

Aceleraciones Sísmicas en La Paz

Por: Ing. Rolando Grandi G.

El presente trabajo muestra valores de aceleración sísmica que podría presentarse en la ciudad de La Paz, aceleración que representada en espectros de diseño sirve para el diseño sísmico de edificaciones.

Las aceleraciones fueron obtenidas en base a los catálogos de eventos sísmicos del Observatorio San Calixto y complementadas con los datos de los eventos sísmicos importantes conocidos en Bolivia (sismos históricos).

REGISTROS SÍSMICOS EN BOLIVIA

El Observatorio San Calixto posee catálogos de registros sísmicos, parte de uno de ellos se ha utilizado para la elaboración de este trabajo. Este catalogo es parcial ya que solo contiene registros de eventos sísmicos de magnitud mayor o igual a 4, los eventos sísmicos de menor magnitud han sido eliminados por su poca importancia.

El catalogo contiene registrados cientos de eventos sísmicos de magnitud igual o mayor a 4, varios de ellos cercanos a la ciudad de La Paz. Los datos registrados para cada evento sísmico son:

- Localización geográfica (latitud y longitud)
- Profundidad (Km)
- Magnitud
- Fecha

Este catalogo evidencia que efectivamente han ocurrido sismos cercanos a la ciudad de La Paz. El catalogo contempla un periodo de diez años, de 1975 a 1985, tiempo muy corto, pero abundante en información, para completar el catalogo se ha añadido datos de sismos "históricos" que representan eventos sísmicos importantes ocurridos en el país.

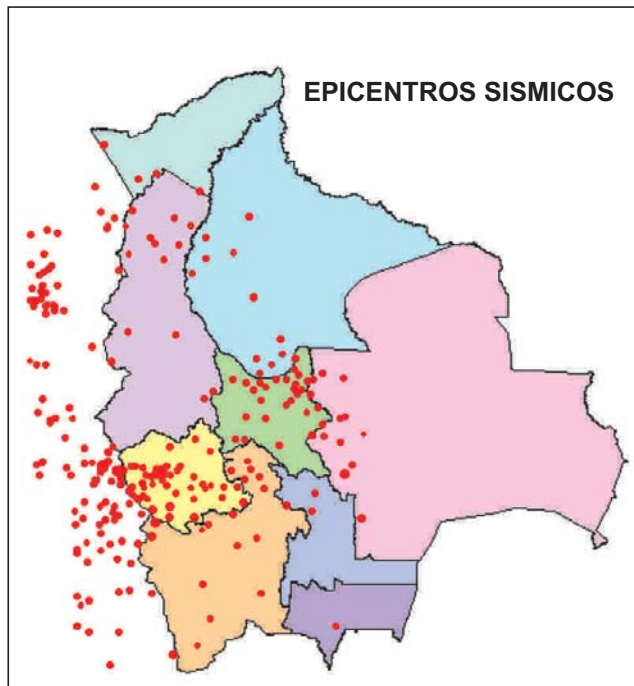


Figura 1.- Epicentros de sismos de magnitud mayor o igual a 4. Datos de 10 años (1975 a 1985). No se muestra la localización de los sismos "históricos".

Adicionalmente se transcribe una lista de eventos sísmicos importantes publicada por el Observatorio San Calixto.

ACELERACIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE LA PAZ

Los catálogos de registros sísmicos del Observatorio San Calixto no tienen el dato de la aceleración máxima registrada en el terreno, ya que el Observatorio solo cuenta con aparatos "sismógrafos" y no cuenta con "acelerógrafos".

