre ellas se encuentra las explosiones atómicas.

**2.1.2 Componentes.** Para examinar un sismo es importante conocer sus componentes, el punto donde comienza la ruptura o falla, se llama *hipocentro*, el punto de la superficie terrestre localizado inmediatamente arriba de él se llama *epicentro* y se llama *foco sísmico* al hipocentro y la zona de ruptura, donde ocurre la liberación de energía. Adicionalmente, conociendo los conceptos anteriores, se identifican los sismos *someros*, aquellos que ocurren a una profundidad menor de 60 km, los sismos *profundos* a más de 300 km de profundidad y de profundidad intermedia en el resto de los casos. A veces se emplea el término profundidad normal para indicar entre 30 y 60 km (Richter, 1985)



Figura 1. Puntos clave de un sismo.

Nota, Adaptado de: (Astromía, 2017)

**2.1.3 Magnitud de un sismo.** “La magnitud de un sismo es un número que busca caracterizar el tamaño de un sismo y la energía sísmica liberada”. (Geofísica UNAM, 2017).

Un sismo de gran magnitud puede afectar más la superficie terrestre si el *epicentro* u origen del mismo se encuentra a menor profundidad. La destrucción de ciudades no depende únicamente de la magnitud del fenómeno, sino también de la distancia a que se encuentren del mismo, de la constitución geológica del subsuelo y de otros factores, entre los cuales hay que destacar las técnicas de construcción empleadas (Astromía, 2017).

Según la literatura científica, cuando se presenta un desencadenamiento sísmico por embalse, los eventos (microsismos) aumentan a medida que avanza el llenado del mismo y la ocurrencia de un sismo de gran magnitud aumenta cuando el embalse alcanza la cota máxima de llenado (A. McGarr, 2002) (Gupta H. , 1992). Para ejemplificar mejor la afirmación anterior, se destaca el embalse de Koyna situado cerca de Koynanagar, una presa importante con una altura de 103 m construido sobre el río Koyna, que durante 38 años, se registraron 15 sismos de magnitudes mayores de 5, siendo el evento más grande reconocido como RTS (Desencadenamiento sísmico por embalse, siglas en Inglés) de magnitud 6.3 ocurrido en diciembre de 1967 (Gupta H. K., 2001)

(Sholz, 2002). Como se puede observar en la siguiente figura 2 se presentan los registros con magnitudes mayores a 4 entre el embalse de Warna y Koyna reportados en el estudio hecho por Gupta en el año 2001. Es importante mencionar que según las investigaciones los sismo ocurrieron en una pequeña área de 30 x 15km<sup>2</sup>, no habiendo otra actividad sísmica en sus alrededores (Gupta H. R., 1997)

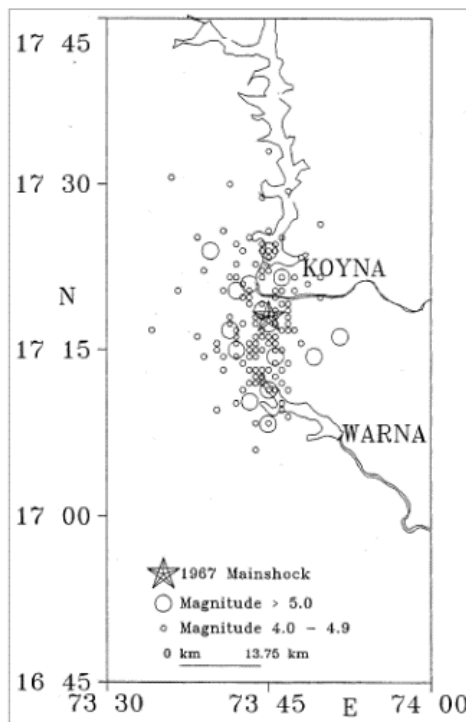


Figura 2. Epicentros de sismos de magnitud mayores de 4 desde 1963, Koyna.

Nota: Adaptado de: (Gupta H. K., 2001)

## 2.2 Desencadenamiento sísmico embalses (RTS)

Inicialmente los casos con el fenómeno RTS, eran estudiados presumiendo hipótesis mediante evidencias casuales y comparando experiencias entre embalses, argumentando que el llenado de un embalse produce un aumento de carga estática y de presión de poro, equivalente a la

profundidad del agua (Snow, 1972) (McGarr A. a., 1997). Así, por ejemplo, se estima que en un embalse donde se alcancen los 100 metros de altura de agua, se produce un aumento del esfuerzo vertical y un incremento de la presión de poro bajo el embalse, que puede llegar a ser de 1 MPa. (McGarr A. a., 1997) (Simpson, 1986) (Gupta H. , 2002)

Los procesos físicos considerados hoy en día como las causas del fenómeno RTS, son los que aparecen durante el llenado del embalse que puede modificar la distribución de esfuerzos en la corteza a través de dos mecanismos, el efecto de carga de la columna de agua (Rajendran, 1992) y el incremento de la presión de poros (Talwani, 1985) (Simpson, 1986) (Gupta H. , 1992). El efecto de carga (respuesta rápida), se da cuando el llenado alcanza la máxima altura del embalse, en cambio el incremento en la presión de poros se da a largo plazo. (McGarr A. a., 1997). Estos dos mecanismos son variables dependiendo el régimen de esfuerzos existentes que pueden cambiar según el suelo estudiado. (Lindo, 1996)

Los adjetivos “inducido o desencadenado” fueron a menudo empleados indistintamente cada vez que se hablaba de estimulación artificial, es por ello, que se estandarizó el uso en la literatura científica a partir de año 2002, fecha en la cual el Gupta (2002) , acepta y sigue la clasificación propuesta por McGarr and Simpson (1997) para referirse adecuadamente cuando se habla de un fenómeno RTS, quedando establecido que la "Sismicidad desencadenada" sólo se utilizará cuando una pequeña fracción de los cambios de estrés o la energía de sismos se explica por la actividad causal y se utilizará la "sismicidad inducida" cuando la actividad causante es responsable de la mayor parte de cambios de estrés o la mayor parte de la energía necesaria para sismos. (McGarr A. S., 1997) (Gupta H. , 2002).

**2.2.1 ICOLD** La organización internacional no gubernamental más influyente para el intercambio de conocimiento y experiencia en la ingeniería de presas, es llamado Comisión internacional de grandes presas (ICOLD, siglas en ingles), esta agrupación puso su atención en los estudios RTS desde 1969, presentando las actividades de la UNESCO, en el congreso de Nueva Delhi (1979), permitiendo reconocer el fenómeno RTS como el marco predominante de condiciones sismotectónica para cada diseño de embalses. Es así como anualmente, ICOLD publica boletines, realiza simposios y congresos que alimentan el estado del arte y estudia todos los mecanismo y aspecto importantes para identificar el fenómeno.

Según estudios encontrados en la literatura científica, anteriormente había una reluctancia en general por parte el Comité de Ingeniería para aceptar el significado o incluso la existencia del fenómeno de la sismicidad provocada por embalses (Allen, 1974) (Simpson, 1986). Sin embargo, en el informe del Comité de grandes presas en Estados Unidos (USCOLD, 1997) , se concluyó confirmando las afirmaciones respecto al aumento en la ocurrencia de sismicidad (RTS) durante el período de llenado del embalse y la probabilidad de sufrir este fenómeno en represas con alturas mayores 80 metros de alturas. Adicionalmente, desde 1990, se han generado una gran cantidad de artículos entre los cuales se destacan (Gupta H. , 1992), (Knoll, 1996), (Talebi, 1998), lo cuales han sido la base para los debates y sinopsios que se han organizado a lo largo de los años.

### 3. Casos antiguos de RTS

Los registros más antiguos de RTS, datan de 1932 con la construcción de la presa de Oued Fodd, en Argelia, seguido del embalse de Lake Mead en Colorado, USA, estudiado por Carder (1945), y tres décadas más tarde, en 1964, con el embalse de Koyna, India, documentado en el numeral 4.1, el cual presentó una serie de grandes y pequeños sismos, que por las inmediaciones de los embalses Koyna y Warna desencadenaron el terremoto más devastador en la historia del fenómeno RTS a finales de 1967 de magnitud de M6.3 (Cacho, 2013), (Shashidhar, 2012) (Gupta H. , 2002). En adición a lo anterior, en India fueron reportados otros siete embalses igualmente con RTS y cuatro más están en investigación, siendo este país uno de los más estudiados por la coincidencia entre los casos. (Gupta H. , 2002) (Kalpna Gahalaut, 2007).

A parte de los embalses de Koyna y Warna, los casos antiguos de RTS más sobresalientes, que alcanzan alturas mayores de 100 m y han sufrido terremotos con magnitudes superiores a 6, son: el embalse de Kariba, Zambia y Zimbabwe; el embalse de Kremasta, Grecia, y el embalsede Hsinfengkiang, China (PRC). (Gupta H. , 1992) (Lei X. , 2011).

