

# Sismicidad inducida por embalses. Análisis del efecto de carga

## *Reservoir induced seismicity. Load effect analysis*

M. Herraiz y R. Lindo

Departamento de Geofísica y Meteorología. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense, 28040 MADRID

### ABSTRACT

*Publications on Reservoir Induced Seismicity (RIS) in Spain are very scarce in spite of the remarkable importance that the problem can reach in the country. This communication describes its main characteristics and presents a computer program which calculates the incremental stress due to a water load (e.g. a reservoir). The program is based on Gough's methodology and assumes a two-dimensional geometry. An application to the Entrepeñas reservoir area is also shown with the purpose of testing the usefulness of this program.*

**Key words:** *induced seismicity, reservoir, load effect, computer program*

*Geogaceta, 20 (6) (1996), 1352-1354  
ISSN:0213683X*

### Introducción

Se entiende por Sismicidad Inducida por Embalses (SIE) la distribución espacial y temporal de fenómenos sísmicos cuyo origen puede vincularse a las variaciones en el nivel de un embalse. Este fenómeno fué estudiado por primera vez por Carder (1945) para el caso del embalse de Lake Mead en Boulder (Colorado, EU) y comparte aspectos comunes con la sismicidad inducida por la inyección de fluidos o la extracción de hidrocarburos. La importancia del problema se puso de manifiesto en la India el 10 de Diciembre de 1967 cuando tuvo lugar un terremoto de magnitud 6.2 en las proximidades de la presa de Koyna, situada en una zona considerada asísmica antes de la construcción de la presa. A pesar de su interés, el número de estudios realizados en nuestro país sobre este tema es muy escaso (ver p.e.: García Yagüe, 1973; Buforn y Udías, 1982; Lindo y Herraiz, 1995; 1996).

En la actualidad se distinguen dos tipos de sismicidad inducida por embalses: de respuesta rápida y de respuesta demorada (Simpson *et al.*, 1988). La primera se caracteriza porque la sismicidad se inicia casi inmediatamente después del primer llenado del embalse, se localiza muy próxima al mismo y es de pequeña magnitud y muy superficial (h 10km). Monticello (Carolina del Sur) y Kariba (Zambia) son ejemplos de este tipo de SIE. Por el contrario, la sismicidad de respuesta demorada no se presenta hasta después de

que hayan ocurrido varios ciclos de llenado; los sismos son más profundos (h puede alcanzar los 30 km), y su epicentro no se localiza necesariamente cerca del embalse. Las magnitudes alcanzadas son mayores. Además del caso de Koyna ya citado, las presas de Oroville (California) y Aswan (Egipto) presentan este tipo de sismicidad.

Respecto a los procesos físicos considerados responsables de la SIE, hoy se acepta, casi unánimemente, que el llenado de un embalse puede modificar la distribución de esfuerzos en la corteza a través de dos mecanismos distintos: el efecto de la carga de la columna de agua (Rajendran y Talwani, 1992) y el incremento de la presión de poros (Talwani y Acree, 1985). El primer mecanismo, que tiene una repercusión más directa, provoca un aumento del esfuerzo elástico de cizalla. El segundo, consecuencia en parte del anterior, genera una disminución del esfuerzo eficaz normal. En este caso, el incremento con la profundidad de la presión de poros puede deberse a una disminución de su volumen causada por cambios en la componente de deformación volumétrica, o a la difusión de la presión desde el fondo del embalse. El efecto de carga parece ser el responsable de la sismicidad inducida de respuesta rápida mientras que el incremento de la presión de poros juega un papel predominante en la sismicidad demorada. Como ambos tipos de actividad están presentes en la mayoría de las presas con sismicidad inducida, puede decirse que la aparición de

dicho fenómeno es el resultado de la acción conjunta de ambos factores a los que hay que añadir el régimen de esfuerzos existente en la zona con anterioridad al llenado del embalse. Este último factor, que condiciona fuertemente el efecto de los otros dos, constituye uno de los objetivos principales de los estudios geológicos y geofísicos previos a la construcción de la presa y debe ser considerado al margen de que la presa cause o no sismicidad inducida. De los otros dos factores, únicamente el efecto de la carga será analizado en esta Comunicación ya que es mejor conocido y repercute más directamente en la sismicidad inducida detectada en nuestro país. En ella seguiremos la línea de trabajo utilizada por Gough (1969) que utiliza un modelo de embalse bidimensional.