Para propósitos de diseño sísmico es fundamental contar con datos de aceleración, y al no contar los catálogos del Observatorio con esos datos se dificulta el trabajo de ingeniería sísmica, afortunadamente a

Tabla 1.- Eventos sísmicos importantes en Bolivia, publicada por el observatorio San Calixto

| Año | Mes | Día | Magnitud (Mb) | Intensid. (MM) | |
|-------|-----|-----|---------------|----------------|---|
| 1650 | 11 | 10 | 6,4 | VIII | Dstrucción en la capital del Alto Perú (hoy Sucre) |
| 1662* | 2 | 23 | 5,8 | VII | Daños en la ciudad de Potosí y pueblos cercanos |
| 1720* | 9 | 7 | 5,2 | VI | En la ciudad de Potosí objetos fueron lanzados al suelo |
| 1743* | 9 | 2 | 5,2 | VI | Pánico en la ciudad de Potosí |
| 1845* | 1 | 14 | 5,2 | VI | Sentido en Santa Cruz y daños en casas de adobe |
| 1851 | 7 | 5 | 5,8 | VII | Daños en la ciudad de Potosí |
| 1871 | 2 | 23 | 5,2 | VI | Daños en Villa San Antonio (hoy Villa Tunari), Cochabamba |
| 1884 | 11 | 26 | 5,2 | VI | Destrozos en Tarabuco, Sucre |
| 1887 | 9 | 23 | 6,4 | VII | Dstrucción en Yacuiba |
| 1891 | 8 | 15 | 5,8 | VII | Daños en Consata y sentido fuertemente en la ciudad de La Paz |
| 1899 | 3 | 23 | 6,4 | VIII | Cerca de Yacuiba muchas casas de adobe fueron destruidas |
| 1909 | 5 | 17 | 6,3 | VI | Sentido en Tupiza y Tarija |
| 1909 | 7 | 23 | 5,8 | VII | En Sipe Sipe, dstrucción, muertos y heridos |
| 1923 | 9 | 2 | 6,2 | VI | Sentido fuerte en Mapiří, Consata |
| 1925 | 10 | 25 | 5,2 | VI | En Aiquile daños ligeros en casas de adobe |
| 1929 | 2 | 19 | 5,3 | IV | Fuerte en Warnes (Santa Cruz) |
| 1932 | 12 | 25 | 5,3 | VI | Sentido fuerte en Colquechaca (Potosí), varias réplicas |
| 1937 | 11 | 3 | 5,3 | VI | Sentido fuerte en Consata |
| 1942 | 12 | 25 | 5,6 | VI | En la ciudad de Cochabamba se sintió fuertemente |
| 1943 | 2 | 18 | 5,8 | VI | Muy fuerte en la ciudad de Cochabamba (dstrucción) |
| 1947 | 2 | 24 | 6,4 | VIII | Consata destruida, sentido fuertemente en la ciudad de La Paz |
| 1948 | 3 | 28 | 6,1 | VII | Dstrucción en Sucre, muertos y heridos |
| 1949 | 11 | 7 | 5 | V | Fue sentido en la ciudad de Florida (Santa Cruz) |