Cabe mencionar otro ejemplo particular de RTS, con el embalse de Toktogul en Kirghizia: en el año 1979, en donde el número de terremotos aumentó notablemente cuando el nivel del agua sobrepasó los 100 m, una clara representación de los efectos de carga sobre el embalse (Yunga, 1996) (Gupta H. , 1992).

Recopilando información idónea se tomó como referencia el estudio realizado por Gupta (2002), la cual se presenta en la siguiente tabla 1, el listado de embalses reportados con RTS a

nivel mundial desde 1933 hasta 1997 en orden de mayor magnitud de sismo e importancia. (Gupta H. , 2002).

Tabla 1.

*Casos antiguos RTS, Tomado de H.K. Gupta / Earth-Science Reviews 58 (2002) 279–310*

Nombre	País	Altura (m)	Volumen (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Año entrega para operación	Año sismo	Magnitud
<b>Koyna</b>	India	103	2780	1962	1967	6.3
<b>Kremasta</b>	Grecia	160	4750	1965	1966	6.2
<b>Kariba</b>	Zambia	128	175 000	1958	1963	6.2
<b>Hsinfengkiang</b>	China (PRC)	105	13 896	1959	1962	6.1
<b>Srinagarind</b>	Tailandia	140	11 750	1977	1983	5.9
<b>Marathon</b>	Grecia	67	41	1929	1938	5.7
<b>Oroville</b>	USA	236	4400	1967	1975	5.7
<b>Aswan</b>	Egipto	111	164 000	1964	1981	5.6
<b>Charvak</b>	Uzbekistán	148	2000	1971	1977	5.3
<b>Pieve de Cadore</b>	Italia	116	69	1949	1950	5.0
<b>Capivari–Cachoeira</b>	Brasil	58	180	1970	1971	5.0
<b>Geheyan</b>	China (PRC)	151	3400	1993	1997	5.0
<b>Bajina Basta</b>	Yugoslavia	90	340	1966	1967	5.0
<b>Eucumbene</b>	Australia	116	4761	1957	1959	5.0
<b>Benmore</b>	New Zelanda	110	2040	1964	1966	5.0
<b>Hoover</b>	USA	221	36 703	1935	1939	5.0
<b>Warna</b>	India	80	1260	1987	1993	5.0
<b>Disposal Wells,</b>	USA				1986	5.0
<b>Monteynard</b>	Francia	155	275	1962	1963	4.9
<b>Grandval</b>	Francia	88	292	1959	1963	4.9
<b>Aksombo Main</b>	Ghana	134	148 000	1964	1964	4.9
<b>Bhatsa</b>	India	88	947	1981	1983	4.9
<b>Kurobe</b>	Japón	186	149	1960	1961	4.9
<b>Hoa Binh</b>	Vietnam	125		1988	1989	4.9
<b>Kerr</b>	USA	60	1505	1958	1971	4.9

Nombre	País	Altura (m)	Volumen (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Año entrega para operación	Año sismo	Magnitud
Lake Baikal	Rusia					4.8
Shenwo	China (PRC)	50	540	1972	1974	4.8
Danjiangkou	China (PRC)	97	16 000	1967	1973	4.7
Canelles	España	150	678	1960	1962	4.7
Kastraki	Grecia	96	1000	1968	1969	4.6
Nurek	Tayikistan	317	1000	1972	1972	4.6
Lake Pukaki	Nueva Zelanda	106	9000	1976	1978	4.6
Dahua	China (PRC)	74.5	420	1982	1993	4.5
Foziling	China (PRC)	74	470	1954	1973	4.5
Vouglans	Francia	130	605	1968	1971	4.4
Piastra	Italia	93	13	1965	1966	4.4
Clark Hill	USA	60	3517	1952	1974	4.3
P. Colombia/V. Grande	Brasil	40/56	1500/2300	1973 – 1974	1974	4.2
Komani	Albania	130	1600	1985	1986	4.2
Bratsk	Rusia	100	169		1996	4.2
Manicouagan 3	Canadá	108	10 423	1975	1975	4.1
Camarillas	España	49	37	1960	1964	4.1
Marimbondo	Brasil	94	6150	1975	1975	4.0
Dhamni	India	59	285	1983	1994	3.8
Itezhitezhi	Zambia	65	5000	1976	1978	3.8
Capivara	Brasil	59	10 500	1976	1976	3.7
Carmo Cajuru	Brasil	22	192	1954	1972	3.7
Novo Ponte	Brasil		128		1995	3.7
LG 3	Canadá	80		1981	1983	3.7
Shengjiaxia	China (PRC)	35	4	1980	1984	3.6
Blowering	Australia	112	1628	1968	1973	3.5
Talbingo	Australia	162	935	1971	1973	3.5
Yantan	China (PRC)	110	2430	1992	1994	3.5
Gandipet	India	36	117	1920	1982	3.5

Nombre	País	Altura (m)	Volumen (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Año entrega para operación	Año sismo	Magnitud
<b>Idukki</b>	India	169	1996	1975	1977	3.5
<b>Ridracoli</b>	Italia	103	33	1981	1988	3.5
<b>Keban</b>	Turquía	212	31 000	1973	1973	3.5
<b>Tucurui</b>	Brasil	100	45 800	1984	1985	3.4
<b>Lubuge</b>	China (PRC)	103	110	1988	1988	3.4
<b>Donjiang</b>	China (PRC)	157	81	1986	1990	3.2
<b>Shuikou</b>	China (PRC)	101	2350	1993	1994	3.2
<b>Zhelin</b>	China (PRC)	62	7170	1972	1972	3.2
<b>Sriramsagar</b>	India	43	32 000	1983	1984	3.2
<b>Jocasse</b>	USA	107	1431	1971	1975	3.2
<b>Katse</b>	Lesoto	185	1950	1995	1996	3.1
<b>Thomson</b>	Australia			1983	1990	3.0
<b>Paraibuna–Paraitinga</b>	Brasil	94/105	4700	1975 – 1976	1977	3.0
<b>Qianjin</b>	China (PRC)	50	20	1970	1971	3.0
<b>Kamafusa</b>	Japón	47	45	1970	1970	3.0
<b>Emmosson</b>	Suiza	180	225	1973	1973	3.0
<b>Oued Fodda</b>	Algería	101	225	1932	1933	3.0
<b>Kouris</b>	Cyprus				1994 – 1995	3.0
<b>Contra</b>	Suiza	220	86	1963	1965	3.0
<b>Grancarevo</b>	Yugoslavia	123	1280	1967	1967	3.0
<b>Shasta</b>	USA	183	5615	1944	1944	3.0
<b>Tongjiezi</b>	China (PRC)	74	30	1992	1992	2.9
<b>Acu</b>	Brasil	31	2400	1983	1994	2.8
<b>Hunanzhen</b>	China (PRC)	129	2060	1979	1979	2.8
<b>Nanchong</b>	China (PRC)	45	15	1969	1974	2.8
<b>Wujiangdu</b>	China (PRC)	165	2140	1979	1985	2.8
<b>Monticello</b>	USA	129	500	1977	1979	2.8

Nombre	País	Altura (m)	Volumen (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Año entrega para operación	Año sismo	Magnitud
<b>Fierza</b>	Albania	167	2800	1978	1981	2.6
<b>Salanfe</b>	Suiza				1995	2.5
<b>Toktogul</b>	Kirghizia	215	19 500	1977		2.5
<b>Huangshi</b>	China (PRC)	40	610	1970	1974	2.3
<b>Nanshui</b>	China (PRC)	81	1220	1969	1970	2.3
<b>Emborcacao</b>	Brasil	158	17 600	1981	1984	2.0
<b>Sobradinho</b>	Brasil	43	34 100	1977	1979	2.0
<b>Schlegeis</b>	Austria	117	128	1970	1971	2.0
<b>Hendrik Verwoerd</b>	Sur África	66	5000	1970	1971	2.0
<b>Mula</b>	India	56	1017	1972	1972	1.0

Con base en la tabla 1, haciendo un balance de los diferentes eventos RTS, ocurridos en el mundo desde su aparición hasta 1997, (Gupta H. , 2002), se puede determinar que los casos donde más han ocurrido este tipo de fenómenos son Brasil, India, USA y China como se muestra en la siguiente figura 3.

