

**NUEVAS CONSIDERACIONES SOBRE LA SISMICIDAD INDUCIDA  
EN LOS DIQUES DE EMBALSE**

**Fernando S. VOLPONI**

**INSTITUTO SISMOLOGICO ZONDA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FISICAS Y NATURALES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN**

**San Juan – Argentina**

## 2 NUEVAS CONSIDERACIONES SOBRE...

Si bien los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas por el Instituto Sismológico Zonda (ISZ), entre 1978 y 1981, sobre las variaciones de la actividad sísmica en la zona del embalse del dique de Ullum, fueron claros y convincentes en demostrar que el peso del agua del embalse no producía variaciones significativas en la actividad sísmica de la zona, nos ha dejado, sin embargo, con el deseo de conocer las causas más profundas por las cuales los hechos sucedían de ese modo.

Como ahora disponemos de nuevos datos:

- a) Sabemos que el espesor de la capa litosférica es de  $(107 \pm 5)$  km (1)
- b) Sabemos que la fuerza tectónica tiene que ser horizontal porque es transmitida por la placa Sudamérica, que constituye un vínculo de dirección horizontal (2). Por otra parte tiene que tener, aproximadamente, la dirección este-oeste, porque tiene que ser perpendicular a la zona de subducción que está representada por la Cordillera de Los Andes, la cual tiene dirección norte-sur (3)
- c) Sabemos que para que se origine un terremoto en la litósfera es necesario que la tensión, que actúa sobre las rocas, alcance el límite de rotura (4)

Para simplificar el problema y poder calcular la fuerza tectónica, conviene considerar una capa de litósfera de un sólo metro de espesor, limitada a ambos lados por dos planos verticales de dirección este-oeste (figura 1). La capa cruza el embalse pasando por su parte central.

Por el principio físico de la independencia de la acción de las fuerzas que actúan sobre un mismo cuerpo, la acción de la fuerza tectónica horizontal actuará con prescindencia de la acción que tenga la fuerza vertical.

### Cálculo de la Fuerza Tectónica

La superficie del frente de la capa litosférica adoptada, con una profundidad de 107 km y un espesor de un metro, tiene un valor de

$$\text{Superficie} = 1,07 \cdot 10^9 \text{ cm}^2$$

Si adoptamos, como tensión media de ruptura para las rocas litosféricas, el valor  $5000 \text{ kg/cm}^2$ , la fuerza tectónica correspondiente a la capa resulta (5)

$$5000 \text{ kg/cm}^2 \cdot 1,07 \cdot 10^9 \text{ cm}^2 = 5,35 \cdot 10^{12} \text{ kg}$$

$$\text{Fuer.Tect.} = \underline{5,35 \cdot 10^{12} \text{ kg}}$$

Cálculo del Peso del Agua P

Para el cálculo del Peso del Agua tomamos, con exceso, los datos del dique de Ullum: longitud del embalse 10 km; profundidad media 30 m así resulta

$$\text{Peso Agua} = 10000 \text{ m} \cdot 30 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = \underline{3 \cdot 10^8 \text{ kg}}$$

y la relación Fuerza Tectónica / Peso del Agua

$$\frac{T}{P} = \frac{3,35 \cdot 10^{12}}{3 \cdot 10^8} = \underline{17.830}$$

En un primer momento se podría pensar que estas dos fuerzas: peso del agua y fuerza tectónica no son comparables porque tienen direcciones diferentes. Pero el siguiente razonamiento, que se ajusta al problema real, pone en claro la validez de la relación encontrada. Supongamos que el frente oeste de la capa litosférica coincide con el borde, aguas abajo, del dique. La capa quedará dividida en dos bloques: el de la izquierda que contiene el embalse, y el de la derecha que transmite el empuje tectónico. Supongamos que la zona de contacto entre los dos bloques sea una falla vertical. La acción del peso del agua trata de hundir el bloque de la izquierda con respecto al de la derecha. A este desplazamiento se opone la fuerza de rozamiento R que se genera entre las dos superficies de contacto. Si con T indicamos la fuerza tectónica y con  $\eta$  el coeficiente de rozamiento, sabemos que

$$R = \eta T$$

Por ser las superficies de contacto sumamente rugosas el coeficiente  $\eta$  se acerca al valor uno y por consiguiente R se acerca a T. Luego la relación encontrada T/P vale, aproximadamente, para R/P. Dos fuerzas, que ahora actúan sobre la misma dirección y en sentido opuesto.(6)

Interpretando el resultado, en números redondos, podemos decir que sería necesario un peso de agua 17.800 veces mayor que el que está contenido en el dique de Ullum para que pueda provocar el movimiento de la falla. Otra forma que ayuda a comprender el significado de la relación T/P se obtiene reduciendo los valores de las fuerzas a una escala de valores comunes. Por ejemplo, si el peso del agua fuera solamente de 100 kg, entonces la fuerza tectónica proporcional tendría que ser

$$\begin{aligned} 100 \text{ kg} \cdot 17800 &= 1.780.000 \text{ kg} \\ &= 1780 \text{ ton} \end{aligned}$$

Por consiguiente, si tenemos una estructura (p.e. un puente) que está trabajando normalmente, soportando cargas del orden de las 1780 ton (p.e.

