

## **Estimación de la peligrosidad sísmica que afecta a la ciudad de Salta**

**Lía Orosco y Mika Haarala-Orosco\***

***liaorosco@gmail.com***

### **Resumen**

En este artículo se estima la amenaza sísmica sobre la Ciudad de Salta, haciendo uso de una metodología probabilista. Se considera el catálogo instrumental del período 1964-2008 del Centro Sismológico Internacional (ISC) cuyas magnitudes fueron homogeneizadas a magnitud momento (Mw).

Se definen cinco zonas sismogénicas de las que cuatro corresponden a sismos superficiales y una a sismos de mediana profundidad. Se determinaron las curvas de excedencia de magnitudes para cuatro sismos de diseño y con varias relaciones de atenuación calculados para otros ambientes sísmicos similares al que presenta la Provincia de Salta, se calcularon las aceleraciones en roca en la ciudad, para cada zona sismogénica considerada.

Las fuentes sismogénicas ubicadas en el frente de deformación de Sierras Subandinas y en el Valle de Lerma y sus alrededores, son las determinantes para definir la peligrosidad sísmica de la Ciudad de Salta.

**Palabras Claves: riesgo sísmico, acelerogramas, potencial de daño**

---

\* Lía Orosco es Doctora Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Cataluña en el área de la Ingeniería Sísmica. Es Profesora Titular de la Cátedra Construcciones de Hormigón Armado, en la Facultad de Ingeniería e Informática de la UCASAL. Mika Haarala Orosco, es Msc en Matemáticas, por la Universidad de Joensuu, Finlandia. Es investigador del Instituto de Estudios Intedisciplinarios de Ingeniería, de la UCASAL, en el área de Matemática Aplicada y Estadística.

## 1. Introducción

En su acepción más simple y básica, el riesgo sísmico de una ciudad es el resultado de dos elementos o conceptos básicos: la peligrosidad o amenaza y la vulnerabilidad de la misma. La peligrosidad engloba el fenómeno natural en sí mismo, y aquellos aspectos que hacen que este peligro se vea amplificado o reducido; entre los más importantes se tienen los “efectos de sitio” y entre estos se cita como ejemplo, la amplificación de la respuesta debido a suelos blandos.

La vulnerabilidad también comprende varios aspectos (Carreño et al., 2007). La vulnerabilidad física, relacionada al estado de las obras que el hombre construye (edificios, puentes, torres de electricidad, acueductos, etc.) es la más conocida y evidente. El ser humano puede en mayor o menor medida, según las circunstancias, manejar la vulnerabilidad, y por ende, reducir o aumentar el riesgo sísmico del sitio donde vive y se desarrolla.

Toda acción encaminada a reducir el riesgo sísmico implica básicamente reducir la vulnerabilidad. Con respecto a la peligrosidad, si bien no es posible actuar sobre los mecanismos que producen los sismos, si es necesario conocer el fenómeno lo máximo posible. De esta manera, se contribuye al objetivo de reducir el riesgo, ya que este conocimiento es básico para hacer efectivas medidas apropiadas de reducción de vulnerabilidad que entre otras comprenden la definición de la acción sísmica con fines de diseño sismorresistente, tanto para obras nuevas como para reforzar obras existentes, pensar escenarios de catástrofes para diseñar políticas de gestión de la emergencia, trazar planes de prevención, etc.

Este trabajo es un aporte al conocimiento de la peligrosidad sísmica que amenaza la ciudad de Salta. Esta amenaza se define en términos probabilistas o deterministas, o bien en base a una combinación de ambas filosofías según el caso.

En regiones como el noroeste argentino, se está lejos aún de poder definir niveles de amenazas en base a criterios puramente deterministas, ya que se debería tener un conocimiento profundo y

exacto de las estructuras que provocan los sismos que afectan la ciudad, y no se posee esta información. Por ello, el criterio probabilista se impone, ya que se tiene alguna información dada sobre todo por la red sísmica mundial y en los últimos tiempos por la red nacional, a cargo del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES).

La peligrosidad sísmica será definida en términos de **máxima aceleración en “roca”** en el sitio, ya que la norma sismorresistente en vigencia en el país, define la acción sísmica en términos de espectros elásticos de pseudoaceleración.

En base a los principios sentados por Cornell (1.968), la peligrosidad o amenaza sísmica puede expresarse en forma probabilista como:

$$v(a) = \sum_{i=1}^{N_s} v_i \times \iint [P(a > a_0 / m, r)] f(m) f(r) dm dr \quad (1)$$

donde  $v(a)$  es la probabilidad que un valor de aceleración en roca exceda un cierto valor umbral  $a_0$ ;  $v_i$  representa la tasa de ocurrencia de sismos con magnitudes más elevadas que un cierto valor límite  $m_0$  en la zona sismogénica  $i$  ( $N_s$  es el número de zonas que afectan el sitio);  $f(m)$  y  $f(r)$  son funciones de densidad de probabilidad independientes de la magnitud y la distancia, mientras que  $p(a > a_0 / m, r)$  es la probabilidad condicional y está relacionada a leyes de atenuación regional, de tal forma que es uno menos la función de distribución acumulada para la atenuación de  $a$ .

Cada componente de la fórmula anterior es considerada en este trabajo, ya sea en forma probabilista o determinista, por lo que el modelo utilizado podría definirse como “híbrido”.

Por lo tanto, las principales consideraciones a realizarse para el

logro del objetivo de este trabajo son:

- a) Definición de escenarios sísmicos donde las zonas potenciales que pueden afectar al sitio bajo estudio son identificadas y analizadas.
- b) Definición de un marco probabilista para determinar la tasa de excedencia de la magnitud en cada una de la zonas sismogénicas, dado un cierto período de tiempo.
- c) Cálculo de la aceleración máxima en roca en la Ciudad de Salta, obtenidas aplicando leyes de atenuación, definidas en función de la magnitud y distancias para valores picos de la aceleración en roca. Se elige este parámetro pues la acción sísmica está definida en el Reglamento Sismorresistente en vigencia por medio de espectros (en realidad pseudoespectros elásticos) de aceleración Para la región bajo estudio no hay definidas leyes de atenuación propias, debida a la falta de registros de sismos fuertes; por ello, se han considerado varias expresiones propuestas en la bibliografía a fin de reducir la incertidumbre por la falta de tales leyes locales.

## **2. Definición de las fuentes sismogénicas que afectan el sitio**

Se tomó como área de estudio un radio de 200 km alrededor del sitio. Para el análisis probabilista se considera un catálogo derivado del ISC Comprehensive Bulletin (2.001) para el periodo 1.964 - Julio 2.008 del Catálogo ISC (International Seismic Center); 2008 es el último año que figura en este catálogo, ya que existe un período en que se hacen los cálculos para definir con menos incertidumbre los parámetros de cada evento. La Figura 1 muestra el sitio de estudio (con una cruz), la zona de influencia considerada (radio de 200 km) y los eventos en profundidad. Los colores señalan el rango de magnitud de los mismos.

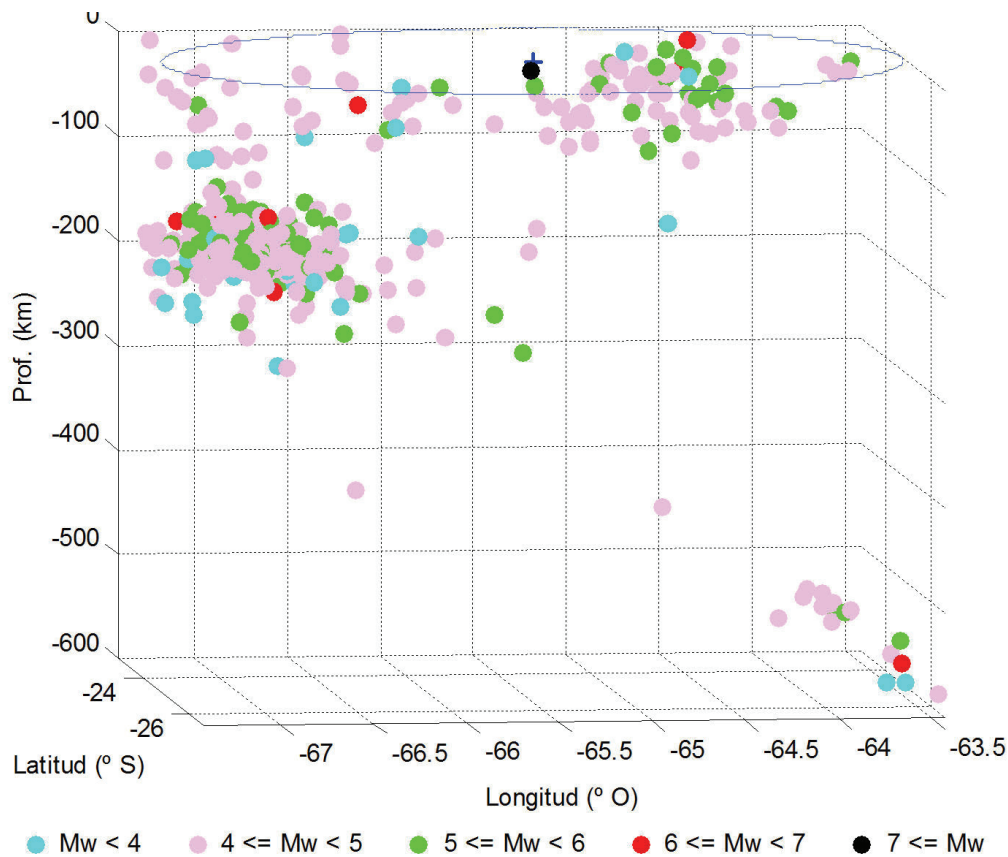


Figura 1: Ubicación de focos en profundidad de eventos ubicados en un radio de 200 km de la ciudad de Salta