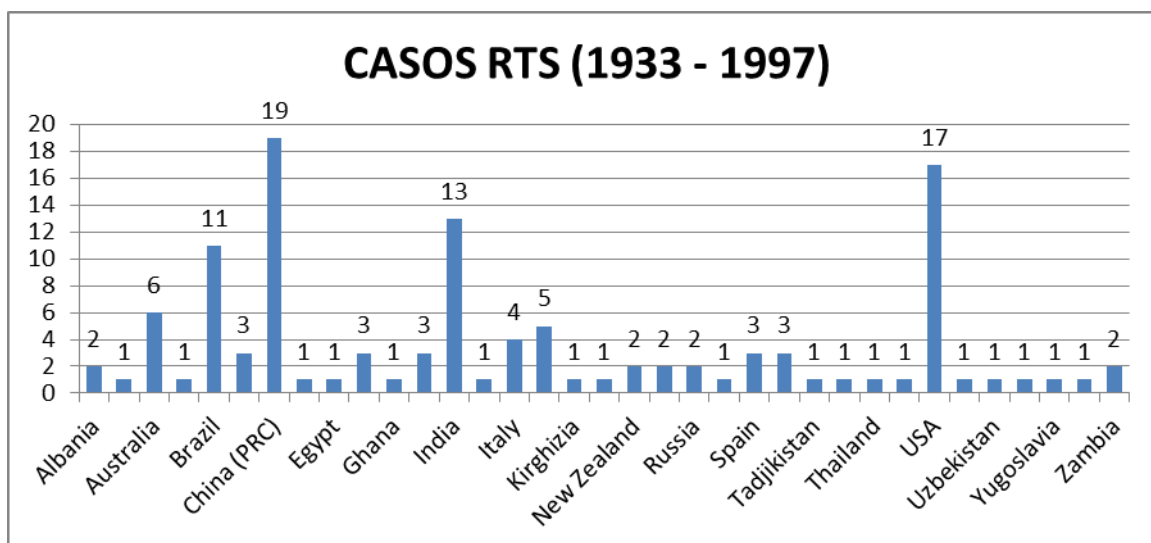


Figura 3. Cantidad de embalses con RTS (1933 – 1997)

Por lo anterior, es importante mencionar que los estudios realizados inicialmente hacen hincapié al papel predominante de los embalses cuando tienen tensiones ambientales cerca de un fallo, mientras que los estudios posteriores se centraron en la comprensión de la relación causal entre las fluctuaciones estacionales del nivel de agua de los embalses y las estadísticas de un posible RTS. (Amrita Yadav a, 2016)

#### **4. Casos recientes de RTS**

Realizando un balance de los casos desencadenantes en Europa, se observa en la figura 4 (color azul), los diferentes eventos sísmicos causados por construcciones de grandes embalses desarrollados entre 1950 a 2013, así como también, los demás factores generadores de RTS, como exploraciones mineras, extracción de hidrocarburos o agua, las explotaciones geotérmicas y la inyección de fluidos en el subsuelo.

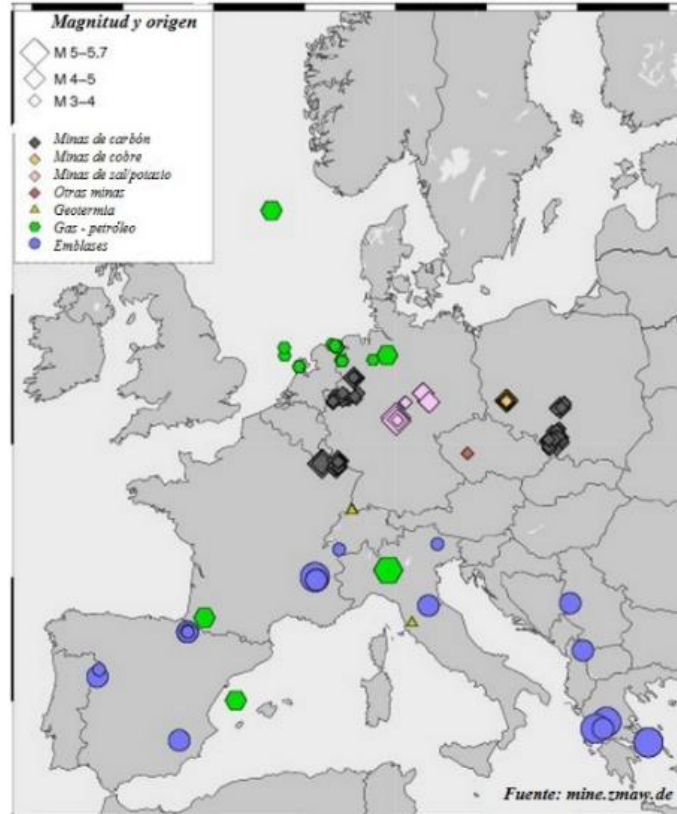


Figura 4. Eventos sísmicos en Europa (1950-2013)

Nota: Adaptado de: (Elcacho, 2013)

A continuación, relaciona los casos recientes más sobresalientes que se han sido objeto de estudio los últimos años y han enriquecido la literatura científica para demostrar el fenómeno RTS.

#### 4.1 Embalse Koyna y Warna (India):

Aunque ya se ha mencionado los embalses de Koyna y Warna como casos antiguos de RTS en India, son hoy en día los embalses más estudiados sismológica, hidrológica y geofísicamente. Es por esto, que al año 2015 se han registrado alrededor de 22 sismos de  $M \geq 5$ , cerca de 200 sismos

de  $M \geq 4$  y varios miles de sismos menores por una densa red de estaciones en la región (Amrita Yadav a, 2016).

La siguiente tabla 2, se hace un recuento de los acontecimientos más representativos para las investigaciones del fenómeno RTS ocurridos desde la 1962 – 2010 en las inmediaciones del embalse de Koyna y Warna (India):

Tabla 2

*Cronología de acontecimientos importantes caso de embalses de Koyna y Warna*

<b>Año</b>	<b>Acontecimientos importantes</b>
<b>1962</b>	Entrega de Embalse de Koyna para llenado y operación
<b>1963- 1967</b>	distribución de réplicas a lo largo de una zona sísmica de 20 km que se extiende al sur de la presa de Koyna
<b>1967</b>	Evento sísmico predominante de $M6.3$ , causando daños locales y centenares de muertos
<b>1968</b>	Registros de movimientos y epicentros de réplicas (Tandon y Chaudhury,1968). Tandon y Chaudhury (1968) encontraron que el choque principal de Koyna fue seguido por un gran número de réplicas con algunas de ellas superando magnitud $M5.5$ que se sintieron hasta Pune y Bombay.
<b>1980</b>	Modelo de Mogi (1968), explica la ocurrencia de menor número de choques elásticos antes del choque principal y muchas réplicas después el choque principal; tal patrón conspicuo se observa cuando el rompimiento material tiene una estructura heterogénea y la tensión aplicada no es uniforme. Se registran 300 terremotos de magnitudes $ML 4,0$ y se infieren dos tenencias un NNE orientado cerca del embalse de Koyna y el otro a unos 20 km al oeste de la carretera de Damin NW
<b>1987</b>	Entra en la etapa de llenado y operación el Embalse de Warna, construido a unos 35 km al sur del embalse de Koyna
<b>1993</b>	Registro dos eventos sismo de $M N 5$ proximidades embalse de Koyna
<b>1993-94</b>	Se observó un cambio hacia el sur en la sismicidad al embalse de Warna
<b>1996-1997</b>	Microsismos que ocurrió en la región de Koyna-Warna durante abril 1996 a diciembre de 1997
<b>2005</b>	Se registró 3 sismos de $M N 4$ en el embalse de Koyna, además de cientos de pequeños sismos entre los embalses de Koyna y Warna
	Instalación de 5 sismógrafos digitales para un total de 13 estaciones digitales

Año	Acontecimientos importantes
2010	Alabama. (2011) analizaron 29 terremotos en el rango de magnitud M 3.5-5.1 entre 2005-2010, en las inmediaciones del embalse de Warna, sólo unos pocos cerca del embalse de Koyna.
2011	Se encontró el mecanismo focal para la falla de Koyna, consistente con los estudios anteriores y los terremotos cerca del embalse de Warna. (Shashidhar, 2011). Luego de diversas investigaciones, N. Purnachandra Rao, 2016, concluye que los embalse de Koyna y Warna, experimenta fases alternas de predominio deslizamiento y fallas normales, gobernado por el pico y la relajación de la compresión horizontal
2016	causado por la compresión de la placa en el sistema de falla local debido a la fuerza de colisión entre la India y Eurasia, ayudadas por el mecanismo de activación del yacimiento. El fenómeno comienzan a ocurrir cuando la fuerza de compresión horizontal alcanza un máximo y excede el límite crítico, mientras que la falla normal ayudada por la fuerza de gravedad se hace cargo una vez que la tensión horizontal se acumula en las fallas y queda casi completamente liberado. Se cree que los depósitos juegan un papel crítico durante ambas fases al permitir una liberación más rápida de energía, causando una ocurrencia más frecuente de sismicidad de lo esperado en una región dentro de la placa. (N. Purnachandra Rao, 2016)

Nota. Adaptado de: (N. Purnachandra Rao, 2016)

A mrita Yadav (2016) recopila el conjunto de todos los estudios realizados hasta la fecha resumiendo las diversas cuestiones geocientíficas y logros importantes en relación con el mecanismo de sismicidad y procesos de origen, así como también, las soluciones de plano de fallo proporcionales a la geometría de fallas, parámetros de fuente, profundidad sismogénica, estructura de la corteza y el papel del nivel del agua del reservorio. (Amrita Yadav a, 2016)

Debido a lo anterior, el estudio empleó modelos numéricos para simular la difusión de los frentes de presión de poros durante la fase de llenado del embalse, logrando obtener perturbaciones de estrés del orden de 0.75 – 2.25 bar a la profundidad hipocentral, causando efectos de RTS, haciendo hincapié en las fallas preexistentes. (Amrita Yadav a, 2016).