| 1956 | 8 | 23 | 5,8 | VI | Fuerte en Consata, sentido en la ciudad de La Paz |
| 1957 | 8 | 26 | 5,9 | VII | En Postervalle varias casas de adobe destruidas |
| 1958 | 1 | 6 | 5,2 | VI | Pasorapa, casas de adobe sufrieron daños |
| 1958 | 9 | 1 | 5,9 | VII | Destrozos en Aiquile. |
| 1970 | 3 | 6 | 4,5 | VI | Dos muertos en Ajtara, Potosí |
| 1972 | 5 | 12 | 5 | VI | Sentido en la ciudad de Cochabamba, ligeros daños |
| 1976 | 2 | 22 | 5,2 | VI | Sentido en las cercanías de Aiquile y ligeros daños |
| 1976 | 6 | 30 | 4,7 | V | Sentido en Arque y ligeros daños en casas de adobe |
| 1981 | 7 | 23 | 5 | VI | Sentido en Ivirgarzama, daños estructurales |
| 1982 | 8 | 23 | 4,4 | V | Sentido fuerte en la ciudad de Oruro, ligeros daños |
| 1983 | 5 | 19 | 4,3 | V | Causo alarma en Huañacoma y Caripuyo (Potosí) |
| 1984 | 6 | 27 | 4,6 | V | Sentido en Sabaya (Oruro) ligeros daños en casas de adobe |
| 1985 | 3 | 19 | 5,4 | VI | En Monteagudo hubieron derrumbes. |
| 1986 | 5 | 9 | 5,6 | VI | Sentido fuerte en Villa Tunari. |
| 1986 | 6 | 19 | 5,4 | V | Sentido fuerte en Villa Tunari, Chimore y Puerto Villarroel. |
| 1987 | 8 | 22 | 4,8 | V | En forestal (Santa Cruz) ligeros daños |
| 1991 | 12 | 21 | 5 | V | En Bermejo casas de adobes agrietadas |
| 1994 | 6 | 9 | 8 | VI | Sismo profundo, sentido en todo Bolivia |
| 1995 | 11 | 6 | 5,2 | V | En Comujo (Oruro) daños en casas de adobe |
| 1998 | 5 | 22 | 6,6 | VIII | Destrozos y muertos en Aiquile, Mizque y Totora |
| 2001 | 6 | 23 | 6,9 | V | Sentido fuerte en La Paz, con ligeros daños materiales |
| 2001 | 7 | 4 | 6,2 | IV | Sentido en casi todo Bolivia, no se reportaron daños materiales |
| 2001 | 7 | 24 | 5,5 | V | Sentido y con leves daños en Psigua y Coipasa |
| 2002 | 2 | 23 | 4,5 | V | Sentido en Jorochito, Santa Cruz |
| 2002 | 10 | 24 | 6,1 | V | Sentido y con daños en Alto Milluni, Zongo |
| 2004 | 1 | 21 | 3,6 | III | Sentido en Zongo |
| 2004 | 3 | 17 | 4,9 | III | Sentido en Sucre |
| 2004 | 3 | 22 | 5,8 | III | Sentido en Tarija |
| 2004 | 7 | 17 | 4,5 | III | Sentido en Sucre |
| 2004 | 8 | 3 | 4 | V | Daños en Rivera Provincia G. Villarroel |