Se hicieron intentos de homogeneizar las distintas clases de magnitudes que incluyen los distintos catálogos, con expresiones disponibles en la literatura para la zona (Sudamérica) que son lineales; pero ellas no son adecuadas como lo demuestra la Figura 2. Esta representa los eventos tomados en una región de latitud  $[+5^{\circ} -55^{\circ}]$  y longitud  $[-60^{\circ} -90^{\circ}]$  en dos tipos de magnitud: en el eje de las abscisas se tienen los valores en magnitud momento y en la ordenada, se muestran los valores en magnitud de onda de cuerpo (período corto). Un análisis de regresión no lineal, da como resultado una curva que tiene la siguiente expresión

$$m_b = e^{\left(\frac{-15,70}{M_w} + 5,58\right)^{0,5}}$$

(2)

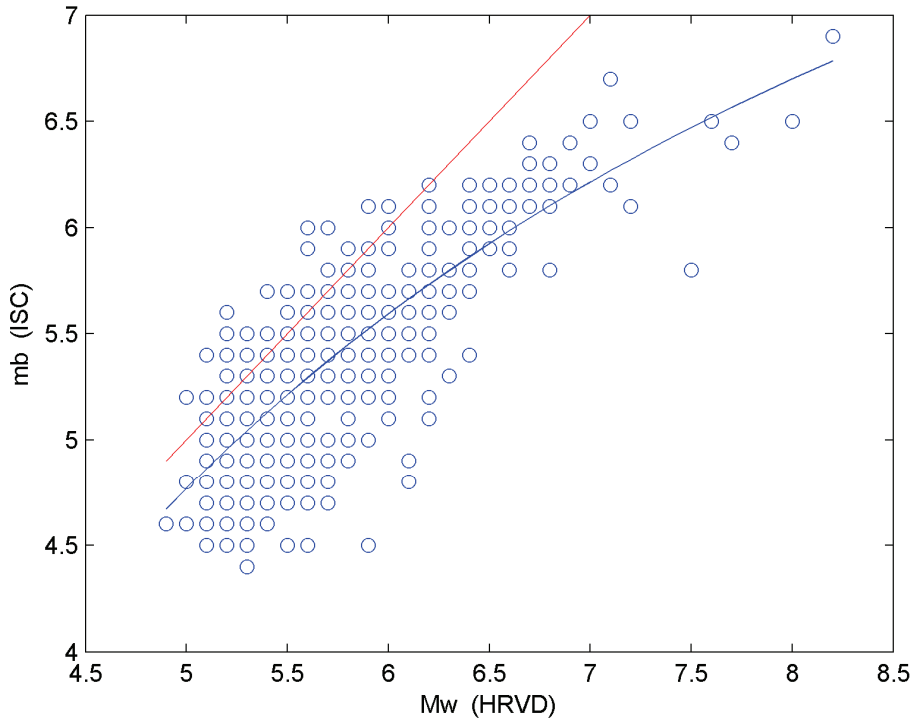


Figura 2: Relación entre  $M_w$  y  $m_b$ . La gráfica resume datos del catálogo ISC y el catálogo de la Universidad de Harvard (HRVD), tal como fueron publicados en el boletín ISC. La curva en azul, muestra la regresión no lineal.

Otra operación que se realiza sobre el catálogo es el filtrado de réplicas ya que debe considerarse sólo el movimiento principal que define el evento sísmico. En este caso, se tomó el criterio de Davis y Frolich (1991)

$$d_{st} = (d^2 + C^2 T^2)^{1/2} \quad (3)$$

donde  $d_{st}$  está en km,  $d$  es la distancia entre dos eventos (km),  $T$  el tiempo entre ellos (días) y  $c$  una constante que relaciona distancias y tiempo y que se sugiere sea igual a 1km/día para sismos en Sudamérica. Se tomó como corte para definir réplicas, un valor  $d_{st} = 75$  km.

Se hace una clasificación de la sismicidad según la profundidad de los focos, de tal manera de identificarlos como superficiales (menor a 70 km de profundidad focal); sismicidad media, cuando estos focos se ubican en el intervalo 70 km a 350 km y finalmente los sismos profundos cuando se originan a más de 350 km de profundidad.

En la Figura 3 se aprecia la sismicidad superficial; en la Figura 4 se muestra la sismicidad de profundidad media; en principio, son las que serán consideradas en el análisis.