Para entender los comportamientos sismotécnicos, es importante destacar que la región de Koyna, no hubo registro de sismicidad en más de 100 años antes de último evento significativo en el Embalse de Koyna en 1967 (Verma, 1985). De allí la región continuo activa, sin embargo, durante 1993-94, la sismicidad cambio su dirección extendiéndose al sur, cuando entró en operación el embalse de Warna (Amrita Yadav a, 2016).

Hoy en día, la región de Koyna - Warna sigue activa y está actualmente monitoreada físicamente por una red de pozos bastante amplia. Como se observa en la figura 5, se identifica la cantidad de sismo registrados entre 1967 a diciembre de 2013, así como también las fallas y la red sísmica antes mencionada (Amrita Yadav a, Brijesh K. Bansal, Ajeet P. Pandey 2016).

A. Yadav et al. / Earth-Science Reviews 162 (2016) 433–450

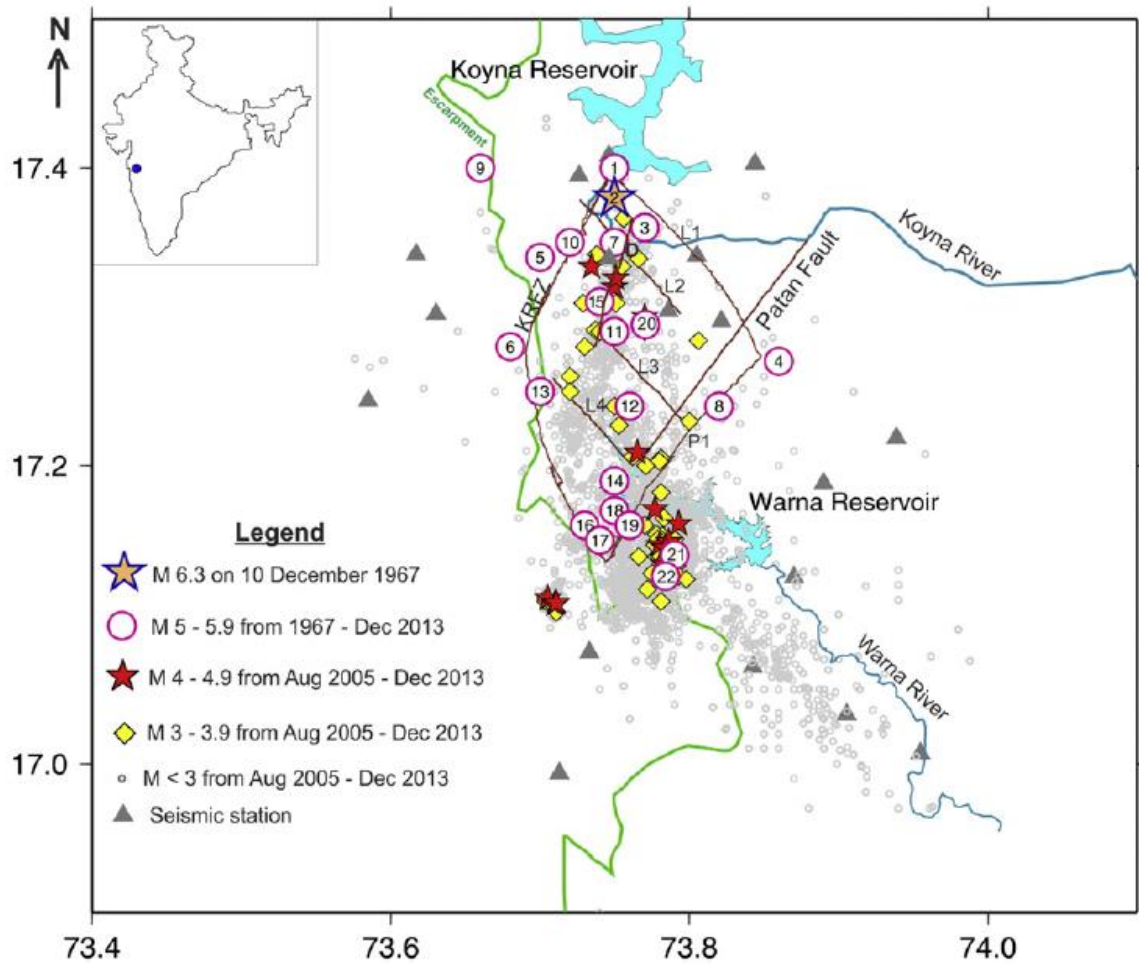


Figura 5. Falla, lineamientos y actividad sísmica en la región de Koyna-Warna,

Nota: Adaptado de: (Amrita Yadav a, 2016)

A continuación, se relaciona algunas características importantes y afirmaciones producto de la investigación de Amrita Yadav (2016) al embalse de Koyna y Warna:

- Los sismos desencadenados por embalses, son en su mayoría sismos someros que ocurren en un área pequeña con profundidades focales limitadas a unos 10 km. Además, se presentan cuando no hay otra zona sísmicamente activa en las cercanías (Amrita Yadav a, 2016; Gupta H. K, 2001).

- La zona sísmica Koyna-Warna es accesible para el despliegue de todo tipo de experimentos y observaciones relacionadas al fenómeno RTS (Amrita Yadav a, 2016).
- Regularmente los sismos han ocurrido con el aumento del nivel de agua en los embalses, durante los monzones y más tarde durante la fase de vaciado del embalse (Rajendran y Harish, 2000; Gupta, 2001; Pandey y Chadha, 2003).
- El evento de  $M \geq 5$  se debe a la tasa de carga del yacimiento de 12m / semana (Gupta, 1983) y excediendo los niveles máximos agua del embalse (Gupta, 2002)
- Para ocurrir un evento RTS de  $M \geq 5$ , se presentan 15 días antes actividad sísmica (Gupta, 1992; Gupta y Iyer, 1984)
- El proceso de nucleación cuasi dinámica ocurrió unas 100 h antes de un terremoto de  $M \geq 4$  (Rastogi y Mandal, 1999)
- Se observó en los pozos de perforación de la región de Koyna-Warna cambios co-sísmicos en los niveles de agua para cuatro terremotos de  $M 4.3$  (Chadha et al., 2003).

#### 4.2 Embalse de Govind Ballav Pant (India)



Figura 6. Embalse Govind Ballav Pant, India.

Nota. Adaptado de: Google earth septiembre -2017

El caso RTS más reciente al centro de India, es el embalse de Govind Ballav Pant construido sobre el río Rihand, es el segundo reservorio más grande de la India, tiene una altura de 92 m y un área de aproximadamente  $45 \times 15 \text{ km}^2$ , fue construido en 1962, con una capacidad máxima de almacenamiento de  $10,6 \text{ km}^3$  y capacidad de generación de energía eléctrica de 300 MW (ver *Figura 7*). Para demostrar el fenómeno RTS, investigadores realizaron un estudio entre el periodo de 1984-2004, utilizando el concepto de Coulomb y el enfoque basado en la función de Green para estimar la presión de poros debido a la carga del yacimiento. (Gupta H. , A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India, 2002) (Gupta H. , 1992). Según la literatura científica, se realizó una correlación de tiempos entre altos niveles de agua en el embalse y del número máximo de sismos, simulando el efecto del embalse en las proximidades de las fallas causales del terremoto, logrando verificar cuales sismos se desencadenaron producto del embalse (Kalpna Gahalaut, 2007).

Dichos estudios han demostrado que el embalse se encuentra en una zona de actividad sísmica, conocido como el falló Narmada-Son-Tapti (la zona de la grieta), la región más activa de la peninsular de la India, que evolucionó durante la época arque-Período proterozoico (Mahadevan, 1999) (Ver *Figura 8*. Características tectónicas de la Región Narmada-Son y Tapti,

Nota: Adaptado de: *figura 5*). Es por ello, que la mayor parte del terremoto se identificó inicialmente con esta condición (Rao, 2002), sin embargo, se creó la duda bajo los conceptos de un posible desencadenamiento sísmico por el embalse.