nivel mundial, existe mucha literatura técnica y mucha experiencia que permite correlacionar de manera aproximada los datos de magnitud y profundidad con datos de aceleración en suelo firme, una fórmula muy conocida y muy utilizada en varios países para calcular de manera aproximada la aceleración, es la fórmula de Mc Guire:

$$a = 472 \cdot (e^{0.64 \cdot Mb}) \cdot (R + 25)^{-1.30}$$

Donde:

a.- aceleración en el epicentro (proyección del foco en la superficie) cm/seg²

Mb.- Magnitud Mb (datos del catalogo sísmico)

R.- Distancia hipocentral (profundidad) km

Se aplicó esta fórmula para todos los puntos del catalogo sísmico y se pudo estimar una aceleración en cada lugar donde se presentó un evento sísmico. Interpolando estas aceleraciones se pudo obtener el mapa de aceleraciones sísmicas de Bolivia y particularmente del Departamento de La Paz.

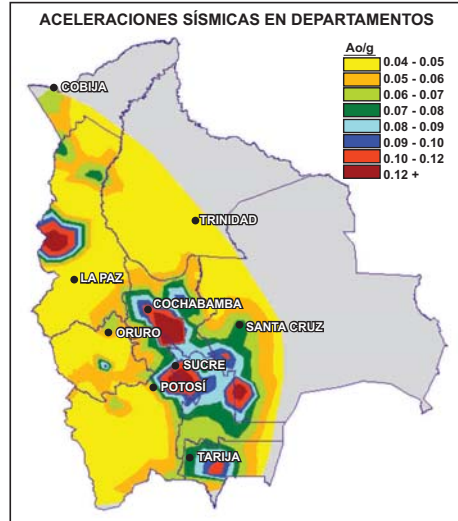


Figura 2.- Aceleraciones sísmicas en Bolivia

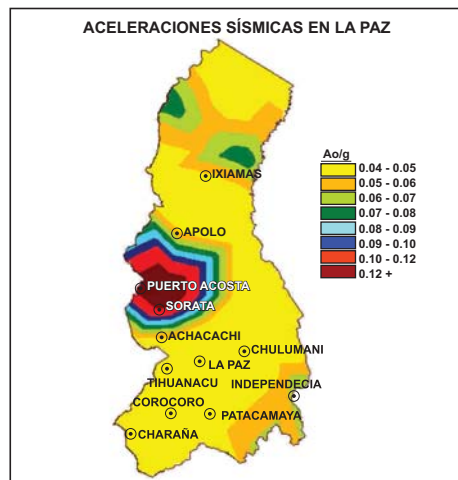


Figura 3.- Aceleraciones sísmicas en el Departamento de La Paz

Estos mapas muestran que la aceleración en suelo firme en la ciudad de La Paz es del orden de 0.05g.

Investigadores del observatorio San Calixto publicaron hace unos 20 años el siguiente mapa denominado "Riesgo Sísmico" donde se muestra el porcentaje de probabilidad de que se presente en distintas zonas de Bolivia una aceleración del orden de 0.05g.

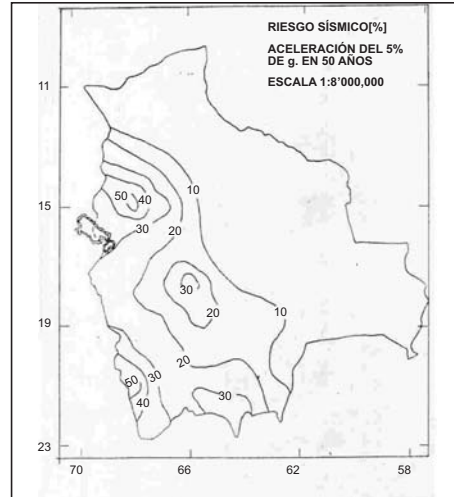


Figura 4.- Porcentajes de probabilidad de aceleración sísmica del orden de 0.05g.

En este mapa se puede observar que en la ciudad de La Paz existe una probabilidad del 30% de que se presente una aceleración sísmica de 0.05g.

Esta probabilidad es muy baja, pero hacia el norte de la ciudad de La Paz, a pocos kilómetros, en la zona de Consata – Mapiri, existe una probabilidad del 50%.

Este mapa es antiguo y preliminar, pero ya da una idea del nivel de aceleración sísmica en Bolivia.

El Observatorio San Calixto en base al catalogo de diez años de eventos sísmicos (1975 – 1985) presenta los mapas que se muestran en las figuras 5 y 6.

Estos mapas son muy interesantes ya que el año 1986 (cuando los publicaron) prácticamente predijeron el sismo de Aiquile (1998, magnitud 6.6), ya que en esa zona el porcentaje de probabilidad era del orden del 90%, y la magnitud mayor a 5, pero nadie les hizo caso.

Respecto a la ciudad de La Paz se observa que la probabilidad de sismos de magnitud mayor a 5 es del orden del 20% (figura 6), probabilidad baja, pero que se pueden presentar sismos de magnitud por lo menos igual a 4 (figura 5). Para sismos de magnitud

4 una aceleración del orden de 0.05g es bastante realista.

