

# ÁREAS PROBABLES DE RUPTURA SÍSMICA EN EL BORDE OCCIDENTAL DEL PERÚ, A PARTIR DE LA VARIACIÓN DEL PARÁMETRO “b”

Cristóbal Condori y Hernando Tavera

Dirección de Sismología-Instituto Geofísico del Perú. Email: [crístóbal.condori@igp.gob.pe](mailto:crístóbal.condori@igp.gob.pe);  
[hernando.tavera@igp.gob.pe](mailto:hernando.tavera@igp.gob.pe)

## RESUMEN

Se ha evaluado la presencia de asperezas para el borde occidental de Perú, propensas a producir, en el futuro, sismos de gran magnitud, todos asociados al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Para tal fin, se aplica la metodología propuesta por Wiemer y Wyss. (1997), y que considera la variación espacio-tiempo del parámetro “b”. Se utiliza el catálogo sísmico del IGP, para el período de 1970 a 2010 con una magnitud de completitud de 3.8 Ms. Los resultados infieren la presencia de 5 áreas de acumulación de energía o asperezas ubicadas entre los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna; hacia al Norte del departamento de Arequipa; dos asperezas frente a la costa de Lima y Ancash, y otra entre los departamentos de Piura y Lambayeque. Estas áreas y/o asperezas tienen valores máximos para períodos de retorno de 50 años y para sismos con magnitudes mayores a 7Ms.

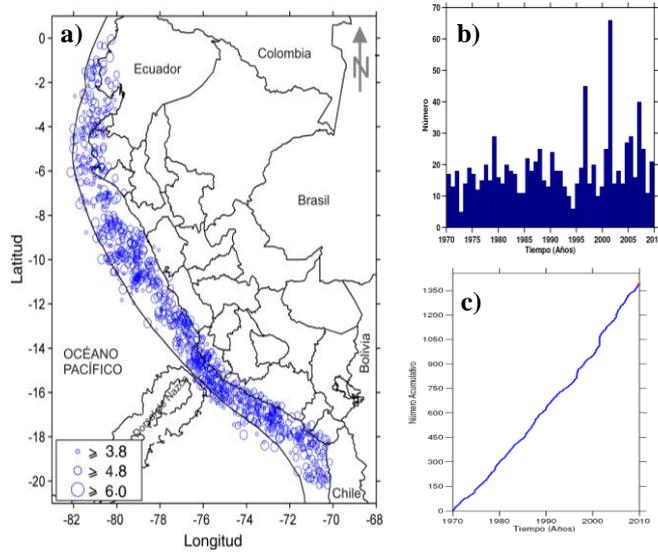
## INTRODUCCIÓN

El Perú forma parte de la región sísmica más activa del mundo debido a que se encuentra ubicado dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, donde se libera más del 80% de la energía sísmica a nivel mundial. En el Perú la actividad sísmica está directamente asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, la cual se da a una velocidad relativa de 6 a 7 cm/año (DeMets et al., 1990). Este proceso dio origen a los terremotos más grandes ocurridos en el Perú, como los del 17 de octubre de 1966 (7.7Mw Lima), 31 de mayo de 1970 (7.9Mw Ancash), 3 de octubre de 1974 (7.9Mw Lima), 12 noviembre de 1996 (7.7Mw Nazca), 23 de junio del 2001 (8.2Mw Arequipa), y 15 de agosto del 2007 (7.9Mw Pisco). Todos estos terremotos produjeron cuantiosos daños materiales y pérdidas de vidas humanas. En la actualidad se tiene amplio conocimiento acerca de este peligro, mas no se sabe cuando ha de ocurrir, es por eso que durante los últimos años varios investigadores han desarrollado diversos métodos de predicción, sin lograr el objetivo de conocer la fecha de recurrencia de los grandes sismos. Sin embargo, sí ha sido posible caracterizar y localizar las áreas probables donde podría generarse un futuro terremoto de magnitud elevada ( $\geq 7.0Ms$ ). Una de las metodologías propuestas para identificar estas áreas fue desarrollada por Wiemer y Wyss (1997), y se basa en la distribución frecuencia-magnitud de los sismos  $LogN=a-bM$  (Gutenberg y Richter, 1944). Estos investigadores, señalan que las zonas con alta concentración de esfuerzos (Asperezas) se caracterizan por presentar valores bajos del parámetro “b”, siendo sus dimensiones proporcionales a las del área de ruptura y a la magnitud del sismo. Asimismo, este método permite calcular el período de retorno de los sismos asociados a dichas asperezas. El término “Aspereza” define a un área presente en la superficie de fricción de placas en la cual no ha ocurrido un sismo de gran magnitud durante un largo período de tiempo, lo que ocasiona que se acumule la energía elástica suficiente como para producir un gran sismo. El método propuesto por Wiemer y Wyss (1997), fue aplicado en diversas zonas de subducción en el mundo, tal es el caso de Zúñiga y Wyss (2001) que buscaron localizar las grandes asperezas a lo largo de la Costa occidental de México, y Katsumata, (2006), en el estudio de la variación del valor del parámetro “b” en profundidad en Japón. En ambos casos, el objetivo fue identificar la presencia de asperezas o áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de sismos de magnitud 7.2Ms. En el Perú, el método fue aplicado por Heras y Tavera (2002) al borde occidental, llegándose a identificar asperezas frente a los departamentos de Arequipa e Ica. La