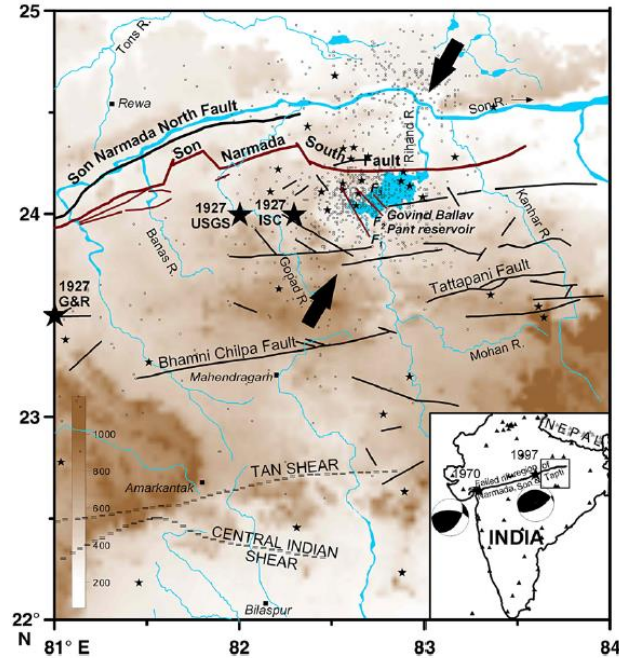


Figura 8. Características tectónicas de la Región Narmada-Son y Tapti,

Nota: Adaptado de: (Kalpna Gahalaut, 2007)

Inicialmente se estudió el embalse de Govind Ballav Pant, porque en 100 años, solo se presentó un gran terremoto de Son Valley M 6 1/2 (Gutenberg, 1954). Por otra parte, se conoce el río Son como el segundo más grande de la India, con cambios anuales en el nivel del agua del orden de  $12 \pm 2$  m, además hoy en día es la región más activa en la India peninsular con la intersección de varias fallas (Gahalaut, 2004) como se muestra en la Figura 5. Por esta razón el estudio de Kalpna (2007), lo convierte en un sitio ideal donde el depósito puede desencadenar terremotos en las fallas cercanas. Por lo cual, se hace una buena correlación entre la variación temporal de la sismicidad y los niveles de agua, sugiriendo un posible caso RTS. En estudio reciente se muestra la simulación, utilizando una función de enfoque de Green relacionándolo con el cambio de estas fallas geotectónicas causantes del fenómeno RTS.

Según lo anterior, el estudio concluye que los cambios del nivel de agua en el depósito han causado cambios en la presión de poros en las profundidades hipocentrales de las fallas preexistentes, que se orientan favorablemente para desencadenar sismos (Kalpna Gahalaut, 2007) (Gupta H. K., 2001).

### 4.3 Presa de las tres gargantas (TGS), China

La presa de las Tres Gargantas es la mayor central eléctrica del mundo en términos de potencia instalada (22.500 MW), se completó en el río Yangtze en julio de 2012. El embalse tiene una longitud de 660 km, 1,12 km de ancho y 185 m de profundidad. Su capacidad de almacenamiento de agua alcanza  $39.3 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. (Huai Zhang, 2016)



Figura 9. Embalse de las tres gargantas (China)

Nota: Adaptado de: Google earth septiembre-2017

En las investigaciones al embalse TGS, se encontraron eventos producidos en el área aguas arriba de magnitudes de ML2.0, con su patrón de distribución estrechamente correlacionado con la cobertura de agua y las fluctuaciones del nivel del agua, lo que ratificó que se trataba esencialmente del fenómeno RTS. Además, dos grandes terremotos con magnitudes de 3.7 y M4.1 ocurrieron en la región de la cabeza del embalse el 27 de septiembre y el 22 de noviembre de 2008 durante su tercer embalse, seguido de un poderoso M5.1 en el condado de Badong el 16 de diciembre de 2013 justo después de que el nivel de agua del TGR alcanzara su récord más alto anual. El epicentro de este evento estuvo a 5,5 km del límite superior de la corriente ya 100 km de la presa (ver figura 7). La profundidad focal de este terremoto fue de 5 km, y el mecanismo focal reveló que se trataba de una falla de deslizamiento vertical derecha-lateral. Posteriormente, dos eventos importantes con magnitudes de M4.3 y M4.7 también ocurrieron en el condado de Zigui el 30 de marzo de 2014. Estos dos eventos también están estrechamente asociados con el embalsamiento de la TGR. (Huai Zhang, 2016)



Figura 10. Presa de tres gargantas (china).

Nota: Adaptado de: Google earth septiembre de 2017

A lo largo de las investigaciones, científicos de todo el mundo realizaron debates, hipótesis y estudios con análisis numérico detallado, usando un método acoplado de elemento finito poro elástico tridimensional, en donde se logró examinar la deformación de la superficie del suelo, el cambio de tensión de falla de Coulomb (DCFS) debido a la variación de la tensión elástica, la presión de poro y el potencial de energía de deformación elástica (Huai Zhang, 2016).

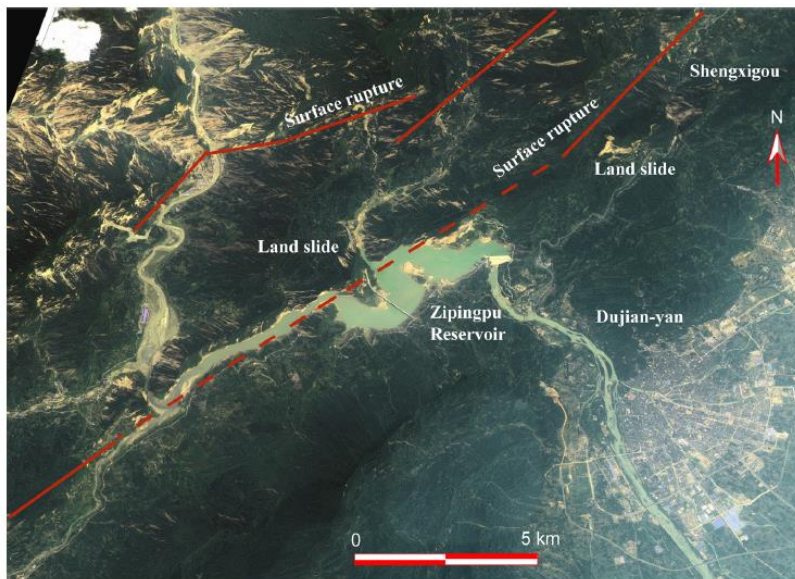
Según investigaciones realizada se pudo constatar que en el hipocentro del terremoto y el cambio de tensión de falla de Coulomb (DCFS) es de alrededor de 8.0 a 11.0 kPa cuando el coeficiente de fricción es 0,6, lo que indica que la presión de poro efectiva es relativamente significativa., revelando que puede ser desencadenado por el embalsamiento. (Huai Zhang, 2016) También se descubrió que la acumulación de potencial de energía de deformación elástica total se debió a la carga de agua retenida alrededor de  $1,7 \times 10^{12}j$ , equivalente a sólo el 0,01% de la energía total liberada por este evento, indicando que este terremoto es predominantemente controlado por la tectónica regional típica, así como las zonas de falla débil, agregando que el embalse sólo podría facilitar su procedimiento u ocurrencia.

#### **4.4 Presa Zipingpu (China)**

La presa de Zipingpu, es un caso estudiado de RTS, debido a el terremoto de Wenchuan (2008) de Ms8 (Ms 7.9), un estudio reciente evalúa los cambios de tensión de falla Coulomb (DCFS), el papel en la sismicidad local y el impacto potencial en el terremoto de Wenchuan, obteniendo los aspectos clave asociados con el fenómeno RTS, en el cual se incluye mecanismos de aumentos de estrés y permeabilidad de las zonas de falla. Aunque China es una zona sísmica, el estudio sugiere

que no se descarte la posibilidad de que el terremoto de Wenchuan sea otro caso RTS. (Lei X. , 2011)

En la siguiente *Figura 11.*, se muestra la imagen satelital de la zona del embalse con los alineamientos de las fallas superficiales dejadas por el terremoto de Wenchuan (2008), registrando daños en el puente Miaoziping con desplazamientos máximos (vertical 6,2 m y horizontal 4,5 m).



*Figura 12.* Embalse de Zipingpu (China)

Nota: Adaptado de: (Lei X. , 2011)..