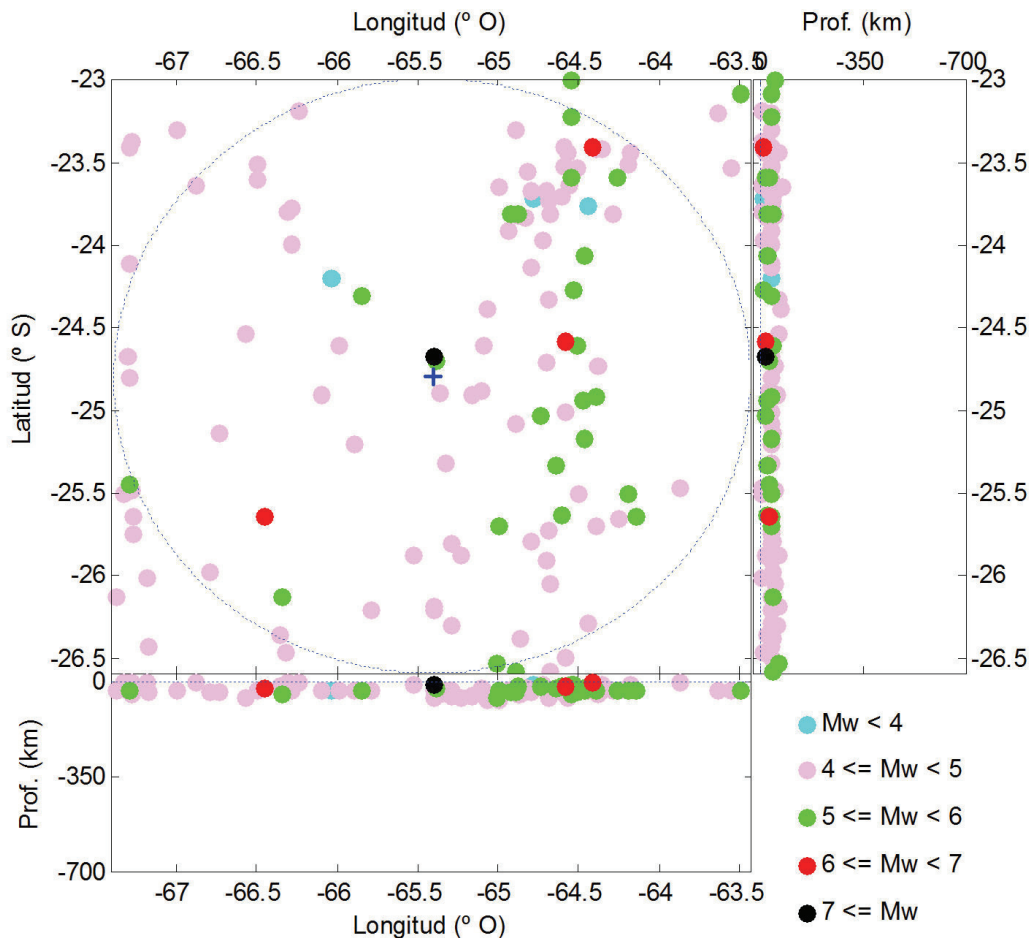


Figura 3: Sismicidad superficial que afecta la Ciudad de Salta

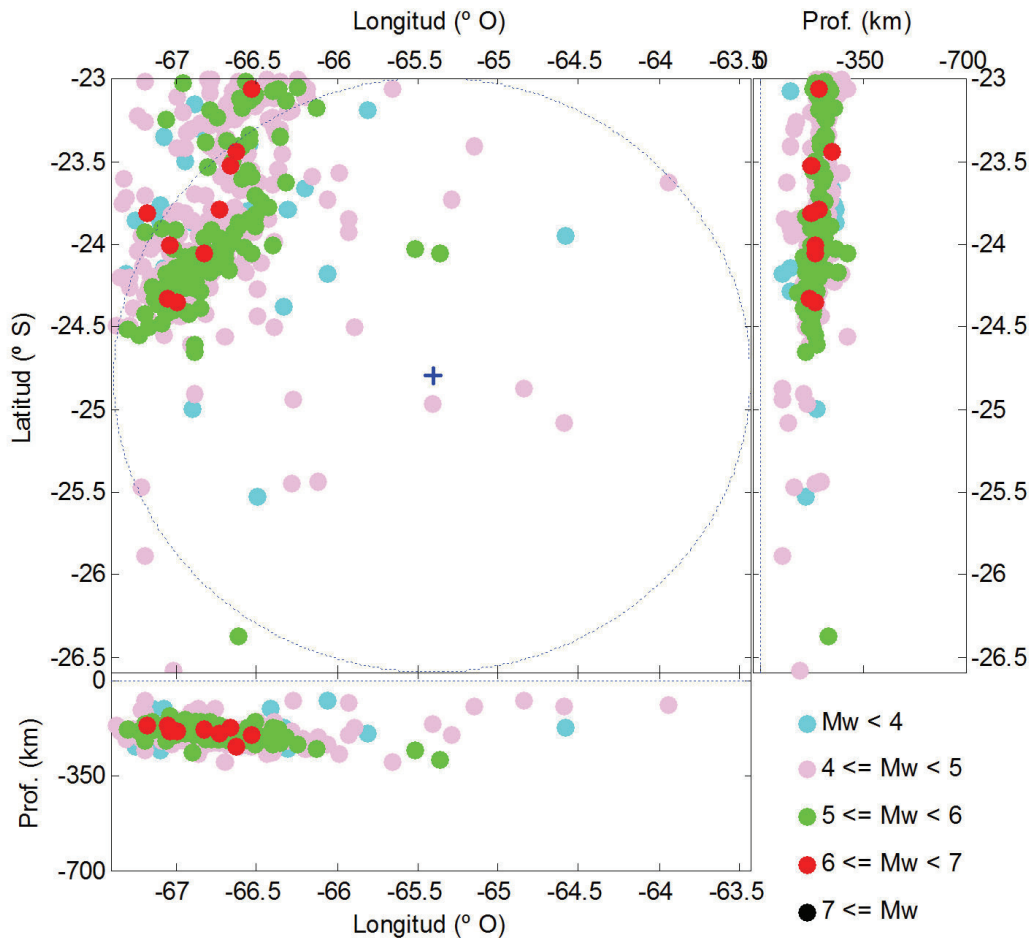


Figura 4: Sismicidad media que afecta la Ciudad de Salta

Se han definido cinco zonas sismogénicas que afectan a la Ciudad de Salta, considerando un sitio céntrico de la misma, de coordenadas  $65,41^{\circ}\text{O}$  ,  $24,79^{\circ}\text{S}$ , señalado con una cruz azul en las figuras. Las zonas 1 a 4 comprenden sismos superficiales. Se definen las zonas en base a la distribución de eventos que resultan de la proyección en superficie de los focos. En cada una de ellas, se considera que la sismicidad es homogénea. La zona 1 (Figura 5) engloba los sismos que se alinean al este de la ciudad y comprenden la franja donde se han originado los sismos históricos más intensos. Corresponden al frente de



deformación este que provoca el fenómeno de subducción de la Placa de Nazca, debajo de la Sudamericana. En general se origina un ambiente con predominio de tensiones de compresión, lo que origina movimientos de fallas inversas y superficiales.

La zona 2 representa la sismicidad superficial difusa situada en el mismo Valle de Lerma. La zona 3 representa los sismos originados al oeste de la Ciudad de Salta, mientras se consideró una cuarta zona más alejada situada al sur. La zona 5 (Figura 6) engloba los numerosos sismos de subducción situados a más de 70 km de profundidad.

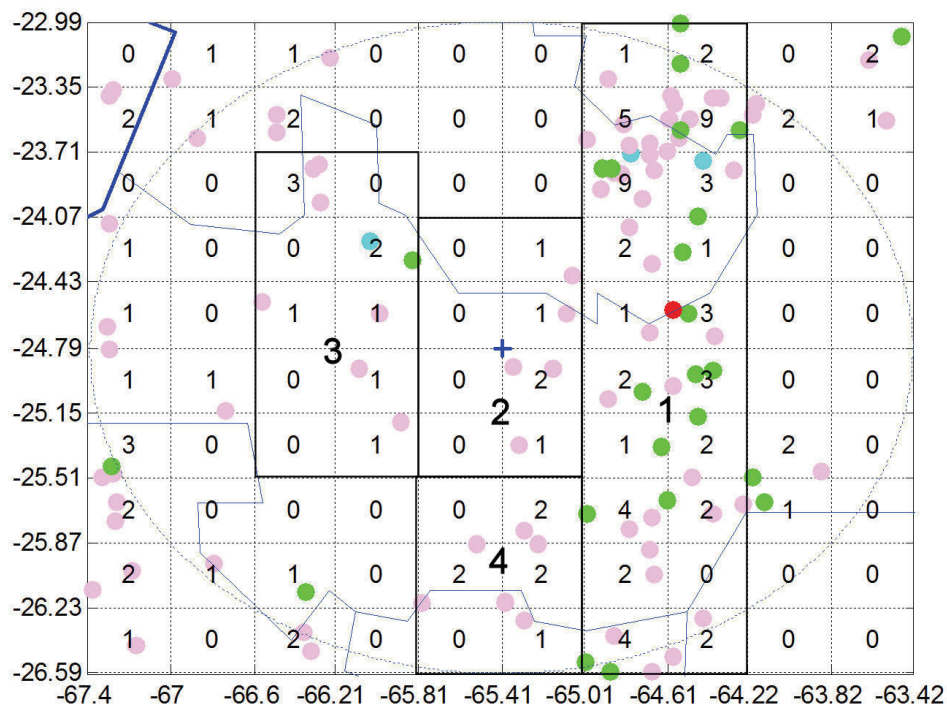


Figura 5: Zonas sismogénicas asociadas a la sismicidad superficial

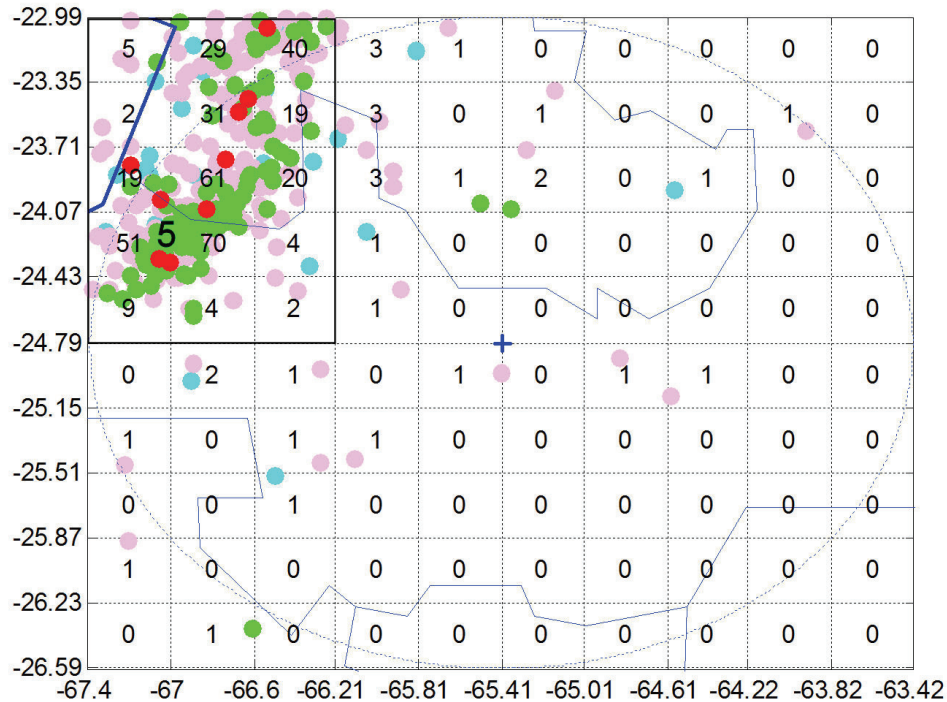


Figura 6: Zona sismogénica asociada a la región de subducción de la placa de Nazca – sismicidad de profundidad media.

### 3. Ley Gutenberg-Richter

La bien conocida ley de Gutenberg-Richter (1.944) es utilizada para representar la tasa de ocurrencia de eventos con una magnitud igual o mayor que cierto valor

$$\log N = a - b M \quad (4)$$

donde  $N$  es el número de eventos cuyas magnitudes son mayores o iguales que  $M$  y las constantes  $a$  y  $b$  están relacionadas a la sismicidad de la región. El parámetro  $b$  describe la relación entre sismos intensos y pequeños que ocurren en la región. Así, cuanto más grande sea este valor, indicará que hay una mayor proporción de sismos pequeños que

grandes en la zona; por el contrario valores bajos denotan una elevada actividad sísmica.