### Método

La geometría considerada es la de un embalse con una sección constante y de longitud infinita que reposa sobre un semiespacio elástico. La sección de este embalse puede ser vista como una poligonal de «n» lados. En la figura 1 se muestra dicha sección y los vértices A, B, C ... N. La línea BC representa una pared del embalse de longitud infinita perpendicular a la sección. Considerando un sistema de referencia en el que las coordenadas (u,v) son, respectivamente, perpendiculares y paralelas a BC, y con respecto a un origen definido en B, Gough (1969) calculó que los esfuerzos normales  $\delta_u$ ,  $\delta_v$  y el esfuerzo de cizalla  $\delta_{uv}$  producidos en

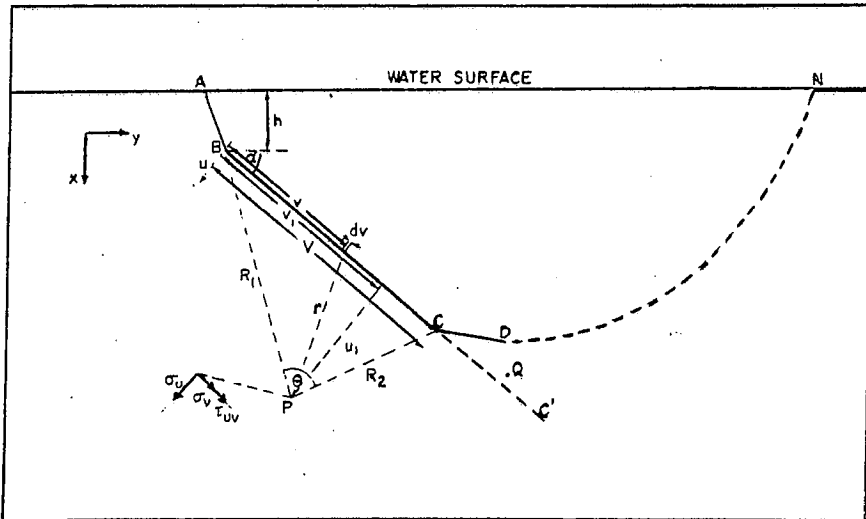


Fig. 1.- Geometría de un embalse en dos dimensiones utilizada en el cálculo de la variación de esfuerzos elásticos.

Fig. 1.- Cross-section of a two-dimensional reservoir which is used in the elastic stress increment determination.

un punto P del semiespacio homogéneo por la carga en BC, son :

$$\sigma_x = -\frac{\rho g u}{\pi} \theta (h + v \operatorname{sen} \alpha) [(V - v) R_2^{-2} + v R_1^{-2} + \theta u^{-1}] + u^2 \operatorname{sen} \alpha [R_1^{-2} - R_2^{-2}] \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{\rho g u}{\pi} \theta (h + v \operatorname{sen} \alpha) [\theta u^{-1} - (V - v) R_2^{-2} + v R_1^{-2}] + \operatorname{sen} \alpha \ln [R_2^{-2} R_1^{-2}] + u^2 \operatorname{sen} \alpha [R_2^{-2} - R_1^{-2}] \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\rho g u^2}{\pi} \theta h [R_1^{-2} - R_2^{-2}] + \operatorname{sen} \alpha [\theta u^{-1} - v R_2^{-2}] \quad (3)$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $V$  es el ancho de la banda BC,  $\theta$  es el ángulo de observación de BC a partir de P,  $R_1^2 = u^2 + v^2 = PB^2$  y  $R_2^2 = u^2 + (V - v)^2 = PC^2$

Tomando en cuenta (1), las expresiones de  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  y  $\sigma_{uv}$  para los puntos en BC ( $u=0$ ,  $\theta=\pi$ ) son:

$$\sigma_u = \sigma - \rho g (h + v \operatorname{sen} \alpha)$$

$$\tau_{uv} = 0$$

En el resto de la línea definida por el segmento BC ( $u=0$ ,  $\theta=0$ ), todos los esfuerzos son cero y por lo tanto no existe contribución para los puntos tal que  $u < 0$ ,  $v < 0$  ó  $u < 0$ ,  $v > V$ , simplificándose así los cálculos.