El epicentro del sismo de Wenchuan se dio en las proximidades del gran embalse Zipingpu, con una distancia desde el epicentro hasta el embalse es de unos 5,5 km. El llenado del embalse comenzó en 2005 y alcanzó su máxima altura de 875 m en octubre de 2006. (Lei X. , 2011) . Entre el estudio se analiza la sismicidad local indicando que dentro del sector está la zona de falla de Longmenshan (LMSF) que es un grupo de las fallas de empuje en el noreste, las cuales producen efectos tectónicos en el resultado de la LMSF desde la convergencia de la corteza de la alta meseta

tibetana hasta el oeste, contra el bloque de corteza fuerte y estable que subyace Cuenca de Sichuan y el sureste de China (Lei X. , 2011).

Las apreciaciones relevantes en este estudio indicaron que el LMSF es un entorno tectónico con potencial para producir grandes terremotos pero no se habían visto en los últimos 1000-2000 años las mayores rupturas generadas tras el terremoto en Wenchuan, igualmente, se demostró que la actividad sísmica en el LMSF fue relativamente alta, pero bastante estable durante más de 30 años. (Lei X.-L. Y., 2008)

En la siguiente figura 8 se muestra las fallas activas (líneas rojas), las rupturas de la superficie del terremoto de Wenchuan (líneas blancas) del Ms8.0 y el depósito de Zipingpu. Los símbolos (negro y blanco) con los diferentes sismos ocurridos en el periodo de 2008. (Lei X. , 2011)

X. Lei/ *Journal of Asian Earth Sciences* 40 (2011) 844–854

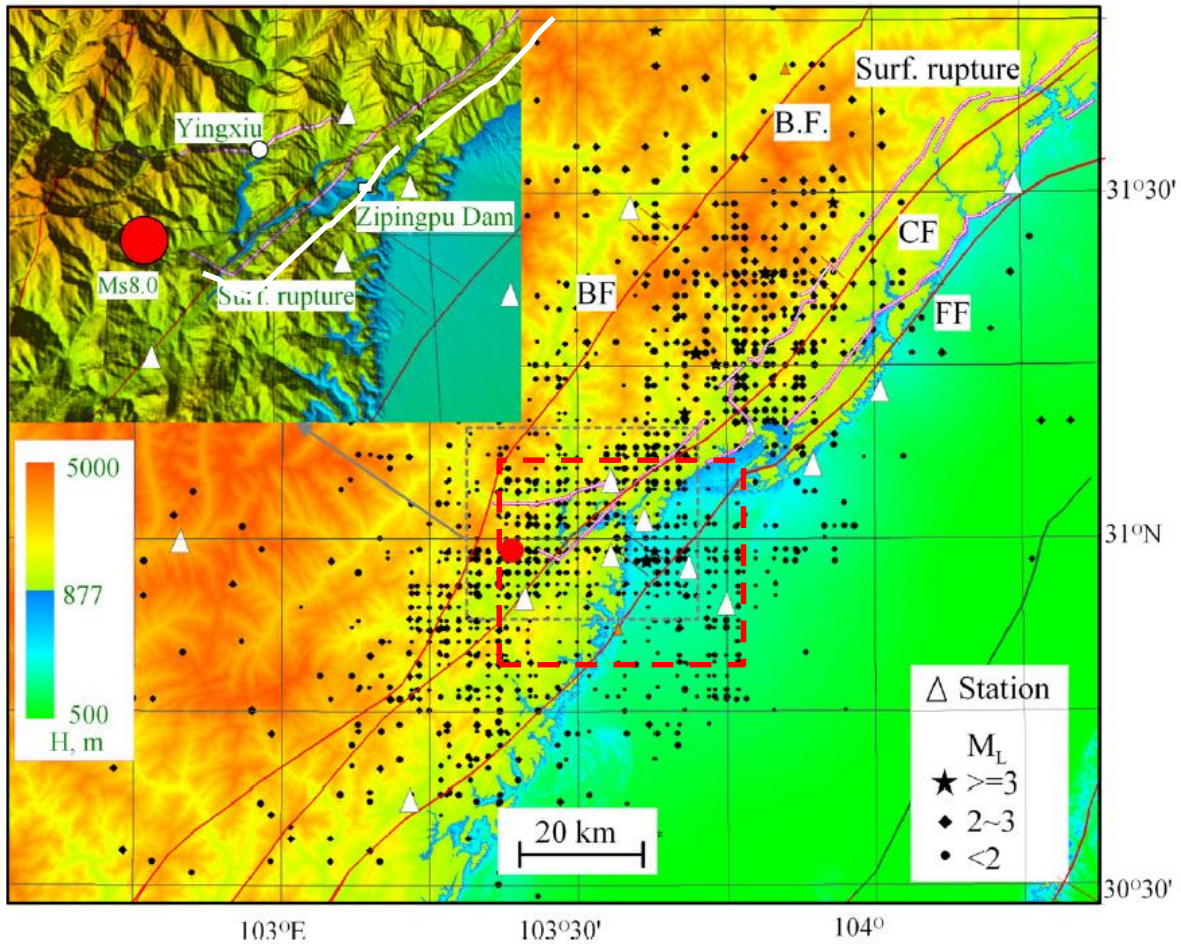


Figura 13. Red sísmica local de Zipingpu, (China)

Nota: Adaptado de: (Lei X. , 2011)

Tras realizar investigación con el modelado 3D, correlacionando los cambios de estrés y sismicidad local, se demuestra que “el embalse de Zipingpu afectó claramente la sismicidad local” (Lei X. , 2011), seguidamente otro estudio utilizando el método de elementos finitos (2D FEM) demostró que “ El Depósito de Zipingpu aceleró potencialmente la ocurrencia

Del terremoto de Wenchuan por decenas a cientos de años”. (Ge, 2009). Sin embargo, por el contrario, otros investigadores, exponen la idea que el terremoto de Wenchuan mostró diferentes

características estadísticas a los compilados a partir de más de cien casos de la histórica sismicidad provocada por los yacimientos (RTS) (Chen R. , 2009); (Chen J. L., 2009).

#### **4.5 Hidroeléctrica Song Tranh 2 (ST2) (Vietnam)**

El depósito de energía Hidroeléctrica Song Tranh 2 (ST2), está ubicada en la provincia de Quang Nam, Vietnam Central, es estudiado por su actividad sísmica después del embalsamiento del depósito a finales de 2010 hasta la fecha. Los sismos más significativos reportados son de magnitudes 4.6 y 4.7 en 22 de octubre de 2012 y 15 de noviembre de 2012 respectivamente. (Tuan, 2017).

En la literatura científica, se ha estudiado el embalsamiento calculando la influencia del embalsamiento sobre la ocurrencia de los sismos desencadenados por el embalse para la región ST2 basada en el estrés de Coulomb. Por ello, se tuvo en cuenta 595 terremotos registrados entre el período de octubre de 2012 a abril de 2014 con diez estaciones de la red sísmica operada por el Instituto de Geofísica (IGP). En general, los valores  $b$  asociados con la sismicidad provocada por el depósito (RTS) se encuentran a ser más altos que los valores  $b$  regionales en la relación frecuencia-magnitud de los terremotos.

En resumen se puede decir que los resultados son afines con la orientación de las fallas superficiales locales cercanas, que se confirma como las fallas activas en esta región. La influencia de las tensiones debidas a la carga de agua del yacimiento sobre la sismicidad local se calcula sobre la base del mecanismo focal obtenido utilizando el concepto de estabilidad de falla. Se encuentra que la mayoría de los terremotos ocurren en la región positiva de tensión de Coulomb, la cual muestra la influencia del embalse en la ocurrencia del terremoto en la vecindad. Nuestros

resultados sugieren que los terremotos locales son desencadenados por el embalse del reservorio ST2.

#### **4.6 Presa de Enciso, España**

De acuerdo a reciente estudio, un equipo de la Universidad de Zaragoza, evaluó la posibilidad de que el llenado de la presa de Enciso pudiese desencadenar sismos por la presión de agua en el subsuelo. En conclusión se evidenció que el riesgo de sismicidad se incrementa con el llenado del embalse que puede inducir que las fallas existentes se reactiven y reproduzcan terremotos (Antonio Casas).