Como función de densidad de probabilidad ( $f(m)$ ), frecuentemente se adopta un modelo exponencial truncado

$$f(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}} \quad (5)$$

donde  $\beta = \log b$ . Debe adoptarse para las zonas sismogénicas consideradas un valor límite inferior y superior para la magnitud.

#### **4. Terremotos mínimo y máximo a considerar**

Con respecto a la mínima magnitud a considerar en los cálculos probabilistas, fue definida en 4,2.

Los terremotos máximo posibles se define en base a las características de la zona sismogénica considerada. Para definir la amenaza sísmica de la ciudad de Salta se deberían conocer estos parámetros de las fallas. Una falla queda perfectamente determinada cuando se estima el terremoto máximo probable (TMP) que pueda ocurrir en la falla en base a las características geométricas y sismotectónicas de la misma; el período de recurrencia para tal evento y la ley de recurrencia de la misma.

No se cuenta con estudios que puedan permitir el cálculo con certeza del período de retorno del TMP para fallas en esta zona, sobre todo lo relacionado a la tasa de movimiento de las mismas. Es posible inferir valores en base a fórmulas empíricas obtenidas haciendo uso de datos de varios sitios del mundo de elevada actividad sísmica. Estas fórmulas relacionan parámetros de falla tal como superficie o longitud de ruptura con la magnitud alcanzada. Por ello, se considera que estas expresiones pueden señalar a un límite superior en el cálculo del TMP,

en la hipótesis de una ruptura total

Con este recaudo, utilizando expresiones para fallas inversas superficiales (predominantes en la determinación de la peligrosidad de esta zona según los informes geológicos) como la propuesta por Idda en 1.959 (Aguiar, 2.003),

$$M_{\max} = 6,04 + 0,79 \log L_r \quad (6)$$

o la definida por Bonilla et al. (1.984)

$$M_{\max} = 5,71 + 0,916 \log L_r \quad (7)$$

dan valores para una longitud de 100 km de **7,62 y 7,54** respectivamente, para fallas ubicadas en la zona sismogénica 1. Esta longitud es la de la falla donde se alinean los sismos históricos de 1.692 y 1.908.

Slemmons (1.982) propuso una fórmula considerando la longitud total de falla en base a datos del oeste norteamericano:

$$M_s = 6,618 + 0,0012L_t \quad (8)$$

con una desviación estándar de 0,221. Para el sistema de fallas antes mencionado, se tiene una magnitud máxima de **6,78**, menor a la anotada en el catálogo histórico (estimada en 7 por el INPRES).

De todos modos, estos valores deben ser considerados quizás a título de interés, pues no se tienen datos exactos acerca de la cinética de estas fallas, datación de deformación “on going”, o estimación de

desplazamientos sufridos en eventos pasados. Además, las longitudes consideradas en los cálculos, corresponden a su traza tal como aparecen en los mapas geológicos.

El terremoto máximo en términos probabilistas se estima considerando un período de tiempo extenso, como 10.000 años, que es un límite inferior para considerar que una falla sea activa o no (Serva,1992). Estudios más recientes elevan este período a 15.000 años o más aún, dependiendo de la obra a emplazarse en el sitio considerado, o los fines del estudio.

Considerando el corto período de tiempo que comprende el catálogo sísmico, la previsiones a tan largo plazo llevan implícito una gran incertidumbre, por lo que los valores obtenidos no son fiables.

## 5. Tasa de ocurrencia de terremotos

Dos filosofías se usan generalmente para determinar este parámetro; una sostiene que suceden según un proceso de Poisson, por lo que cada uno de ellos es independiente con respecto a cualquier otro. Otra corriente considera que cuando sucede un evento, libera las tensiones en la falla por lo que reduce temporalmente la probabilidad de ocurrencia de sismos (las réplicas no se encuadran en este concepto). En este trabajo se adoptó un modelo tipo Poisson (Stewart et al., 2.001).

Un proceso tipo Poisson se define como:

$$P_t(N = n) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \lambda > 0 \quad (9)$$

donde  $N$  (la variable aleatoria) es el número de veces que sucede un evento en el intervalo de tiempo  $[t_0, t_1]$  (cuya duración en  $t$  unidades de tiempo) y  $\lambda$  es el parámetro de Poisson y es el valor medio de

ocurrencias del evento por unidad de tiempo. Este parámetro describe el número de eventos sísmicos que exceden un valor umbral.

## 6. Distancia fuente-sitio

Se considera este parámetro en forma determinista y se lo define como el punto más cercano según el catálogo. Por ello, al definirse las zonas simogénicas, la distancia al sitio es la que corresponde al evento más cercano al punto bajo estudio.

## 7. Peligrosidad sísmica

La amenaza sísmica en el sitio fue estimada considerando la probabilidad de excedencia para la magnitud en cada zona sismogénica considerada.

La probabilidad de excedencia del número de eventos cuya magnitud es mayor que un cierto valor de referencia, para diferentes intervalos de tiempo, se determina como:

$$P_t(M > m) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (10)$$

El parámetro  $\lambda$  se considera como el número de eventos con magnitudes mayores que un cierto valor y es estimado utilizando la relación de Gutenberg-Richter.

## 8. Resultados

En las Figuras 7, 8 y 9 pueden apreciarse los eventos considerados en cada una de las zonas. Las figuras ubicadas a la derecha muestran las curvas representativas de la ley Gutenberg-Richter, con su correspondiente intervalo de confianza (1%). En ellos,

los cuadros a la izquierda muestran los eventos considerados en el análisis y los cuadros a la derecha, los resultados de la regresión.

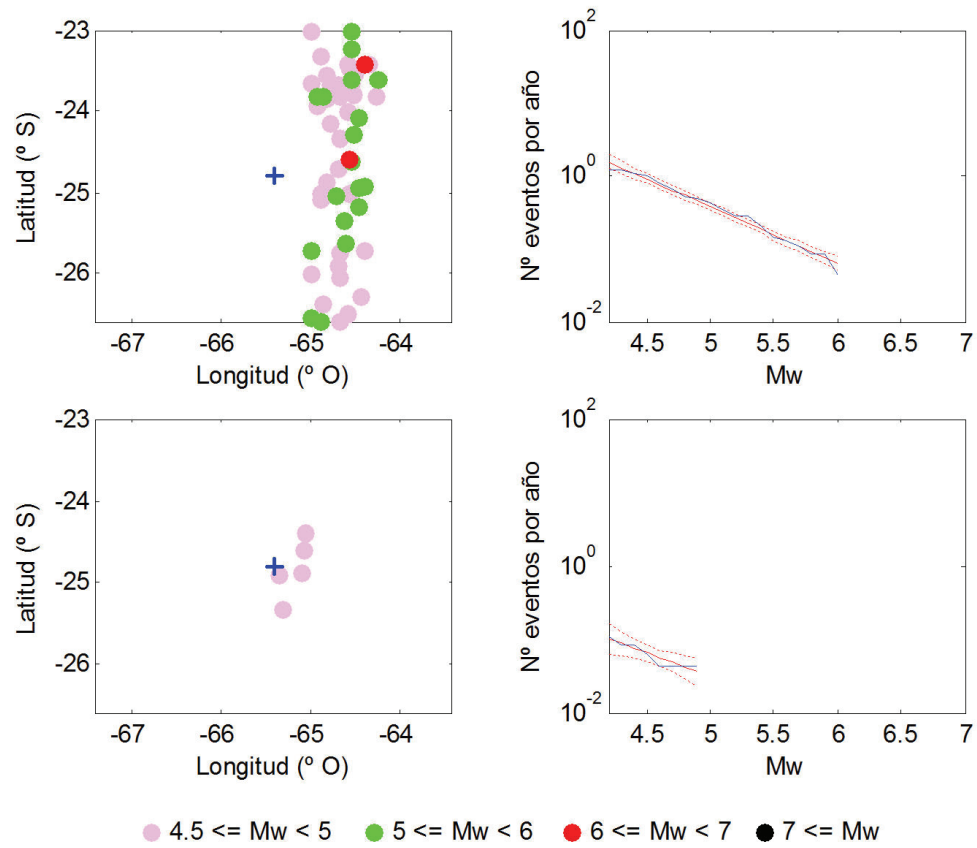


Figura 7: Resultados de la regresión para las zonas sismogénicas 1 (parte superior) y 2 (parte inferior).