#### 4 NUEVAS CONSIDERACIONES SOBRE

dos trenes con sus máquinas más 20 vagones de 40 ton cada uno), ciertamente, no puede ser motivo de preocupación, si sobre la estructura, pasa un hombre o dos caminando.

En términos sismológicos se puede decir que la actividad sísmica generada por la fuerza tectónica no es alterada por el peso del agua del embalse.

Efecto trigger o disparador.

El hecho de que el peso del agua sea muy pequeño con respecto a la fuerza tectónica no es suficiente para sostener que no puede provocar actividad sísmica. Si el peso del agua pudiese actuar en el momento en el que la tensión en las rocas estuviese en el punto crítico, límite de rotura, entonces actuaría como disparador y generaría sismicidad. Pero esto no sucede, en la realidad, porque el valor de las tensiones existentes en las rocas, no es constante, sufre fluctuaciones importantes, que son producidas por diferentes causas. A saber: a) La actividad sísmica, presente constantemente, local y distante; b) La atracción lunisolar que deforma la litósfera y por consiguiente modifica las tensiones. c) Las variaciones en los valores de la presión atmosférica... El peso del agua del embalse no puede actuar como disparador porque su efecto no alcanza las amplitudes de las fluctuaciones naturales de los valores de las tensiones en las rocas

#### La Energía de Deformación Elástica.

Tomemos en el interior de la litósfera, un paralelepipedo elemental  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  vinculado a un sistema de ejes ortogonales  $Oxyx$ , con el eje de las  $X$  apuntando hacia el Este, y el de las  $Z$  en la dirección de la vertical, figura 2. Las fuerzas exteriores, mas importantes que actúan sobre el elemento de volumen son: a) el peso de la columna de material litosférico

$$\Delta x \Delta y \rho g$$

que actúa en la dirección de la vertical. b) la fuerza tectónica horizontal que actúa en la dirección del eje de las  $Z$ , con el sentido de Este a Oeste. Si se indica con  $S$  la superficie del frente de la capa adoptada, la fuerza horizontal es

$$\frac{T}{S} \Delta y \Delta z$$

Nosotros hemos tomado  $T/S = 5000 \text{ kg/cm}^2$ .

Estas dos fuerzas exteriores producen variaciones de volumen y de forma

en el paralelepipedo elemental. El trabajo de las fuerzas, empleado en producir las variaciones, queda almacenado en el paralelepipedo como energía de deformación elástica. La energía correspondiente a la variación de volumen es

$$\Delta E_v = \frac{1}{2} \lambda \theta^2$$

en la que  $\lambda$  es la primer constante de Lamé cuyo valor, en función de módulos mas usados, es  $\lambda = K - \frac{2}{3}\mu$ , siendo  $K$  el módulo de compresión uniforme y  $\mu$  el módulo de rigidez, como se dijo mas arriba.  $\theta$  es la variación específica de volumen.

La energía correspondiente a las variaciones de forma es

$$\Delta E_f = \mu (e_{23}^2 + e_{31}^2 + e_{12}^2)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} (2\mu) \sum_{i \neq j} e_{ij}^2 \quad i \neq j; 1, 2, 3$$

luego la energía total de deformación elástica resulta

$$\Delta E = \frac{1}{2} (K - \frac{2}{3}\mu) \theta^2 + \mu \sum_{i \neq j} e_{ij}^2 \quad i \neq j; 1, 2, 3$$

Cuando se produce la fractura es porque las tensiones han alcanzado el valor máximo, límite. Lo mismo sucede con las deformaciones y por consiguiente con la energía acumulada en el elemento de volumen. La integral

$$\iiint (\frac{1}{2} \lambda \theta^2 + \mu \sum_{i \neq j} e_{ij}^2) d\tau$$

extendida a todo el espacio tridimensional que afecta un terremoto (llamado Volumen sísmico) representa la energía de deformación elástica acumulada en dicho volumen, parte de la cual se transforma en ondas elásticas.