La presa de Enciso, actualmente en construcción, presenta un riesgo de sismicidad importante, tras tres grandes terremotos con intensidades entre VII y VIII en los últimos 200 años en la zona. Además, se evidencia deslizamientos de ladera, dos aspectos críticos recurrentes que están ligados el uno al otro, ya que la sismicidad multiplicaría los deslizamientos de tierra y sería un riesgo añadido. (Soria, 2016)

El embalse de Enciso, localizado en el río Cidacos tiene una capacidad prevista de almacenamiento de agua de 47 hectómetros cúbicos, sobre los 58 hm<sup>3</sup> de aportación anual media del río. Esto significa que la capacidad de regulación supera dicha aportación anual, algo difícilmente justificable en términos de eficiencia y de relación coste/beneficio. La altura de la presa es de 94,5 m sobre el cauce del río, y de 104 m sobre cimientos. La tipología de la presa es de gravedad, construida con hormigón. (Soria, 2016)

Según la investigación, "El embalse está proyectado para contener 36 hectómetros cúbicos y tiene una altura de 100 metros; el problema no es la construcción del embalse, sino los grandes

movimientos de ladera, ya que los taludes son muy inestables y que afectan la estabilización de los taludes. Si cae al embalse, puede pasar por encima de la presa. (Soria, 2016)



*Figura 14.* Embalse de Enciso, España

Nota: Adaptado de: Google earth, agosto -2017

#### **4.7 Embalse de Itoiz, Navarra, España**

El embalse de Itoiz (Navarra, España) es uno de los ejemplos de embalses más estudiados que han sufrido el fenómeno RTS en España, episodios de terremotos provocados por la presión que ejerce un gran volumen de agua sobre el subsuelo. En este caso, los estudios previos a la construcción indicaban claramente que existía un riesgo de movimientos sísmicos. Para minimizar este riesgo, los responsables del proyecto diseñaron un proceso de llenado del embalse muy lento y controlado, que se completó en el 2004. No obstante, los sismógrafos de la zona dejaron constancia de diversos terremotos en la zona durante el primer llenado del embalse, con una magnitud máxima de 4,6 grados.



*Figura 15.* Embalse de Itoiz,(España)

Nota: Adaptado de: Google earth, agosto 2017

#### **4.8 Embalse de Camiña (Chile)**

El embalse Camiña situado en el Norte de Chile, comprende un área con bastante actividad sísmica que está situada sobre la zona de subducción-acreción de la placa de Nazca con la placa continental. (Laborie, 2013). En la historia de Chile se han presentado sismos muy destructivos como Valparaíso, 1906; Talca, 1928; Chillán, 1939; Copiapó y Vallenar, 1946; Valdivia, 1960, el mayor registrado  $M=9.5$ ; La Ligua y Valparaíso en 1965 y 1972; zona central, 1985; Antofagasta, 1995; Illapel, 1997; Iquique, 2005; Tocopilla, 2007; y Maule (Talca), 2010.

Debido al alto riesgo de sismicidad, Chile tiene una actividad sísmica registrada desde 1900 y sistematizada totalmente desde 1963. Es por esto, que el análisis de riesgo sísmico en el embalse de Camiña reportó 2061 sismos durante 1900 a 2013, magnitudes de Richter superiores a 4.5. Como se observa en la *Figura 16*, se evidencia la actividad sísmica alrededor del embalse de Camiña entre el periodo de 1900 – 2012.

Este estudio descartó la probabilidad que la sismicidad sea desencadenada por el embalse, puesto que es un área con bastante actividad sísmica que está situada sobre la zona de subducción-

acreción de la placa de Nazca con la placa continental causa principal de los eventos registrados hoy en día.

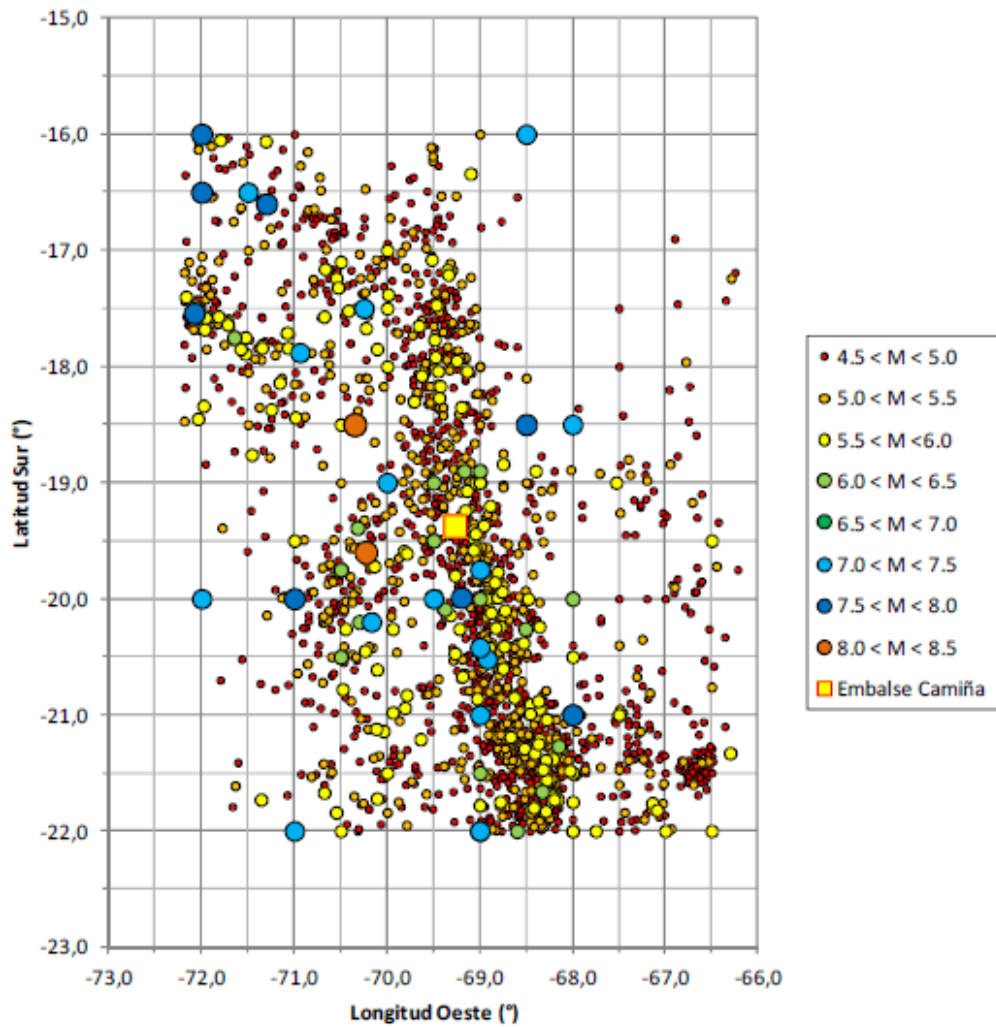


Figura 17. Epicentros de sismos ocurridos entre 1900 a 2012 en la zona de estudio.

Nota: Adaptado de: (Laborie, 2013)

### 5. Comparativo causas naturales vs RTS

Como es del conocimiento, los terremotos o sismo de grandes magnitudes son movimientos bruscos de vibraciones de la corteza terrestre y son causados por una liberación rápida de energía dentro de la tierra. Son de importancia crítica para los seres humanos porque son una de las fuerzas naturales más destructivas que se encuentran en la tierra. Los más comunes se producen por la actividad de fallas geológicas (RAE, 2009). También pueden ocurrir por otras causas como, por ejemplo, fricción en el borde de placas tectónicas, procesos volcánicos, impactos de asteroides o cometas, o incluso pueden ser producidas por el hombre al realizar pruebas de detonaciones nucleares subterráneas.

Según lo estudiado anteriormente, comparando los sismo desencadenados por embalses con un terremoto por causas naturales encontramos que los desencadenamientos generan gran cantidad de sismos someros de magnitudes bajas y muy pocos de grandes magnitudes, con un máximo registrado de M6.3 en el embalse Koyna devastador por su cercanía al hipocentro.

La mayoría si no todos, los terremotos de magnitud notable son terremotos tectónicos resultantes de rupturas a lo largo de fallas bajo campo de tensión regional. Sin embargo, un sismo desencadenado por embalse puede mostrar todas las características de los terremotos tectónicos. Por ejemplo, la máxima magnitud atribuible a un yacimiento depende de la escala de las fallas subyacentes, fallas cercanas y del fondo tectónico de condiciones regionales. (Lei X. , 2011).

## 6. Conclusiones

A pesar de las diversas investigaciones y la inmensa base de datos recopilada a lo largo de los años sobre aspectos potenciales determinantes en la aparición de casos RTS en el mundo, hoy en día no se tiene un modelo tipo que explique la génesis de del fenómeno. Sin embargo, son claros los conceptos y aspectos asociados a la generación de este fenómeno como lo es el nivel de embalse, la velocidad de carga (Gupta H. R., 1997), la duración de la retención de los altos niveles de embalsamiento y la influencia de la presión de poros (Gough DI, 1970) (Bell ML, 1978) (Roeloffs EA, 1988).

Como se logró estudiar en esta monografía, se han reportado aproximadamente 100 sitios en todo el mundo durante las últimas siete décadas de casos de RTS. India, China, Estados Unidos y Brasil, son los países con más casos reportados (Gupta H. , 2002). Todos los lugares presentan similitudes en cuanto a cambio en la sismicidad por cambios en los niveles de agua en los embalses. Sin embargo, la aparición de RTS está estrechamente relacionada con la tectónica de fondo, campo de tensión, sistema de falla-fractura y resistencia de roca (Huai Zhang, 2016), esto quiere decir que cada caso de RTS, es independiente y requiere de un análisis particular.