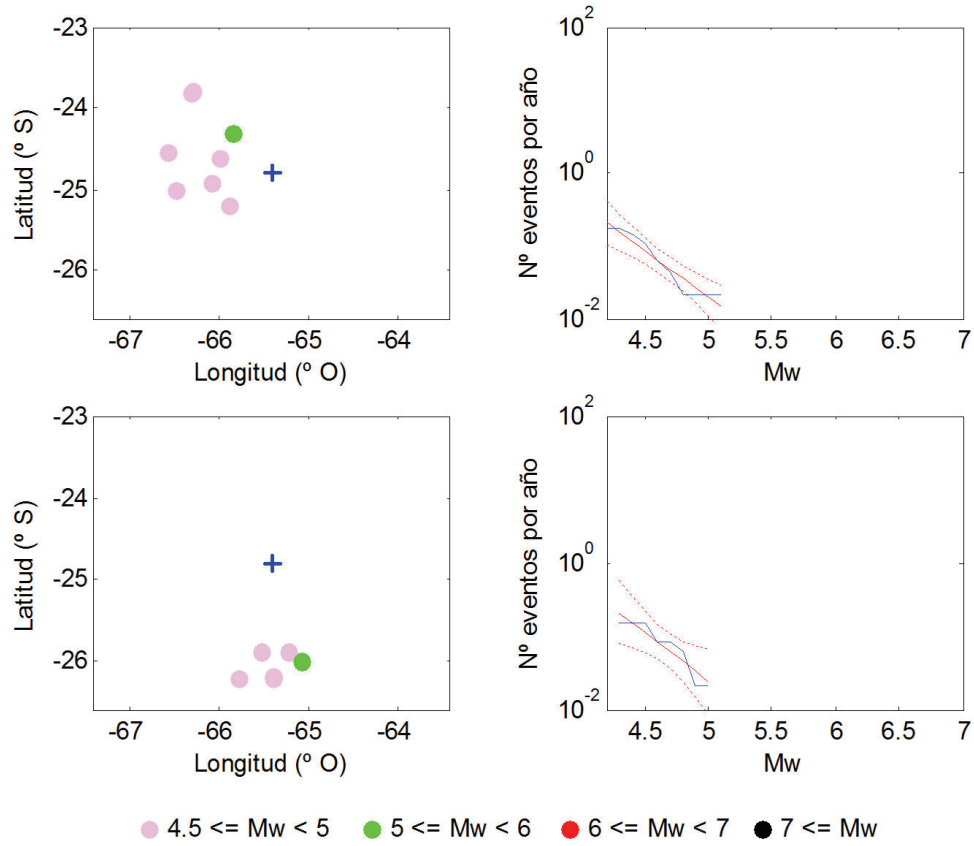


Figura 8: Resultados de la regresión para las zonas sísmogénicas 3 y 4.

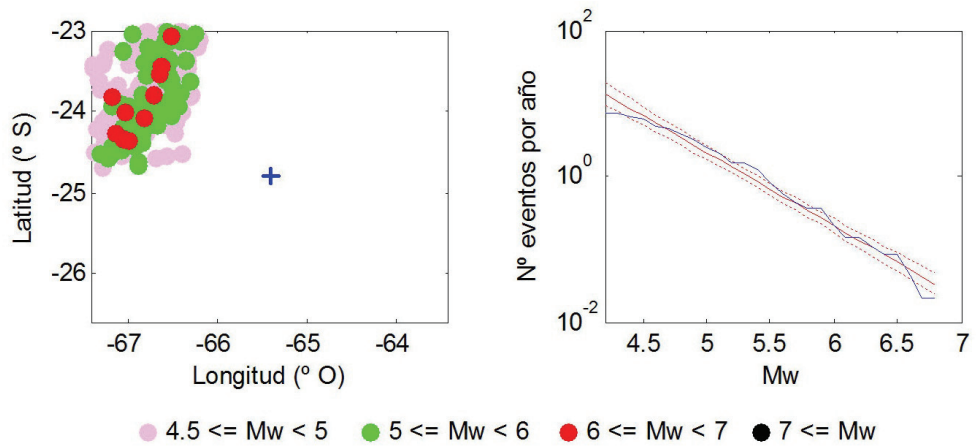


Figura 9: Resultados de la regresión para la zona sísmogénica 5



La Tabla 1 muestra los parámetros de la ley de Gutenberg-Richter ( $a$  y  $b$ ), obtenidos por regresión lineal.

Tabla 1: Resultados de la regresión (Desviación estándar entre paréntesis)

<b>Zona sismogénica</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	3,44 (0,13)	0,77 (0,03)
2	1,68 (0,46)	0,64 (0,10)
3	4,64 (0,62)	1,27 (0,14)
4	5,08 (1,02)	1,34 (0,22)
5	5,34 (0,17)	1,00 (0,03)

Las Figuras 10 a 14 muestran las curvas de excedencia para las magnitudes esperadas considerando distintos períodos de tiempo (por ejemplo, la vida útil de las estructuras de obras civiles, tiempo de exposición para definir niveles de amenaza con fines de elaboración de planes de contingencia, prevención y mitigación de desastres, etc.).

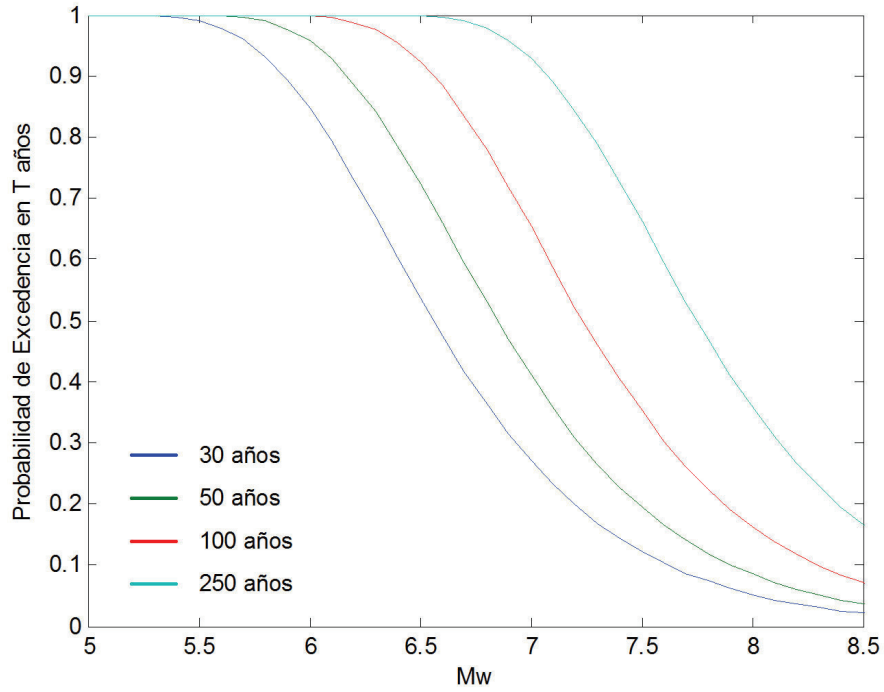


Figura 10: Curvas de excedencia de magnitudes para eventos originados en la zona sismogénica 1

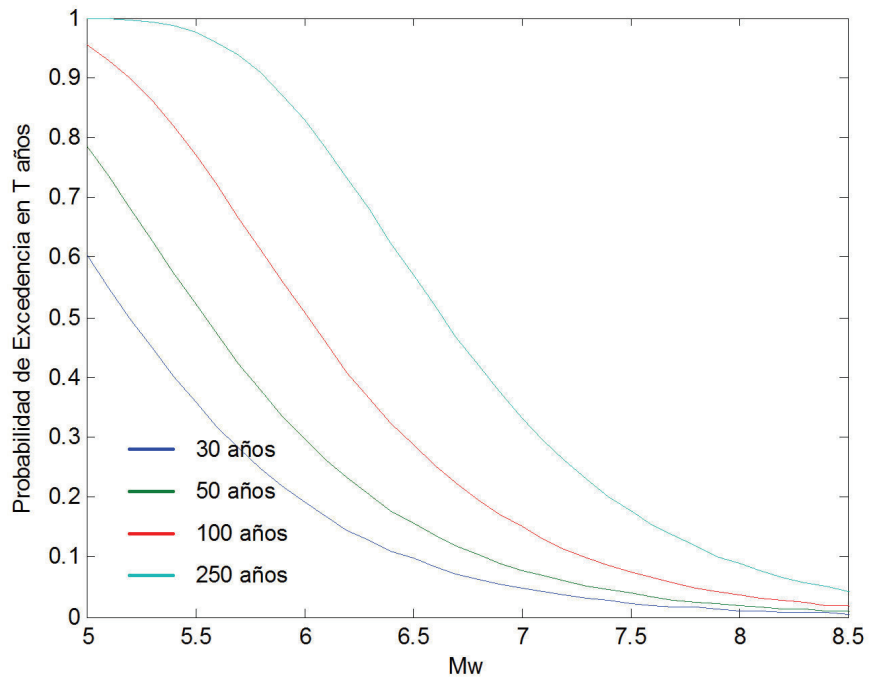


Figura 11: Curvas de excedencia de magnitudes de eventos originados en la zona sismogénica 2