La contribución acumulada de todos los lados del embalse a los esfuerzos calculados en P se determina, previa rotación de ejes hacia el nuevo sistema  $(x, y)$  como se muestra en la figura 1. Usando las expresiones calculadas por Jaeger (1969), tenemos:

$$\sigma_x = \sigma \cos^2 \alpha + \sigma_y \operatorname{sen}^2 \alpha + 2 \tau_{xy} \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha$$

$$\sigma_y = \sigma \operatorname{sen}^2 \alpha + \sigma_x \cos^2 \alpha + 2 \tau_{xy} \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xy} (\cos^2 \alpha - \operatorname{sen}^2 \alpha) + (\sigma_x - \sigma_y) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

A partir de la tercera ecuación en (2) es posible calcular el esfuerzo máximo de corte  $\tau_{\max}$  en P y los buzamientos  $I_m$  e  $I_m + (\pi/2)$  de los planos que pasan por P y sobre los que actúa  $\tau_{\max}$  de la siguiente manera (Turcotte & Schubert, 1982):

$$\tau_{\max} = (1/2) [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \tau_{xy}^2]^{1/2}$$

$$I_m = (1/2) \arctan [(\sigma_x - \sigma_y) / (2 \tau_{xy})]$$

(3)

El tipo de estudio de los incrementos de esfuerzos dependerá de la clase de fallamiento en la región de interés. Si ésta no es conocida, conviene calcular  $\sigma_{\max}$ . Si existen fallas normales, la atención se dirigirá preferentemente hacia  $\sigma_x$ .

**Program INCRES**

El algoritmo descrito se ha desarrollado en el programa informático INCRES cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 2. Los parámetros de entrada que definen el área de interés y las dimensiones del embalse bidimensional son los siguientes:

Número de puntos en la dirección x, que corresponde a la profundidad. El valor típico es 101.

Número de puntos en la dirección y. El valor típico es 101.

Densidad del agua: 1 gr.cm<sup>-3</sup>

Aceleración de la gravedad: 981 cm.s<sup>-2</sup>

Número de vértices de la poligonal que define la sección del embalse ( $N_c$ )

Coordenadas ( $X_i, Y_i$ ) en cm, de los vértices de la poligonal ( $i=1, N_c$ ).

Espaciamientos  $\delta x, \delta y$  en cm. Valores típicos:  $0.5 \times 10^4, 6 \times 10^4$

Primer punto del área de interés: Valor típico: (0,0)

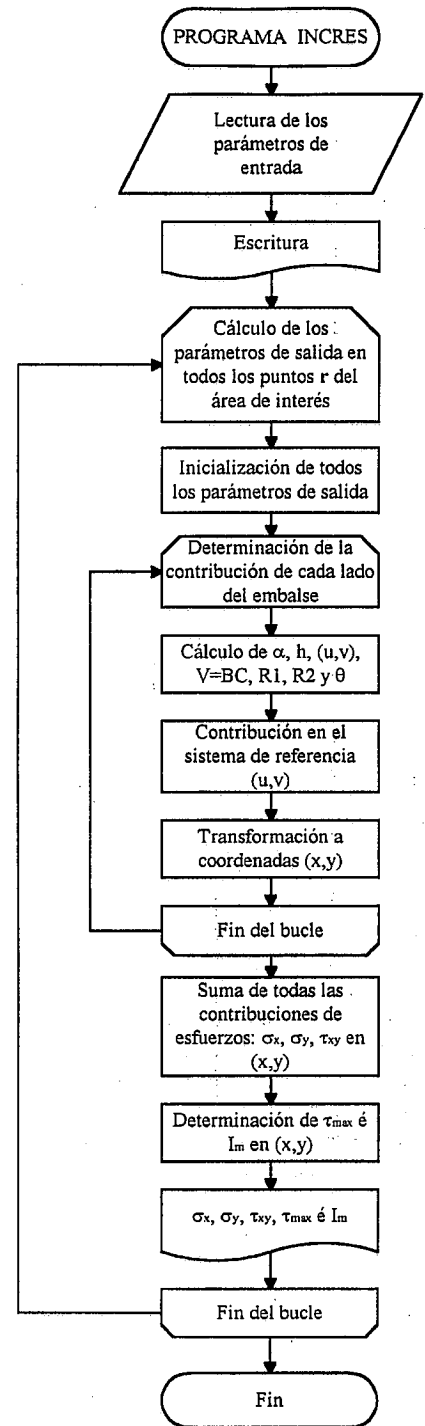


Fig. 2.- Diagrama de flujo del programa INCRES

Fig. 2.- Flow-chart of the INCRES program.