primera dio origen el sismo el 23 de junio del 2001 y el segundo, al sismo de Pisco del 15 de agosto del 2007.

## DATOS

La base de datos utilizada en este estudio fue extraída del catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (período 1970 - 2010), todos con focos ubicados a profundidades menores a 60 Km. con una magnitud de completitud de 3.8Ms y considera un total de 1367 eventos sísmicos distribuidos a lo largo del borde occidental del Perú (Figura 1a). Los valores dependientes o réplicas fueron depurados aplicando el algoritmo de Reasenberg (1985). El mismo que permitió eliminar las réplicas correspondientes a los terremotos de 1970, 1974, 1996, 2001 y 2007 (Figura 1b). Finalmente, se presenta una curva acumulativa de forma lineal (Figura 1c), la cual define la homogeneidad de la base de datos a utilizar en este estudio.



**Figura 1.** a) Distribución epicentral de los eventos sísmicos que constituyen el catálogo utilizado en este estudio: período 1970-2010. b) Histograma de sismos. c) Distribución acumulada de sismos en función del tiempo para el período 1970-2010.

## MÉTODO

El cálculo de los valores de “a” y “b”, se obtiene a partir de la relación frecuencia-magnitud de los sismos (Ec. 1). Y empleando el método de máxima verosimilitud ya que presenta mejores límites de confianza (Aki, 1965) (Figura 2).

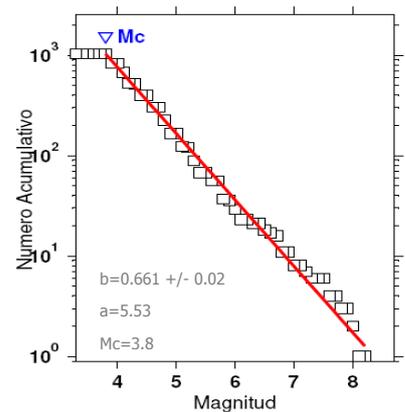
$$\text{Log } N = a - bM \quad (1)$$

Donde, N es el número acumulado de sismos con magnitud mayor o igual a M. Luego, en base a esta ecuación se estima el período de retorno de un sismo con magnitud M utilizando la siguiente ecuación:

$$P_r(M) = T_L(M) = \Delta T / 10^{(a-bM)} \quad (2)$$

Donde  $\Delta T$  es el período de datos considerados en el estudio,  $P_r(M)$  o  $T_L(M)$  es el período de recurrencia y M la magnitud del sismo para el cual se desea conocer su período de recurrencia.

Para la elaboración de los mapas de valores del parámetro “b” y  $P_r$ , se utilizó la técnica de grillado codificada en el programa ZMAP (Wiemer y Zúñiga, 1994). El espaciamiento de nodos en el área de



**Figura 2.** Distribución frecuencia-magnitud de los sismos para el borde occidental del Perú, período 1970-2010.

estudio fue de  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  con un radio constante de 150 Km. alrededor de cada nodo. El radio constante es un valor promedio asumido a partir de la longitud de ruptura de los principales terremotos ocurridos en el período de 1970 a 2010.