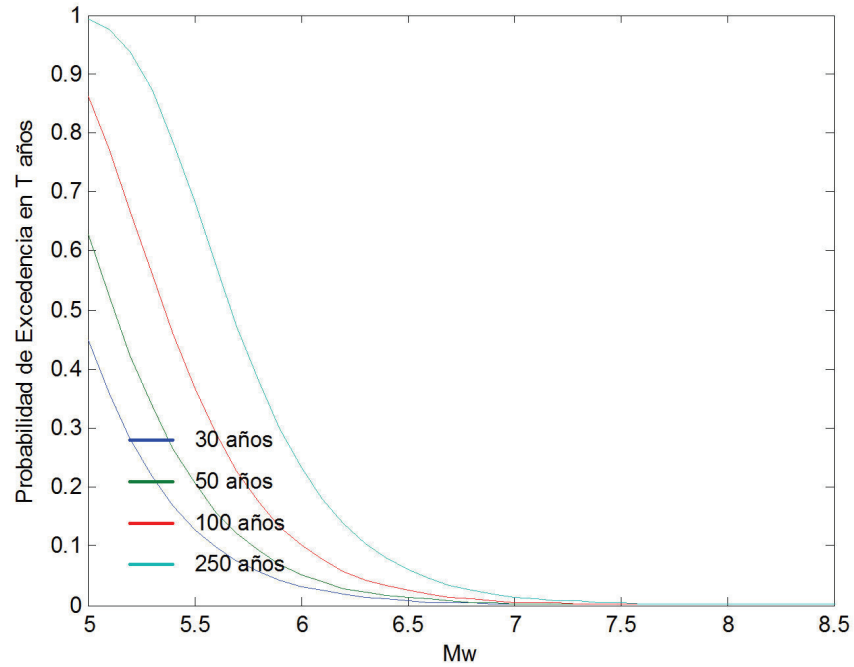


Figura 12: Curvas de excedencia de magnitudes en eventos originados en la zona sismogénica 3

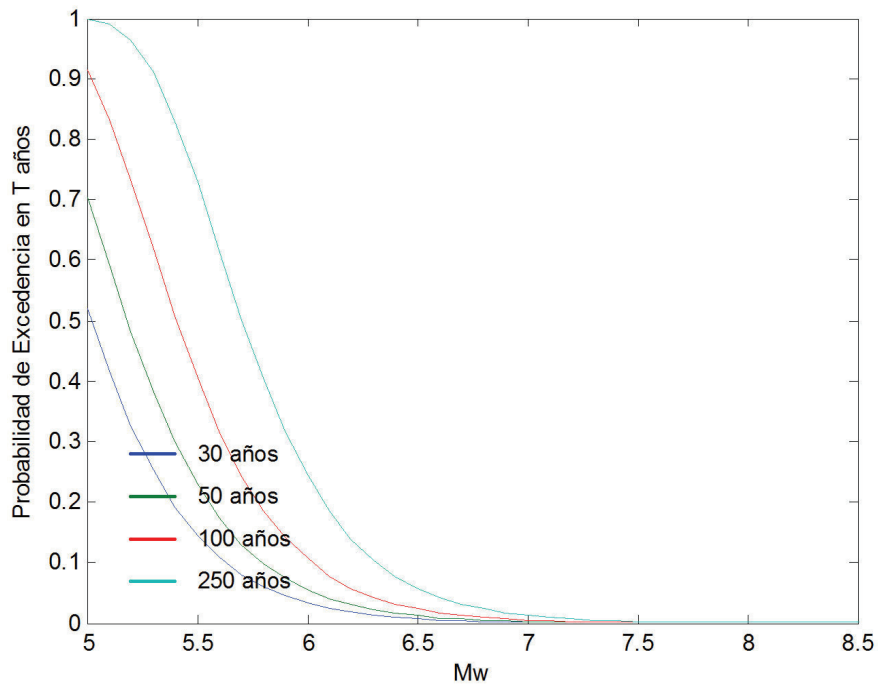


Figura 13: Curvas de excedencia de magnitudes de eventos originados en la zona sismogénica 4

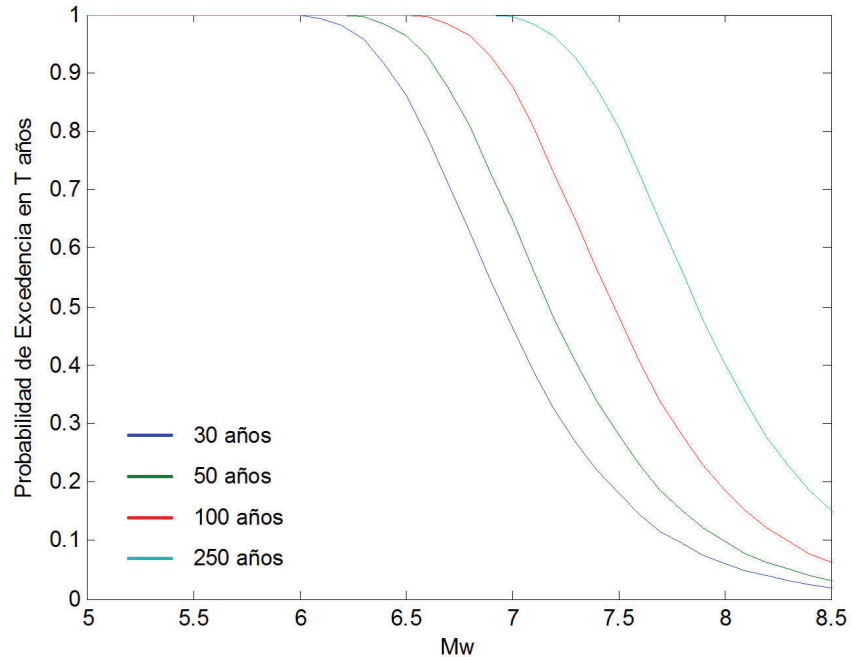


Figura 14: Curvas de excedencia de magnitudes de eventos originados en la zona sismogénica 5

## 9. Análisis de los resultados

Los resultados plasmados en las curvas de excedencia muestran que para grandes períodos de retorno, en forma probabilista se esperan magnitudes en las fallas de la zona sismogénica 1 mayores a 8. En realidad cada falla tiene un terremoto máximo posible, dada por las características físicas de la misma que hace que sea capaz de liberar hasta una determinada cantidad de energía. Ese conocimiento no se tiene aún para las fallas que amenazan la ciudad, por lo que en estos momentos sólo es posible inferir probabilidades, para períodos de tiempo acotados.

En esta zona se espera un sismo de magnitud de aproximadamente  $M_w=7,8$ , para 475 años de período de retorno.

La Figura 15 muestra la sismicidad histórica de la provincia, según el catálogo de sismos históricos SISRA. Se observa que los sismos que más han influido en la ciudad de Salta, se ubican en lo que en este

trabajo se ha designado como zona 1. Considerando las magnitudes locales dadas por SISRA, un evento de magnitud 7 o mayor se produciría cada  $(2010-1692)/2= 159$  años promedio en la zona.

Analizando la Figura 10, se tiene que una magnitud  $M_w$  de 7, tiene un 40% de probabilidad de ocurrir en 50 años, lo que da un período de retorno de 98 años. Si se considera al sismo de 1844 como de magnitud 7 (fue asignada una magnitud de 6,5) se tendría entonces un período promedio de 106 años. Considerando estos tres sismos emblemáticos en la historia sísmica que afectaron la ciudad de Salta, es en términos probabilistas esperable un sismo de estas características, proveniente de la zona sismogénica 1, en los próximos 30 años.

Considérese que el período 1692-2010 comprende 318 años, mientras que los cálculos se realizaron con una historia sísmica de sólo 44 años, lo que considerando los períodos de retorno de sismos de gran intensidad es insuficiente para estimar con certeza la sismicidad esperada en períodos mayores, por ejemplo aun del doble de duración del catálogo. Pero a la vez, el conocimiento que se tiene de los parámetros de las fuentes sismogénicas potencialmente peligrosas es tan escaso, que esta metodología, con todas sus limitaciones, es por ahora lo que se cuenta para definir la acción sísmica. De hecho los espectros de diseño de norma sismorresistente que rige el cálculo de estructuras, es el resultado de un análisis probabilista.

De todos modos, se hace notar que en la zona sismogénica 2, que incluye sismos registrados en el valle de Lerma o en las montañas adyacentes, no incluye el sismo del 27 de Febrero pasado. De todos modos, para un período de retorno de 475 años, el análisis probabilista dio como plausible experimentar un sismo  $M_w=6,8$ , originado en el interior del Valle de Lerma, con los 5 eventos que se aprecian en la Figura 7.