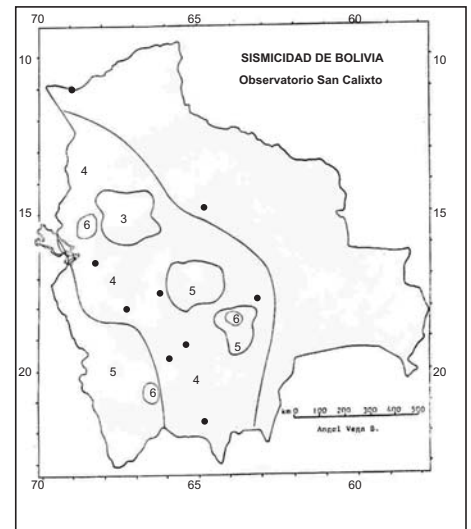


Figura 5.- Magnitudes máximas esperadas para un lapso de 20 años (1985-2005) según datos de diez años (1975-1985).

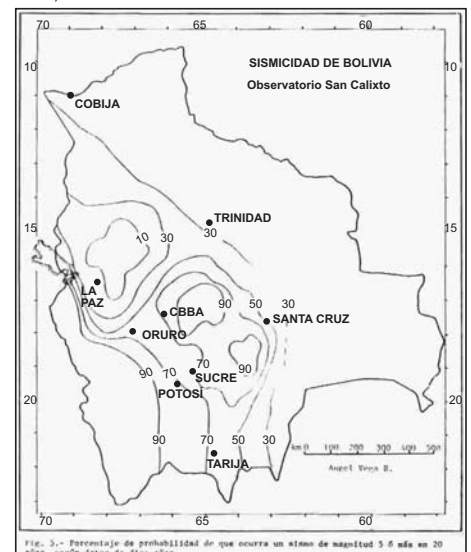


Figura 6.- Porcentajes de probabilidad de que ocurra un sismo de magnitud 5.6 o más en 20 años (1985-2005), según datos de diez años (1975-1985).

Adicionalmente se adjunta el mapa de aceleraciones sísmicas elaborado por el Ceresis (Centro Regional de Sismología de América del Sur, con sede en Perú) donde se observa que para la ciudad de La Paz, en terreno firme, se puede estimar una aceleración sísmica del orden de 0.15g. Esta aceleración muy exagerada, es el triple de la obtenida con el catalogo sísmico del Observatorio, la explicación está en que las curvas de iso-aceleración del Ceresis no están "complementadas" ni "corregidas" con datos de sismos registrados en Bolivia, las curvas que se muestran dentro de Bolivia son simplemente extrapoladas de las curvas que se obtuvieron en Perú y Chile.

ACELERACIONES SISMICAS EN LA PAZ



Figura 7.- Mapa de aceleraciones sísmicas máximas en América del Sur (Ceresis)

Otra información importante es la mostrada por el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos de América). En el siguiente mapa por la ocasión de un sismo registrado en la población de Tarapacá en Chile (magnitud 5.8), se muestra epicentros sísmicos registrados desde el año 1990 al año 2005. Se observa varios eventos sísmicos de baja magnitud cercanos a la ciudad de La Paz.

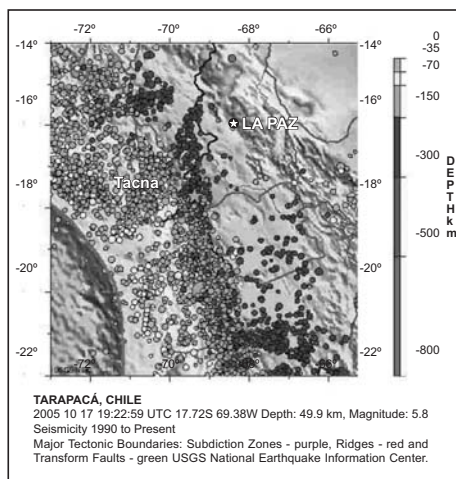


Figura 8.- Sismicidad desde el año 1990 hasta el año 2005.

En conclusión, al ser los datos del catalogo reales y evidentes, se considera que la aceleración de 0.05g en "suelo firme" es realista y adecuada para la ciudad de La Paz y sus alrededores.