## RESULTADOS

### DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE “b” Y PERÍODOS DE RETORNO

Los resultados obtenidos en este estudio para el borde occidental de Perú, son presentados en las Figuras 3 y 4. Los valores del parámetro “b” varían entre 0.5 a 1.1 (Figuras 3a). La distribución espacial de estos valores, ha permitido caracterizar y localizar geográficamente la presencia de hasta cinco áreas con alta concentración de energía elástica (áreas de color rojo) debido a la fricción y acoplamiento de las Placas de Nazca y Sudamericana. Estas asperezas se encuentran distribuidas en forma heterogénea en:

- Región Sur del Perú, cubriendo las costas de los departamentos de Tacna, Moquegua y parte sur del departamento de Arequipa.
- Al norte del departamento de Arequipa, frente a la localidad de Yauca.
- Exactamente frente a la costa del departamento de Lima.
- Al norte del departamento de Lima y frente al departamento de Ancash.
- Frente a las costas de los departamentos de Lambayeque y Piura.

El mapa de períodos de retorno (Figura 3b), fue calculado a partir de la ecuación 2 para una magnitud  $M=7.0$  considerando la distribución de los valores del parámetro “b”. El resultado proporciona un mapa con áreas o asperezas definidas con mayor resolución, siendo las mismas coherentes con el mapa de valores del parámetro “b” (Figura 3a). Las áreas con valores mínimos de tiempo de recurrencia local oscilan entre 40 y 70 años.

De manera complementaria, es posible determinar la magnitud de los sismos que se producirían. A partir de las dimensiones del área de estas asperezas, asumiendo que ellas en conjunto forman parte de toda el área involucrada en la ruptura (Figura 3b). La magnitud momento  $M_w$  puede ser estimada utilizando la ecuación de Kanamori y Anderson (1975).

$$M_0 = 0.70 \times 10^{22} S^{3/2} \text{ dina - cm, } S \text{ en Km}^2 \quad (3)$$

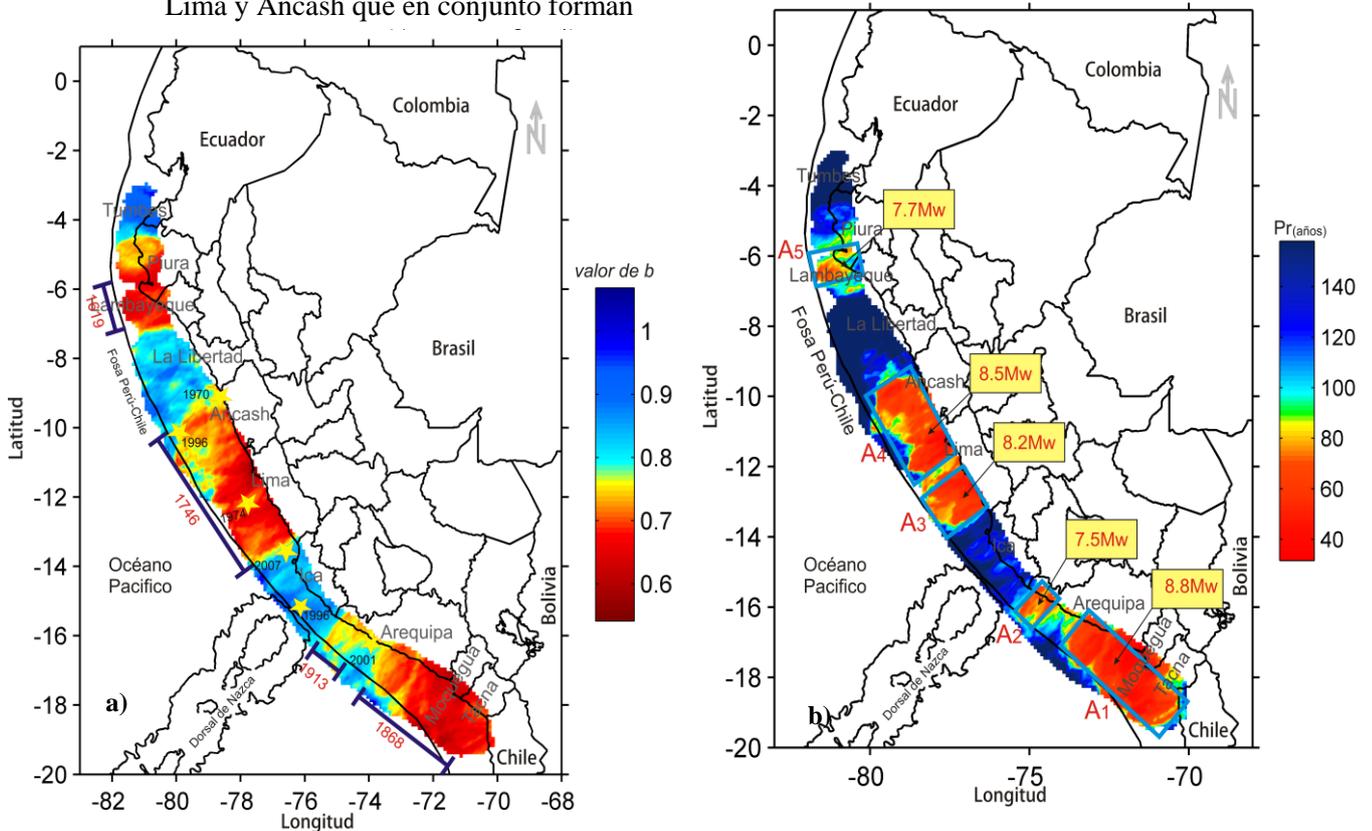
$$M_w = \frac{2}{3} (\log_{10} M_0 - 16.1) \quad M_0 \text{ en dina - cm} \quad (4)$$