NOTAS Y COMENTARIOS

1) El primer trabajo sobre este tema fué realizado por el Instituto Sismológico Zonda y está publicado en el Year Book Carnegie Inst. of Washington DC, 66, pp 37-42, 1967, titulado Spatial Distribution of Earthquakes near San Juan, Argentina, por F. Volponi y H. Marconi. Utilizando una nueva red de estaciones (la de la figura 1) los profesores de la Universidad de Cornell U.S.A, Isaks, B.L. y Smalley, R.F. repitieron el trabajo cuya memoria está publicada en el J. Geophys. Res. 92, pp 13903-912, 1988. El espesor que se da de (107 +/- 5)km es consecuencia del nuevo trabajo.

2) La placa Sudamérica, que se extiende desde la Cordillera de Los Andes hasta la Cresta central del Océano Atlántico a lo largo de 5200 kilómetros, constituye el vínculo que transmite el Empuje Tectónico. Su espesor de unos 100 kilómetros es muy pequeño con respecto a su longitud. Hecho que le da el carácter de horizontalidad a la Fuerza Tectónica.

3) Cuando se trata de contactos entre sólidos, la fuerza que se transmiten entre ambos puede no ser perpendicular a la superficie de contacto. Por este motivo la perpendicularidad de la Fuerza Tectónica, con respecto a la Cordillera, no se puede asegurar. Solamente se acepta como hipótesis de trabajo.

4) De entre cuatro procesos diferentes que dan origen a terremotos en la litosfera, el prof. K.E. Bullen admite que el más importante es el que ocurre como resultado de una fractura. Ver: K.E. Bullen, An Introduction to the Theory of Seismology, Third Edition, Cambridge Univ. Press, pp 273, 1963. Este punto de vista es comunmente sostenido por otros autores. El terremoto que resulta se llama terremoto tectónico.

5) Desde tiempos atrás es sabido que las propiedades elásticas del material del interior de la litósfera son sorprendentemente buenas. Las rocas de la litósfera eran frecuentemente comparadas con hierros y acero. Pero no hay datos reales directos, si se excluyen los ensayos de los laboratorios. La información más importante que tenemos es la que nos suministran las fórmulas teóricas que expresan las velocidades de propagación de las ondas elásticas: longitudinales y transversales. Elementos de comparación pueden ser los módulos que relacionan las tensiones con las deformaciones. Si tomamos la fórmula de la velocidad de las ondas trasversales, que es la más simple

$$V = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

vemos que nos permite calcular el módulo de rigidez o deslizamiento  $\mu$

porque tanto la velocidad  $V$  como la densidad  $\rho$  se miden fácilmente con métodos sismológicos y gravimétricos respectivamente. Como ejemplo podemos tomar los datos correspondientes a una profundidad de 33 km. Para esta profundidad la velocidad de las ondas trasversales es  $V = 4800$  m/seg y la densidad  $\rho = 3,32$  gramo masa/cm<sup>3</sup> = 3320 kilogramo masa/m<sup>3</sup>. Despejando  $\mu$  de la fórmula anterior y reemplazando los valores se tiene

$$\begin{aligned}\mu &= 4800^2 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}^2} \cdot 3320 \frac{\text{kgm}}{\text{m}^3} = 7,65 \times 10^{10} \frac{\text{New}}{\text{m}^2} \\ &= \frac{765.000}{\text{cm}^2} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\end{aligned}$$

En el Manual del Ingeniero Hütte, tomo I, pag 585 se encuentra el módulo de deslizamiento  $E_t = 770.000$  kg/cm<sup>2</sup> correspondiente al hierro dulce. Las tensiones de ruptura de este material no se encuentran en el manual Hütte.

El valor tentativo de 5000 kg/cm<sup>2</sup> adoptado para calcular la Fuerza Tectónica, puede ser muy diferente del verdadero valor promedio que actúa sobre el frente de la capa litosférica. Si tenemos en cuenta que a la profundidad de 33 kilómetros la presión que ejerce el material que está por arriba de ese nivel es de 9000 kg/cm<sup>2</sup> y que a la profundidad de 100 km es de 31.000 kg/cm<sup>2</sup>, tenemos que pensar que las tensiones, para producir roturas, pueden ser mayores que el valor adoptado de 5000 kg/cm<sup>2</sup>. Y esto lleva a la conclusión de que la influencia del peso del agua del embalse es aún menor que la que consideramos al principio.

6) Que el coeficiente de rozamiento  $\eta$  es muy alto, próximo a la unidad, se confirma por el hecho que se observa en las réplicas que siguen a un terremoto importante. Siempre aparecen distribuidas en forma irregular alrededor del foco principal, como si el plano de escurrimiento del primer movimiento no permitiera que las réplicas se produjeran o repitieran en el mismo.