Los casos de RTS de China son constantemente debatidos en cuanto a la existencia o no del fenómeno, ya que son zonas sísmicamente activas y generan discrepancias en la evaluación de las causas asociadas a desencadenamiento sísmico, sin embargo, científicos han demostrado mediante simulaciones las correlaciones entre los niveles del agua y la ocurrencia de sismo en la zona. Por otra parte, los embalses de Koyna y Warna son casos confirmados de RTS, sin ninguna

contradicción respecto a su definición porque como se estudió es un lugar estratégico para observaciones científicas y monitoreos permanentes.

En el desarrollo del estado del arte, se pudo concluir que se han reportado sólo unos pocos casos de RTS con grandes sismos hasta el momento. En el caso de los embalses de Colombia, no hay evidencias claras de ningún sismo desencadenado por embalses hasta el momento.

Para determinar si hay o no un desencadenamiento sismo por el embalse o es de origen natural, es necesario conocer la actividad sísmica y el régimen tectónico de la zona donde se localiza el embalse. Los indicadores son evidentes a la hora de diferencia uno del otro, ya que Los embalses propensos a un desencadenamiento sísmico, coinciden en la etapa de llenado y la generación de primeros sismos de magnitudes bajas. Sin embargo, para confirmar el fenómeno es indispensable realizar un estudio detallado de la sismicidad de la zona, conocer su geología, realizar un análisis de las características sismotectónicas locales en la zona (Wynfrith, 2012).

### Referencias Bibliográficas

- A. McGarr, D. S. (2002). Case Histories of Induced and triggered seismicity. *international geophysics*.
- Allen, C. (1974). Evaluation of seismic hazard at the Auburn damsite, California, U.S.
- Amrita Yadav a, B. K. (2016). Five decades of triggered earthquakes in Koyna-Warna Region, western India – A review. *Earth-Science Reviews*.
- Astromía. (2017). *Los terremotos*. Obtenido de <http://www.astromia.com/tierraluna/terremotos.htm>
- Bell ML, N. A. (1978). Strength changes due to reservoir induced pore pressure and stresses and application to Lake Oro-Berrocal. *J Geophys*.
- Cacho, J. E. (29 de 10 de 2013). Actividades humanas que hacen temblar la tierra.
- Carmona, J. (2011). LA AMENAZA SISMICA EN LA SEGURIDAD DE LAS PRESAS. *CURSO DE ACTUALIZACION SOBRE LA SEGURIDAD EN LA INGENIERIA DE PRESAS* . Tucumán .
- Chen, J. L. (2009). Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan Ms8.0 earthquake sequence. *Journal of Geophysics*.
- Chen, R. (2009). Did the reservoir impoundment trigger the Wenchuan earthquake? *Science in China Series D*.

- Elcacho, J. (29 de 10 de 2013). *Actividades humanas que hacen temblar la Tierra*. Obtenido de Lavanguardia: <http://www.lavanguardia.com/medio-ambiente/20131007/54390609683/actividades-humanas-provocan-terremotos-castor-sismologia.html>
- Fundación Nueva Cultura del Agua. (abril 2016). *PRESA DE TERROBA. DIAGNOSIS DE LA SITUACIÓN Y ALTERNATIVAS AL LLENADO*. Zaragoza.
- García-Sansegundo, J. (2014). La estructura geológica del entorno del embalse de Itoiz (Navarra, España): un caso de sismicidad inducida por un embalse. *researchgate*.
- Ge, S. L. (2009). Did the Zipingpu Reservoir trigger the 2008 Wenchuan earthquake? *Geophysical Research*.
- Geofísica UNAM*. (2017). *Magnitud de un sismo*. Obtenido de <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/Magnitud-de-un-sismo.pdf>
- Gough DI, G. W. (1970). Stress and deflection in the lithosphere near Lake Kariba. *Geophys J*.
- Gupta, H. (1992). Reservoir Induced Earthquakes. *Elsevier, Amsterdam*.
- Gupta, H. (2002). A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science*.
- Gupta, H. K. (2001). Short-term-earthquake-forecasting-may-be-feasible-at-Koyna-India. *Tectonophysics*.
- Gupta, H. R. (1997). Enhanced reservoir earthquakes in Koyna Region India 1993-95.
- Gutenberg, B. R. (1954). Seismicity of the Earth. *Princeton Univ*.
- Huai Zhang, H. C. (2016). Influence of the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.

- Kalpna Gahalaut, V. G. (2007). A new case of reservoir triggered seismicity: Govind Ballav Pant reservoir (Rihand dam), central India. *science direct*.
- Knoll, P. K. (1996). Induced seismic events. *PAGEOPH*.
- Laborie, J. E. (2013). Análisis del Riesgo Sísmico en el Embalse de Camiña.
- Lei, X. (2011). Possible roles of the Zipingpu Reservoir in triggering the 2008. *Journal of Asian Earth Sciences*.
- Lei, X.-L. Y. (2008). Earthquakes induced by water injection at 3 km depth within the Rongchang gas field,. *Journal of Geophysical Research*.
- Lindo, M. H. (1996). Sismicidad Inducida por embalses. Analisis Efecto de carga . *Geogaceta*.
- Lindo, M. H. (1996). SISMISIDAD INDUCIDAD POR EMBALSE Y ANALISIS DE CARGAS. *Geogaceta*.
- Luciano Telesca, A. F. (2015). Analysis of the cross-correlation between water level and seismicity at Açú reservoir (Brazil). *Tectonophysics*.
- Mahadevan, T. S. (1999). Seismicity of the Deccan volcanic province—an evaluation of some endogenous factors. *Deccan Volcanic Province. Geol. Soc. India*.
- McDonald. (1982).
- McGarr, A. a. (1997). Rockbursts and Seismicity.
- McGarr, A. S. (1997). Keynote lecture: A broad look at induced and triggered seismicity, “Rockbursts and seismicity in mines”. In: Gibowicz, S.J., Lasocki, S. *Balkema, Rotterdam*.
- N. Purnachandra Rao, D. S. (2016). Periodic variation of stress field in the Koyna–Warna reservoir triggered seismic zone inferred from focal mechanism studies. *Tectonophysics*.

RAE, R. A. (5 de 10 de 2009). Recuperado el 2 de 11 de 2011, de Española, Real Academia: <http://dle.rae.es/?id=Zbv1taE>

Rajendran, K. y. (1992). *Seism. Soc. Am.*

Rao, N. T. (2002). Deep lower crustal earthquakes in central India: inferences from analysis of regional broadband data of the 1997 May 21 Jabalpur earthquake. *Geophys.*

Richter. (1985). *Elementary Seismology*. W. H. Freeman Co., EUA.

Ritcher. (1958). *Richter, C. (1958), Elementary Seismology*. W. H. Freeman Co., EUA.

Roeloffs EA. (1988). Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level. *J Geophys.*

Servicio Geologico Mexicano. (2013). *Causas, características e impactos*. Obtenido de <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/riesgos/sismos>

Shashidhar, K. M. (2012). Temporal variation of b value associated with  $M \sim 4$  earthquakes. *J Seismol.*

Sholz, C. H. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge, Univ.

Simpson, D. (1986). Triggered earthquakes. *Earth planet science.*

Soria, H. d. (01 de 09 de 2016). *Un estudio de la Universidad de Zaragoza advierte del riesgo sísmico de la presa de Enciso*. Obtenido de <http://www.heraldodesoria.es/noticias/soria/2016/09/01/un-estudio-universidad-zaragoza-advierte-del-riesgo-sismico-presa-enciso-1038235-1521032.html>

Talebi, S. (1998). Seismicity caused by mines, fluid injections, reservoirs and oil extraction. *PAGEOPH 153*.

- Talwani, P. y. (1985). Acree, S., 1984/1985. Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity. *PAGEOPH* 122, 947– 965.
- Tuan, T. A. (2017). Evidence that earthquakes have been triggered by reservoir in the Song Tranh 2 region, Vietnam. *Journal of Seismology*.
- USCOLD. (1997). United States Committee on Large Dams.
- Verma, R. (1985). Gravity Field, Seismicity and Tectonics of the Indian Peninsula and the Himalaya. *Allied Publ.*
- Villafáñez, O. L. (Bogotá,2014). Guía para construir estados del arte. *International corporational of networks knowledge*.
- Wynfrith, R. (2012). Seismic hazard assessment and seismic safety of Sogamoso Hydropower Project,.
- Yunga, S. S. (1996). Seismotectonic Deformation During the Filling of Toktogul Reservoir, Kirghizia. *KROLL P. & KOWALLE G.*