- **Asperiza (A1).**- El área estimada para esta asperiza es de  $89797 \text{ Km}^2$  y la magnitud que podría alcanzar el sismo sería del orden de  $8.8M_w$ .
- **Asperiza (A2).**- Esta asperiza presenta un área aproximada de  $4912 \text{ Km}^2$  equivalente a una magnitud estimada de  $7.5M_w$ .
- **Asperiza (A3).**- Esta asperiza presenta un área de  $23943 \text{ Km}^2$  y su magnitud estimada es de  $8.2M_w$ .
- **Asperiza (A4).**- Esta asperiza presenta un área de  $46650 \text{ Km}^2$  y su magnitud estimada es de  $8.5M_w$ .
- **Asperiza (A5).**- Esta asperiza presenta un área de  $8207 \text{ Km}^2$  y su magnitud estimada es de  $7.7M_w$ .

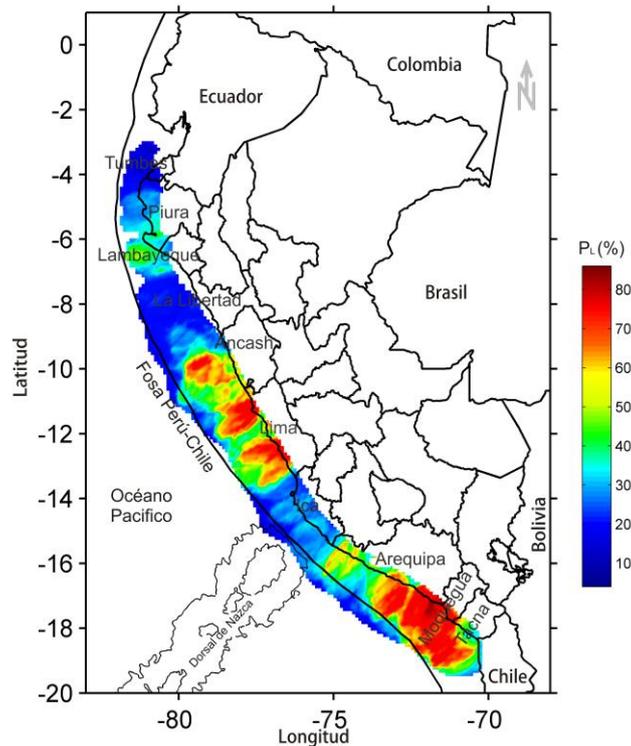
### PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

Adicionalmente, se procedió a calcular la probabilidad de ocurrencia para un sismo con magnitud  $M=7.0$ , y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4. De acuerdo a los resultados las asperezas que presentan la más alta probabilidad de producir un sismo de magnitud  $M_s \geq 7.0$  se encuentran ubicadas:

- Frente a las costas de los departamentos de Tacna, Moquegua y parte sur del departamento de Arequipa (Aspezeza 1).
- Ubicada frente a los departamentos de Lima y Ancash que en conjunto forman



**Figura 3.** a) Distribución espacial de los valores del parámetro “b” en el borde occidental del Perú, las barras indican las longitudes de ruptura estimados para los terremotos históricos, las estrellas amarillas indican los epicentros de los terremotos ocurridos en el período 1970-2010. b) Mapa de períodos de retorno local y su estimación de la magnitud en función del área para las aspezezas identificadas en este estudio, las mismas están enumeradas como: A1, A2, A3, A4 y A5.