AMENAZA SÍSMICA EN LA CIUDAD DE LA PAZ

Las fuentes generadoras de sismos que puedan afectar a la ciudad de La Paz son tres:

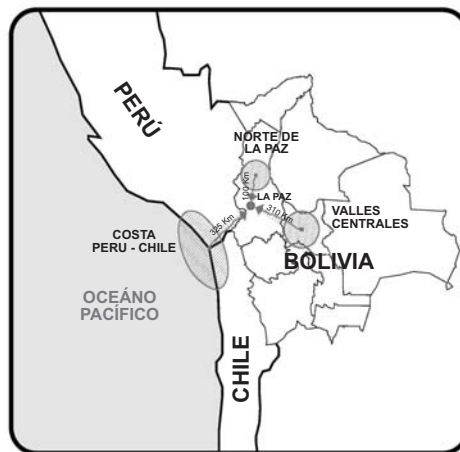


Figura 9.- Zonas generadoras de sismos

- 1.- Zona costera frontera entre Perú y Chile.- En esta zona existe una "brecha" o "vacío" sísmico, es decir que hace mas de 100 años que no se presentan sismos, en esa zona se está acumulando una energía sísmica que puede liberarse en cualquier momento con una energía terrible, se estima por los sismos ocurridos anteriormente en los años 1868 y 1877, que la magnitud del nuevo sismo seria alrededor de 9. Las ondas destructoras de este sismo llegarían con bastante fuerza a la ciudad de La Paz para ocasionar serios problemas a estructuras no preparadas para sismos.

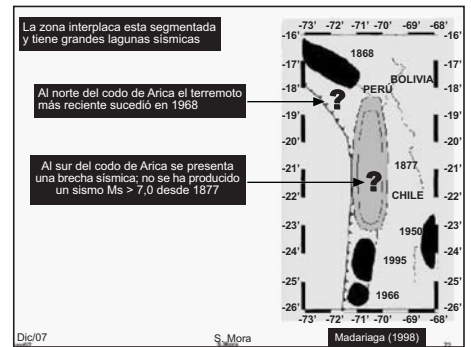


Figura 10.- Esquema que muestra el "vacío" o "laguna" sísmica.

El brillante investigador Dr. Sergio Mora presento las figuras 10 y 11 en una de sus conferencias en la ciudad de La Paz, esquemas que ilustran el vacío sísmico en la zona conocida como el "codo" de Arica.

Para conocer más información de esta fuente sísmica se puede revisar los datos del USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) y también revisar la información de los Centros Sismológicos de Perú y Chile. El Observatorio San Calixto también ha presentado una publicación confirmando esta información.

- 2.- Zona central de Bolivia.- Los valles centrales de Bolivia siempre han sido una zona generadora de sismos, si bien la mayoría son de baja magnitud (3 y 4), ocasionalmente se presenta algunos de magnitud intermedia (5 y 6). Por la relativa cercanía a la ciudad de La Paz, las ondas de estos posibles eventos sísmicos también pueden afectar a estructuras no preparadas.