A su vez los parámetros de salida, que se almacenan sistemáticamente para cada uno de los puntos de una rejilla que cubre el área analizada, son:

- El esfuerzo normal:  $\sigma_x$  (dinas.cm<sup>-2</sup>)
- El esfuerzo normal:  $\sigma_y$  (dinas.cm<sup>-2</sup>)
- El esfuerzo de cizalla:  $\sigma_{xy}$  (dinas.cm<sup>-2</sup>):
- El esfuerzo máximo de cizalla:  $\sigma_{\max}$  (dinas.cm<sup>-2</sup>)

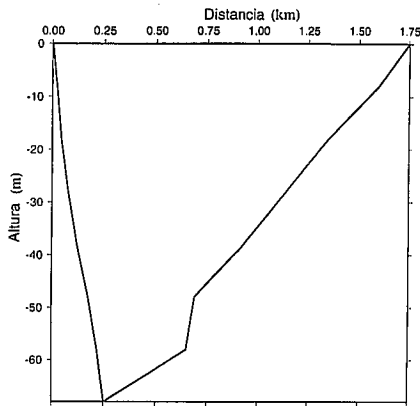


Fig. 3.- Corte transversal del embalse de Entrepeñas.

Fig. 3.- Cross-section of the Entrepeñas reservoir.

El buzamiento del plano a través de P y sobre el cual actúa  $\sigma_{max} : I_m$  (grados)

**Aplicación al caso del embalse de Entrepeñas**

La validez del programa INCRES ha sido confirmada aplicándolo a dos casos de embalses de geometría sencilla (rectangular y triangular) estudiados previamente por Gough (1969). Para su aplicación a un caso real se ha elegido el embalse de Entrepeñas que por su altura (87 m) y su capacidad ( $802 \times 10^6 m^3$ ), es uno de los más importantes de España. Con ello no se pretende afirmar que genere sismicidad inducida, sino motivar la aplicación de esta metodología a los embalses españoles.

Para el estudio se ha tomado un corte transversal al embalse localizado en una zona del mismo donde la anchura es 1.75 km y la diferencia de altura entre los niveles superior e inferior alcanza 68 m. La dimensiones de la zona donde se evalúa el esfuerzo de cizalla son 5.25 km de largo y 5.25 km de profundidad. En la figura 3 se observa que la parte izquierda del corte presenta una mayor pendiente que la parte derecha.

La variación del esfuerzo máximo de cizalla obtenida se muestra en la figura 4. La línea sólida cerrada delimita la zona donde los resultados son mayores que el 95% del valor máximo hallado en el área de estudio. Esta región, que se llama «zona crítica», se sitúa bajo el flanco izquierdo del corte, a una profundidad media de 0.5 km. Por su parte, las líneas discontinuas señalan la inclinación de los planos a lo largo de los cuales actúa el esfuerzo máximo de cizalla. Para la zona crítica encontrada, estos ángulos varían entre 20° y 50°. Lógicamente, esta zona de máximos esfuerzos es el área para la que, si se instalara una red de vigilancia con objeto de controlar la actividad sísmica inducida, las localizaciones