**Figura 4.** Mapa de probabilidad de ocurrencia para sismos  $M_s \geq 7.0$  para el borde occidental del Perú.

## CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología propuesta por Wiemer y Wyss (1997), en el borde occidental del Perú, permite llegar a las siguientes conclusiones:

1. Los valores del parámetro “b” a lo largo del borde occidental del Perú varían entre 0.5 a 1.1 y los periodos de recurrencia para terremotos con magnitud mayor a 7.0Ms, oscilan entre 50 y 70 años. Estos valores sugieren que la región de estudio es, por demás, compleja y heterogénea en su proceso de deformación y acumulación de energía.
2. La distribución espacial de los valores del parámetro “b”, han permitido identificar la ubicación geográfica de 5 asperezas que representan ser fuentes probables de producir sismos con magnitudes mayores a 7.0Ms en el futuro. Estas asperezas son:
  - Asperenza ubicada en la región sur del Perú, frente a las costas de los departamentos de Tacna, Moquegua y parte Sur del departamento de Arequipa, (16.436 ° a 19.129 ° S).
  - Asperenza ubicada al norte del departamento de Arequipa, frente a la localidad de Yauca, (15.564° a 16.147° S).
  - Asperenza ubicada en la región centro del Perú, frente a la costa del departamento de Lima (12.130° a 13.367° S).
  - Asperenza ubicada frente a las costas de los departamentos de Ancash y parte norte del departamento de Lima (9.417° a 11.914° S).
  - Asperenza ubicada en la parte norte del Perú, exactamente frente a las costas de los departamentos de Piura y Lambayeque (5.397° a 7.132°S).
3. Las probables áreas de ruptura asociadas a los grandes sismos ocurridos en el período histórico (1619, 1746, 1868, 1913), coinciden con la distribución de las áreas de valores anómalos del parámetro “b”; es decir, con las asperezas identificadas en este estudio.
4. Las asperezas identificadas en este estudio presentan geometrías y ubicaciones geográficas similares a los propuestos por otros autores basados en datos de GPS.
5. Las asperezas con mayor probabilidad a generar un sismo de gran magnitud se encuentran frente a los departamentos de Lima, Ancash y frente a los departamentos Arequipa, Moquegua y Tacna.

## REFERENCIAS

- **Aki K. (1965).** Maximum likelihood estimate of b in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. Vol. 43 pp.237 – 239.
- **DeMets C., Gordon,R., Arhus, A., Stein, S. (1990).** Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425 - 478
- **Gutenberg R. y Richter C.F. (1944).** Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 34, 185-188.
- **Heras H. y Tavera H. (2002).** Localización de áreas probables a ser afectadas por grandes sismos en el borde oeste de Perú: Estimación a partir de períodos de retorno local basado en distribución de valores de “b”. Centro Nacional de Datos Geofísicos, boletín de la S.G.P. pp. 7-16.
- **Kanamori, H., Anderson, D. L. (1975).** Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seismology. Soc. Amr.*, 65, 1073-1096.
- **Katsumata, K. (2006).** Imaging the high b-value anomalies within the sub ducting plate in the Hokkaido corner. *Earth Planets Space*, 58, -e49-e52.
- **Reasenber, P. (1985).** “Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982”. *Journal Geophysical Research*, vol. 90, No. B7, Pages 5479-5495.

- **Wiemer S. y Wyss M. (1997).** Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times? *Jour. Geophys. Res.* 102, 15115-15128.
- **Wiemer S. y Zuñiga R. (1994).** ZMAP a software package to analyze seismicity, *EOS, Transactions, Fall Meeting, AGU*, 75, 456.
- **Zuñiga R. y Wyss M. (2001).** Most and least likely locations of large to great earthquakes along the pacific coast of Mexico, estimate from local recurrence times based on b-values, *Bulletin of the Seismological Society of America December 2001 vol.91 no. 61717-1728.*