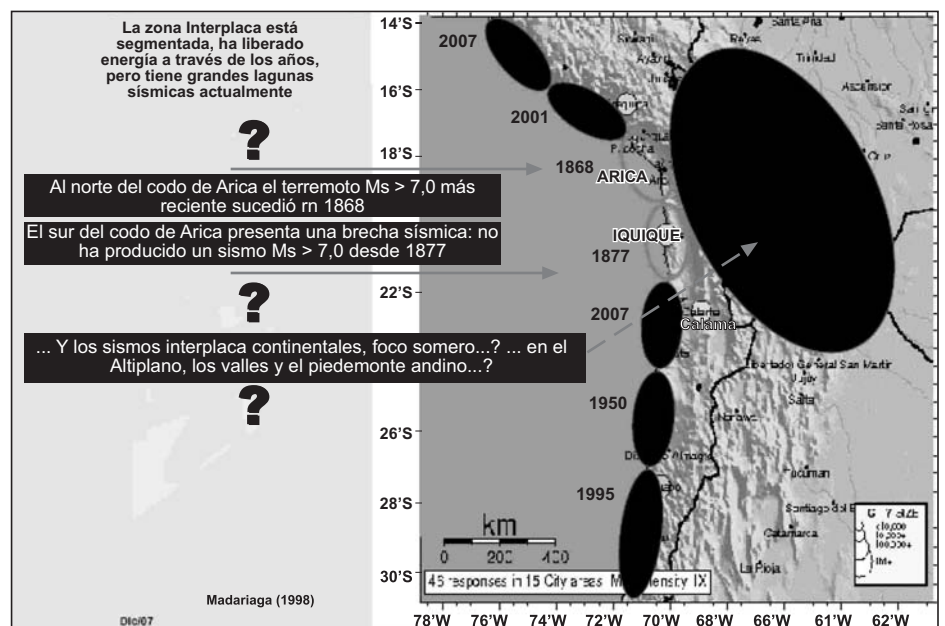


Figura 11.- Sismos importantes en la costa, se observa el vacío sísmico (dos elipses rojas que dentro de ellas se encuentran Arica e Iquique en Chile).

3.- Zona Consata – Mapiri.- Esta zona también se caracteriza por registrar sismos con bastante recurrencia, sismos de magnitud 4, 5 y 6, por la corta distancia entre esta zona y la ciudad de La Paz, las ondas de estos sismos también pueden causar graves problemas.

El nivel de aceleración en el suelo que producirían estos eventos sísmicos en la ciudad de La Paz depende de las características propias de los distintos suelos que componen la ciudad de La Paz.

EFFECTOS DE SITIO

De la experiencia mundial de eventos sísmicos es perfectamente conocido que los suelos "blandos" amplifican la acción sísmica, por lo tanto incrementan la aceleración sísmica y que los suelos "duros" prácticamente no amplifican, permitiendo mantener la aceleración sísmica similar a la presentada en suelo "firme" (roca).

La primera Norma Boliviana de Diseño Sísmico NBDS 2006 V1.4 que fue elaborada para el Viceministerio de Vivienda (dependencia del Ministerio de Obras y Servicios Públicos) con patrocinio del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), y que actualmente se encuentra en etapa de difusión y consulta pública, muestra en el capítulo 3 los diferentes tipos de suelo de la ciudad de La Paz, donde en función de las características de cada tipo de suelo se presenta un factor de amplificación sísmica, es decir que la aceleración sísmica se incrementa según las propiedades del suelo de fundación.

También se conoce que la "pendiente" o inclinación del suelo genera amplificación sísmica, por lo que también se asigna factores en función de la pendiente del terreno.

Finalmente la cercanía de algunos terrenos a "fallas geológicas" genera también la aparición de factores de amplificación sísmica.

Estos tres factores combinados ocasionan que la amplificación sísmica y por lo tanto la aceleración sísmica en los suelos de la ciudad de La Paz sea diferente en las distintas zonas de la ciudad.

En el mapa 3/5 de la Norma Boliviana de Diseño Sísmico NBDS, se muestra la zonificación sísmica de la ciudad de La Paz y se puede observar parcialmente los barrios de Miraflores, Sopocachi, Centro, Obrajes, Seguencoma, Irapavi, Cota Cota, etc. Cada color representa un nivel de aceleración sísmica que puede presentarse por la ocurrencia de un evento sísmico fuerte en alguna de las fuentes generadoras de sismos. Las aceleraciones del suelo van desde 0.05g (color amarillo) hasta 0.20g (color azul).

ACELERACIÓN DE DISEÑO

Es importante destacar que la aceleración del suelo no es la misma que la aceleración que puede experimentar la estructura, esta aceleración depende fundamentalmente del "periodo natural de vibración" de la estructura, usualmente a nivel mundial se considera que en la estructura la aceleración sísmica máxima es del orden de 2.5 veces la aceleración del

suelo. En ese sentido en la Norma Boliviana los espectros de diseño consideran justamente ese nivel de amplificación.