El estudio de las fallas del frente de deformación este (zona 1) como las que se encuentran en el Valle de Lerma y sus adyacencias (zona sismogénica 2) surge como una actividad prioritaria a llevar a cabo para

poder estimar la amenaza sísmica en la ciudad con mayor confiabilidad

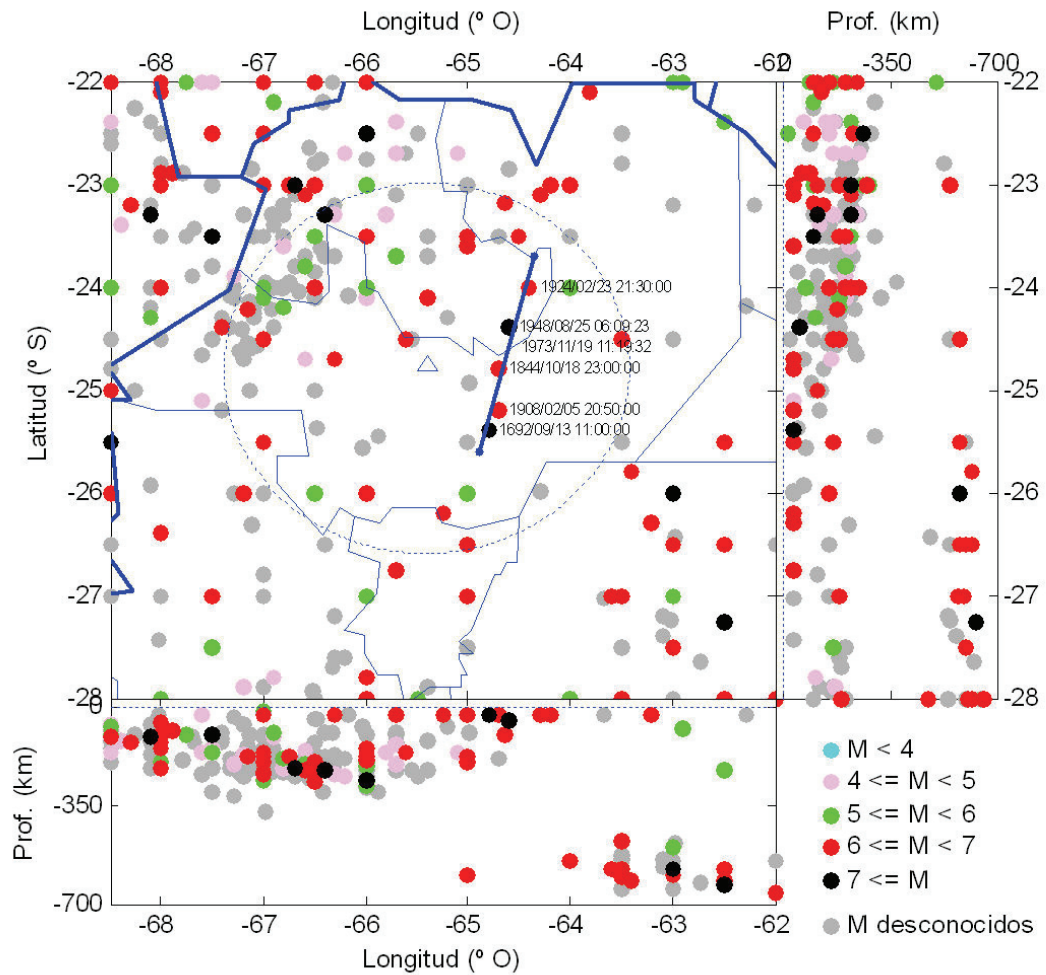


Figura 15: sismicidad histórica en la zona de influencia a la ciudad de Salta.

Además, ciudades como Rosario de la Frontera, Metán y Orán han crecido grandemente y son ciudades ubicadas en cercanías de fallas con actividad cuaternaria reconocida, por lo que la vulnerabilidad ha aumentado también grandemente.

Los sismos originados al oeste, que afectaron históricamente a La Poma, San Carlos, Cafayate, han sido experimentados en la Ciudad de Salta, pero con baja intensidades macrosísmicas por lo que no son prioritarias para la estimación de la peligrosidad de la ciudad de Salta, pero sí para las localidades de los Valles Calchaquíes.

## 10. Determinación de aceleraciones en “roca” en la Ciudad de Salta

Para el cálculo sismorresistente de las estructuras la norma en vigencia define la acción sísmica en términos de espectros de respuesta elástico de la pseudoaceleración del suelo. Por ello la aceleración del suelo es el parámetro más familiar al ingeniero estructuralista, por lo que la amenaza definida en magnitudes será traducida a aceleraciones en roca en la ciudad de Salta.

Se explican en primer lugar las leyes de atenuación utilizadas en el cálculo de la aceleración en roca para el centro de la ciudad de Salta.

### 10.1 Leyes de atenuación

A fin de determinar las aceleraciones en roca en el sitio de la Ciudad de Salta, se hizo uso de fórmulas de atenuación propuestas para otras zonas sísmicas, ya que no se cuentan con leyes de atenuación definidas para el norte del país.

#### Mario Bufaliza (INPRES, 1.995)

Está basada en datos de la región centro-oeste de Argentina y se expresa como:

$$\log a = -0.7837 + 0.353M - 1.5981 \log R - 0.00099R \quad (11)$$

donde  $M$  es la magnitud de ondas superficiales para el caso en que  $M > 6$  y de ondas de cuerpo cuando  $M < 6$ ;  $R$  es la distancia hipocentral (en km) y  $a$  es la mayor de las aceleraciones pico considerando las dos componentes horizontales, en porcentaje de  $g$ . Para sitios cercanos a las fallas se modifica la ecuación para considerar la saturación del movimiento, lo que conduce a la siguiente expresión: (en  $g$ )

$$\log a = -0,7837 + 0,353M - 1,5981 \log D - 0,00099D \quad (12)$$

donde  $D$  se define como:

$$D = \sqrt{R^2 + (4,32 \cdot 10^{0,073M})^2} \quad (13)$$

### Donovan (1.973)

Fue deducida en base a datos de todo el mundo, en gals

$$a = 1320 e^{0,58M} (R + 25)^{-1,52} \quad (14)$$

### Castano (INPRES, 1.977)

Su expresión dada en gals, es apropiada para campo lejano con distancias epicentrales mayores a los 100 km:

$$a = 1150 e^{0,7M} (R + 4M)^{-1,6} \quad (15)$$

### Patwardhan et al. (citado en Idriss, 1.978)

Para sismos someros de corteza propuso,

$$a = 186 e^{1,04M_s} \left( R + 0,864 e^{0,463M_s} \right)^{-1,90} \quad (16)$$

### Woodward-Clyde Consultants (INPRES, 1.982)



Proponen para sismos de corteza superficiales con datos del oeste de Estados Unidos, la siguiente expresión en  $g$ .

$$a = 0,141 e^{1,04M_s} (R + 0,775 e^{0,5M_s})^{-1,75} \quad (17)$$

Gil – Nafa - Zamarbide (INPRES, 1.982)

Desarrollaron para la zona central-oeste de Argentina la siguiente relación en  $g$ .

$$a = 0,063 e^{M_s} (R + 0,193 e^{0,714M_s})^{-1,4} \quad (18)$$

Riera (1.994)

Es adecuada para eventos con distancias epicentrales mayores a 10 km y se expresa en gals.

$$a = 5993 S^{0,34} \Delta^{-1} (1 + 0,408 S^{0,29} \ln \Delta)^{-1} \quad (19)$$

donde  $S$  es el “área de fractura de la falla”, que se define para zonas intra-placa como:

$$S = 10^{\frac{(M-7,078)}{0,709}} \quad (20)$$

Se aprecia que estas fórmulas dependen de la magnitud y la

distancia al punto considerado.

### Crouse (1991)

Relación de atenuación para zonas de subducción, con focos menores a 400 km, (en gals):

$$a = 578.25 e^{1.76M+0.00916h} \left( R+1.58 e^{0.608 M} \right)^{-2.73} \quad (21)$$

## 10.2 Niveles de diseño considerados

En los últimos años, se impone el diseño por desempeño según lineamientos de VISION 2.000 (SEOAC, 1.995) que especifica cuatro niveles de diseño. Los mismos se resumen en la Tabla 2. El nivel de diseño de la norma argentina corresponde al sismo “raro”.

Tabla 2: Sismos de diseño, para el diseño por desempeño (VISION 2.000)

Sismo	Vida útil	Probabilidad de excedencia	Período de retorno
Frecuente	30 años	50 %	43 años
Ocasional	50 años	50 %	72 años
Raro	50 años	10 %	475 años
Muy raro	100 años	10 %	970 años

--	--	--	--

Dependiendo del tipo de estructura y las consecuencias de su colapso para el medio ambiente y la vida humana se definen distintos niveles de diseño (Serva, 1.992; United States Committee on Large Dams, 1.985).

Se determinarán por lo tanto las aceleraciones en suelo firme para estos 4 niveles de diseño, desagregado por cada una de las zonas sismogénicas propuestas en este trabajo.

La Tabla 3 resume datos necesarios para el cálculo de las aceleraciones en la ciudad de Salta, originadas por cada fuente sismogénica considerada en el análisis. La segunda columna muestra la máxima magnitud registrada en cada zona (que figura en el catálogo utilizado); la tercera columna, muestra el valor medio (entre paréntesis desviación estándar) de los valores de magnitud del catálogo; R es la distancia al “punto más cercano” y en las dos últimas columnas se observa el valor esperado de las magnitudes para los cuatro niveles de diseño explicados antes, considerando una distribución tipo Poisson y Gumbel tipo I, respectivamente. La distribución tipo Gumbel I se incluye a título informativo.