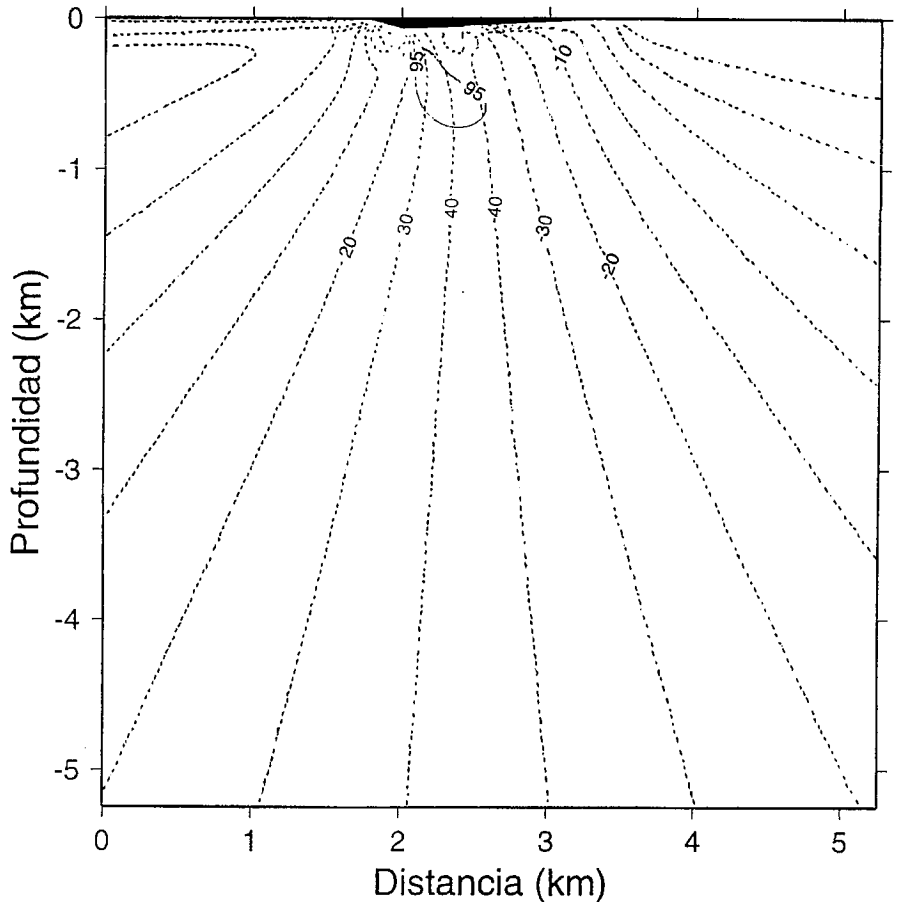


Fig. 4.- Esfuerzo máximo de cizalla bajo el embalse de Entrepeñas, cuyo corte es mostrado en la parte superior. La línea cerrada señala la zona denominada crítica, donde los valores correspondientes son mayores del 95% del valor máximo en toda el área de interés. Las líneas discontinuas indican los ángulos bajo los cuales actúa el esfuerzo máximo de cizalla.

Fig. 4.- Maximum shear stress below the Entrepeñas reservoir whose cross-section is shown at the top. Closed line corresponds to the «critical zone» where maximum shear stress values are greater than the 95% of the maximum value reached in the studied area. Broken lines give the angles across which maximum shear stress acts.

deberían ser más precisas. El diseño y la optimización de este tipo de redes constituyen el tema de otra Comunicación en este Congreso.

**Agradecimientos**

El presente trabajo ha sido uno de los resultados del Proyecto de Investigación «Optimización del diseño de redes de microsismicidad. Aplicación a la sismicidad natural e inducida por grandes presas en la Comunidad de Madrid y áreas próximas», financiado por la Fundación Caja de Madrid. La Confederación Hidrográfica del Tajo facilitó amablemente el acceso a mapas y datos acerca del embalse de Entrepeñas.

**Referencias**

Buform, E. y Udías, A. (1982): *Rev. de Geofísica*, 38, 43-52  
 Carder, D.S. (1945): *Bull. Seism. Soc. Am.*, 35, 175-192.  
 García Yagüe, A. (1973): *Rev. de Obras Públicas*, año CXX, núm. 2100, 743-760.

Gough, D. I. (1969): *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6, 1067-1075.  
 Jaeger, J. C. (1969): *Elasticity, Fracture and Flow, with Engineering and Geological applications*. Science Paperbacks, Chapman & Hall.  
 Lindo, R. y Herraiz, M. (1995): *Tercer Informe del Proyecto «Optimización del diseño de redes de Microsismicidad. Aplicación a la sismicidad natural e inducida por grandes presas en la Comunidad de Madrid y áreas próximas»*, Madrid, Junio 1995.  
 Lindo, R. y Herraiz, M. (1996): «*Geofísica Aplicada*» (nº 7 de la colección Física de la Tierra), M.C. Hernández y M. Herraiz Editores, Ed. Complutense (en prensa)  
 Lindo y Herraiz (en este número)  
 Rajendran, K y Talwani, P. (1992): *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1867-1888  
 Simpson, D.W.; Leith, W.S. y Scholz, C.H. (1988): *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 2025-2040.  
 Talwani, P. y Acree, S. (1985): *PAGEOPH*, 122, 947-965  
 Turcotte, D. L. y Schubert, G. (1982): *Geodynamics: Application of Continuum Physics to Geological Problems*. John Wiley & Sons, Inc.