Una de las mejores formas de considerar en el diseño sísmico la aceleración sísmica, es mediante los espectros de diseño, los cuales muestran valores de aceleración en función del periodo de vibración de la estructura.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

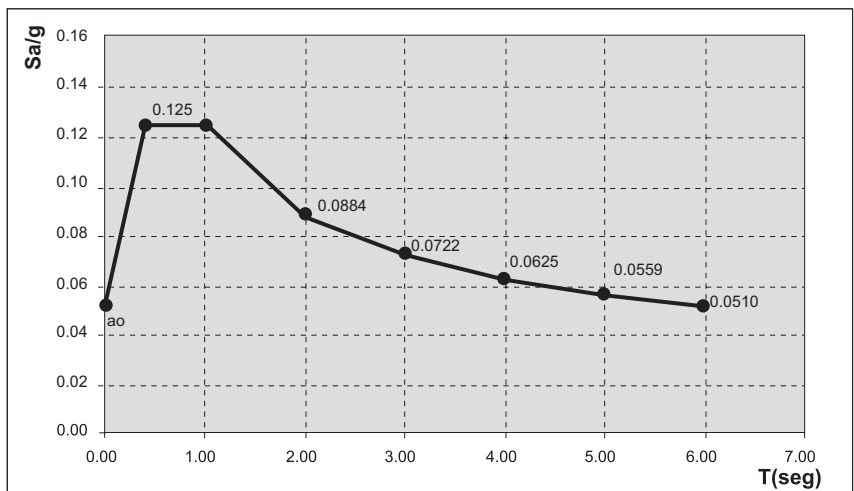
Por lo expuesto existen tres fuentes sísmicas (generadoras de sismos) que con una alta probabilidad generaran en un mediano plazo, aceleraciones sísmicas en la ciudad de La Paz. Los valores de aceleración y los respectivos espectros pueden obtenerse de la Norma Boliviana de Diseño Sísmico. Si bien los valores de aceleración son "preliminares" porque la información actual no es lo suficientemente completa, son valores representativos que pueden servir para realizar un diseño sísmo-resistente, por lo que se recomienda utilizarlos. Actualmente estamos trabajando con el Observatorio San Calixto para mejorar la calidad y cantidad de la información sísmica, por lo que se espera que en la próxima versión de la Norma Sísmica los valores de aceleración sean más precisos.

Msc.Ing. Rolando Grandi G.
Gerente General AIC
Autor de la Norma Boliviana de Diseño Sísmico NBDS 2006 V.1.4
Ing. Civil, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
Master en Estructuras, U. Nacional Autónoma de México.
Ex – Presidente SIB-LP
Contactos: Telf.: 2410440 • E-mail: aic2@entelnet.bo

Espectro de diseño, Zona Sísmica "A"

| Datos | | Limites | |
|-------|-------|---------|------|
| a_0 | 0.050 | T_1 | 0.40 |
| c | 0.125 | T_2 | 1.00 |
| r | 1/2 | | |

| Puntos | Periodo Seg | Pseudo Accl Sa/g |
|--------|-------------|------------------|
| 1 | 0.00 | 0.0500 |
| 2 | 0.40 | 0.1250 |
| 3 | 1.00 | 0.1250 |
| 4 | 2.00 | 0.0884 |
| 5 | 3.00 | 0.0722 |
| 6 | 4.00 | 0.0625 |
| 7 | 5.00 | 0.0559 |
| 8 | 6.00 | 0.0510 |



Este espectro corresponde a las zonas de la ciudad de La Paz con color amarillo del mapa 3/5 de la Norma Sísmica, es decir aquellas donde la aceleración del suelo es de 0.05g.