Tabla 3: Características de cada zona sismogénica

Zonas	Magnitud Máxima	Magnitud media	R (km)	Magnitudes esperadas	
				Poisson	Gumbel
1	6.01	4.77 (0.52)	66	6.56	6,34
				6,85	6,55
				<b>7,90</b>	<b>7,30</b>
				8,31	7,59

2	4,93	4,60 (0,32)	41	5,19	5,40
				5,54	5,53
				<b>6,82</b>	<b>6,01</b>
				7,31	6,19
3	5,14	4,42 (0,38)	72	4,94	5,41
				5,12	5,55
				<b>5,77</b>	<b>6,08</b>
				6,01	6,28
4	5,03	4,65 (0,27)	118	5,01	5,55
				5,18	5,69
				<b>5,79</b>	<b>6,20</b>
				6,03	6,39
5	6,80	4,75 (0,53)	131	6,95	6,77
				7,17	6,97
				7,99	7,68
				8,30	7,94

### 10.3 Resultados

En las Tablas 4, 5, 6 y 7 se anotan los valores de aceleración obtenidas para cada sismo de diseño y cada zona sismogénica considerada, con los correspondientes valores medios y su desviación estándar (última fila).

Tabla 4: Aceleraciones en roca para un “sismo frecuente” (en g)

Ley de atenuación	Sismo de diseño 1				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Bufaliza	0,04	0,03	0,01	0,004	0,01
Donovan	0,06	0,05	0,02	0,013	0,04
Castano				0,015	0,05
Patwardhan	0,04	0,02	0,01	0,004	0,02
Gil-Nafa-Zamarbide	0,09	0,05	0,02	0,011	0,05
W-Clyde Consult.	0,05	0,03	0,01	0,005	0,03
Crouse	0,09	0,05	0,02	0,006	0,05
Riera	0,03	0,02	0,01	0,004	0,02
<b>Valor medio</b>	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,008</b>	<b>0,03</b>
<b>(Desv. estándar)</b>	<b>(0,02)</b>	<b>(0,01)</b>	<b>(0,01)</b>	<b>(0,005)</b>	<b>(0,02)</b>

Tabla 5: Aceleraciones en roca para un “sismo ocasional” (en g)

Ley de atenuación	Sismo de diseño 2				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Bufaliza	0,04	0,03	0,01	0,004	0,02
Donovan	0,08	0,06	0,03	0,014	0,04
Castano				0,016	0,05
Patwardhan	0,05	0,03	0,01	0,004	0,02
Gil-Nafa-Zamarbide	0,11	0,06	0,02	0,013	0,07
W-Clyde Consult.	0,07	0,04	0,01	0,006	0,03
Crouse	0,12	0,06	0,02	0,008	0,07
Riera	0,04	0,03	0,01	0,005	0,02
<b>Valor medio</b>	<b>0,07</b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,009</b>	<b>0,04</b>
<b>(Desv. estándar)</b>	<b>(0,03)</b>	<b>(0,02)</b>	<b>(0,01)</b>	<b>(0,005)</b>	<b>(0,02)</b>

Tabla 6: Aceleraciones en roca para un sismo “raro” (en g)

Ley de atenuación	Sismo de diseño 3				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Bufaliza	0,11	0,09	0,02	0,007	0,03
Donovan	0,14	0,12	0,04	0,021	0,06
Castano				0,024	0,09
Patwardhan	0,11	0,09	0,02	0,008	0,05
Gil-Nafa-Zamarbide	0,21	0,16	0,04	0,023	0,12
W-Clyde Consult.	0,15	0,12	0,02	0,011	0,07
Crouse	0,23	0,16	0,04	0,017	0,13
Riera	0,06	0,07	0,02	0,008	0,02
<b>Valor medio</b>	<b>0,14</b>	<b>0,12</b>	<b>0,03</b>	<b>0,015</b>	<b>0,07</b>
<b>(Desv. estándar)</b>	<b>(0,06)</b>	<b>(0,04)</b>	<b>(0,01)</b>	<b>(0,007)</b>	<b>(0,04)</b>

Tabla 7: Aceleraciones en roca para un sismo “muy raro” (en g)

Ley de atenuación	Sismo de diseño 4				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Bufaliza	0,15	0,15	0,02	0,008	0,04
Donovan	0,18	0,16	0,04	0,024	0,08
Castano				0,028	0,11
Patwardhan	0,15	0,13	0,02	0,009	0,06
Gil-Nafa-Zamarbide	0,26	0,22	0,05	0,028	0,15
W-Clyde Consult.	0,20	0,16	0,03	0,014	0,09
Crouse	0,28	0,21	0,05	0,023	0,16
Riera	0,08	0,09	0,02	0,010	0,03
<b>Valor medio</b>	<b>0,18</b>	<b>0,16</b>	<b>0,03</b>	<b>0,018</b>	<b>0,09</b>
<b>(Desv. estándar)</b>	<b>(0,07)</b>	<b>(0,04)</b>	<b>(0,01)</b>	<b>(0,009)</b>	<b>(0,05)</b>

## 11. Conclusiones y recomendaciones

Se han determinado en este trabajo las aceleraciones probables en roca en la ciudad de Salta, debido a sismos generados en cinco zonas sismogénicas con influencia en la ciudad, según se desprende de la sismicidad histórica e instrumental registrada en un radio de 200 km.



En general se desprende que hay dos zonas sismogénicas con especial incidencia en la peligrosidad sísmica de la ciudad: el frente de deformación este situado a una distancia promedio de 90-100 km y la sismicidad que se registra en el Valle de Lerma o sus límites. Por ello, es prioritario el estudio de las fallas, cuya actividad generan los movimientos sísmicos plausibles de ocasionar daños en la Ciudad de Salta.

A fin de obtener los valores de aceleración en la superficie en cada sitio de la ciudad, se debe considerar la influencia de los mantos cuaternarios de suelo y en especial, las últimas capas de suelo más blandos.

## REFERENCIAS

- Aguiar, R., 2.003, Espectros sísmicos de riesgo uniforme para verificar desempeño estructural en países latinoamericanos, *Conferencia ofrecida en el XI Seminario Iberoamericano de Ingeniería Sísmica*, Mendoza, Argentina.
- Bonilla, M.G., Mark, R.K. and Lienkaemper, 1.984, Statistical relations among earthquake magnitude, surface length and surface fault displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, V 74, pp 2.379-2.411.
- Carreño, M.L., Cardona, O. and Barbat, A.H., 2007, Urban seismic risk analysis: an holistic approach, *Natural Hazards*, Vol 40, pp 137-172
- Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis, *Bull Seismological Society of America*, Vol 58, pp1583-1606
- Crouse. C.B., 1991, Ground motion attenuation equations for earthquakes on the Cascadian subduction zones, *Earthquake Spectra*, vol 7 (2), pp 201-236.

Davis y Frolich, 1991, Single-link cluster analysis and earthquake aftershocks; decay laws and regional variations. *J. Geophys. Res.* 96, 6335– 6350.

Donovan N. C., 1.973, A statistical evaluation of strong motion data including the February 9, 1.971, San Fernando earthquake. *Proceedings of 5th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol 1.

Gutenberg, B. and Richter, C. F., 1.944, Frequency of earthquakes in California, *Bulletin of Seismic Society of America*, 34, pp 1.985-1.988.

Haarala Orosco, M., 2.006, *EARTHSTAT*, programa para el cálculo de la peligrosidad sísmica, La Caldera, Salta.

Idriss, I.M.,1978, Characteristics of earthquake ground motion, *Proceeding of the ASCE Geotechnical Engineering Division Speciality Conference: Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol III, pp 1151-1265.

INPRES, Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 1.977, *Zonificación sísmica de la República Argentina*, *Publicación Técnica N° 5*, San Juan, Argentina.

INPRES, 1.982, Microzonificación sísmica del Valle del Tulum – Provincial de San Juan – *Informe Técnico*, Vol 2.

INPRES, 1.995, Microzonificación sísmica de Mendoza y Gran Mendoza *Informe Técnico*.

INPRES-CISOC-103, 1.983, Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes, Parte I, (Construcciones en general), *INPRES*, San Juan, Argentina

International Seismological Centre, *On-line Bulletin*, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2.001. <http://www.isc.ac.uk/Bull>

Riera, J and Doz, G., 1.994, Sobre la definición de la excitación sísmica considerando las características básicas de falla, *Lectures of Postgraduate Course in Civil Engineering*, UFRGS, Brasil.

SEAOC, 1.995, Vision 2.000: Report on performance based seismic engineering of buildings, *Structural Engineering Association of California*, Sacramento, EEUU.

Serva, L, 1.992, An analysis of the world major regulatory guides for NPP seismic design, *ENEA, Technical Report RT/DISP/92/03*, ISSN/0393-3016.

Slemmons, B. D., 1.984, Evaluation of seismic hazards in earthquake-resistant design: identification and characterization of active faults, *EERI Seminar*, July 1.984, Stanford University.

Stewart, J. F., Chiou, S-J., Bray, J. Graves, R., Somerville, P., Abrahamson, N., 2.001, Ground Motion Evaluation Procedures for Performance –Based Design, *Technical Report*, PEER 2.001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center

US Geological Service, On-Line Catalogue <http://neic.usgs.gov/neis/epic>

United States Committee on Large Dams, 1.985, Guidelines for selecting parameters for dam projects.