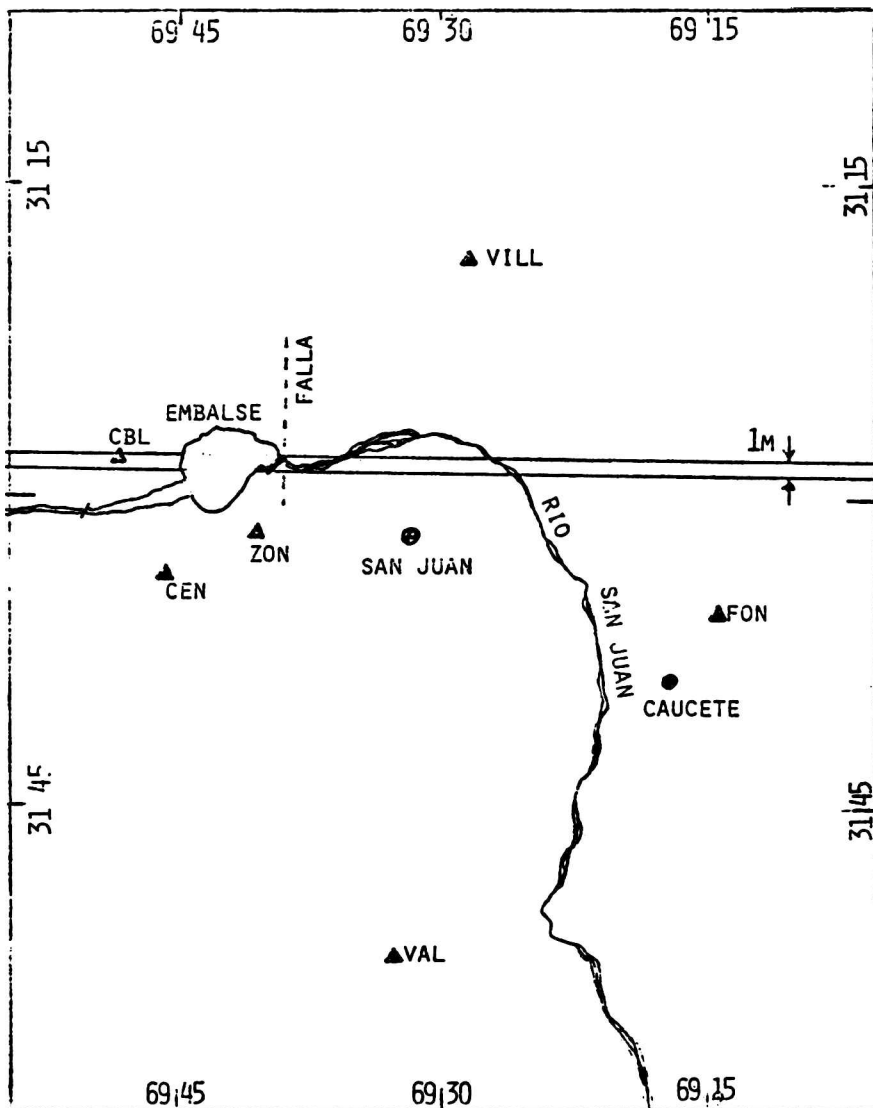


Figura 1. El embalse de Ullum sobre el Rio San Juan. Se muestra la traza de la capa litosférica considerada de dirección E-O y de un metros de espesor. Se indica la suuesta falla y la red de estaciones simológicas.



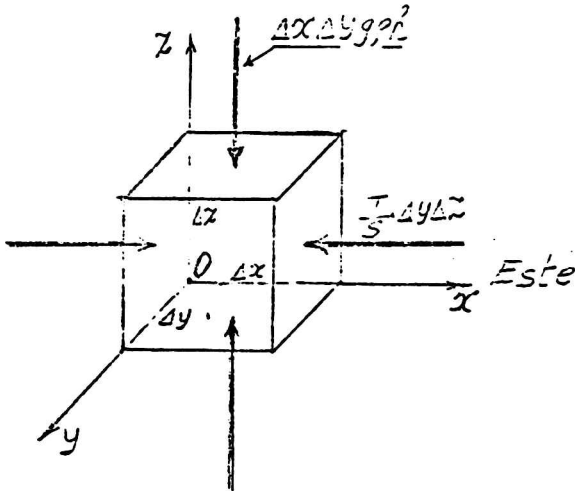


FIGURA 2. El paralelepipedo elemental con las dos fuerzas exteriores más importantes. La vertical debida a la acción de la gravedad y la horizontal correspondiente al empuje tectónico.