



Mapas de susceptibilidad de licuefacción potencial ciudad de Santa Cruz de la Sierra - Bolivia

Potential liquefaction susceptibility maps city of Santa Cruz de la Sierra - Bolivia

Sadud, Faisal

Recibido: 13 de agosto de 2018 • Aceptado: 27 de enero de 2020

Resumen

Estudios recientes del sub andino sur de Bolivia, han pronosticado que la liberación de energía acumulada en una cuña orogénica con atrapamiento de entre 85 a 100 km de la falla denominada Mandeyapecua, generaría un terremoto de Magnitud Momento Sísmico (M_w) de 8,5. La ciudad de Santa Cruz de la Sierra está ubicada al este de Bolivia, en la unidad fisiografía llanura chaco-beniana colindante con la faja sub andina, de topografía semiplana, está asentada en una cubierta cuaternaria encima de una superficie de formaciones terciarias que se acumularon en espesas secuencias sedimentarias. Los suelos de las capas superiores, consistentes en depósitos aluviales, eólicos y palustres, en gran porción están constituidos por arenas y limos saturados, resultando muy susceptibles a licuefacción. Con objetivo de evaluación, hemos confeccionado "Mapas de susceptibilidad a la licuefacción de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra", basándonos en el procedimiento simplificado en base a 172 ensayos de penetración estándar (SPT) con determinación de $(N_1)_{60cs}$, calculando Relación de Resistencia Cíclica (CRR, Cyclic Resistance Ratio), Relación de Cíclica de Tensiones (CSR, Cyclic Stress Ratio) e Índice de Licuefacción Potencial (LPI, Liquefaction Potential Index) para cada perfil de SPT. Usando las distribuciones de LPI, calculamos los valores de LPI de 5 y 15, que tomamos como los límites inferiores de licuefacción "moderada" y "alto", respectivamente. Se procedió al cálculo y tabulación correspondiente y de los resultados obtenidos se graficaron 15 mapas de susceptibilidad de licuefacción confeccionados en Arc Gis, de los cuales se concluyó que con un $M_w=6$ y (a_{max} =aceleración sísmica) $a_{max}=0,15g$ se tendría una licuefacción moderada en el 1% de la superficie de la ciudad y con $M_w=8,5$ y $a_{max}=0,5$ una licuefacción del 97% de los suelos del área total de la ciudad.

Palabras clave: Licuefacción, Método simplificado, Santa Cruz de la Sierra - Bolivia.

Abstract

Recent studies in the southern sub-Andean region of Bolivia have predicted that the release of accumulated energy in an orogenic wedge with entrapment between 85 and 100 km from the Mandeyapeca fault could generate an earthquake of a Magnitude Moment Scale (M_w) of 8. The city of Santa Cruz de la Sierra, is located in eastern Bolivia, in the chaco-beniana plain physiography unit adjoining the sub-Andean belt with semi-flat topography, seated on a Quaternary cover above a surface of tertiary formations that accumulated in thick sedimentary sequences. The soils of the upper layers, consisting of alluvial, aeolian and marsh deposits, are largely made up of saturated sands and silts, which are very susceptible to liquefaction. In mean of evaluation, we have made a first Map of Susceptibility to Liquefaction of the City of Santa Cruz de la Sierra, based on the simplified procedure based on 172 SPT tests with determination of (N1) 60cs, calculating, Cyclic Resistance Ratio (CRR), Cyclic Stress Ratio (CSR) and Liquefaction Potential Index (LPI) for each SPT profile. Using the LPI distributions, we calculated the probability of exceeding the LPI values of 5 and 15, which we take as the lower limits of "moderate" and "high" liquefaction, respectively. Furthermore all result and tabulations obtained were graphed in 15 maps regarding liquefaction susceptibility confectioned in Arc Gis. from which we conclude that an $M_w=6$ with seismic acceleration (a_{max}) 0,15g will results in a moderate liquefaction in 1% of the surface of the city and with $M_w=8,5$ - a_{max} 0,5 g a liquefaction rate of 97% of the soil in the total area of the city.

Keywords: Liquefaction, Simplified Method, Santa Cruz de la Sierra - Bolivia.

ANTECEDENTES

La ciudad de Santa Cruz de la Sierra-Bolivia, en su historia sísmica, ha sufrido en 1845 un sismo de Magnitud Momento Sísmico (M_w) de 5,2 y en la cercana población de Warnes un sismo de M_w 5,3 en 1929; no teniéndose registros posteriores de importancia por lo que los mapas sísmicos de la región la muestran como una zona de muy bajo riesgo y peligro sísmico.

La publicación de Books et al., (2011) que alerta sobre la probabilidad de ocurrencia de sismos de grandes magnitudes en la región denominada llanura chaqueña de Bolivia, afectarían a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra con magnitudes de $M_w=8.5$ y M_w 7,7 determinando un sustancial cambio en la amenaza geodinámica de la zona.

Los suelos existentes en el área urbana, son mayoritariamente granulares en estado saturado que resultan ser muy propensos a sufrir licuefacción; siendo uno de los temas más importantes en el análisis y mapeo de los riesgos y peligros sísmicos y que se define como "la transformación del material granular del estado sólido al licuado, como consecuencia del incremento de las presiones de poro; por la tendencia de tendencia de materiales granulares a compactarse cuando se someten a las deformaciones de cortante cíclicas y con la consecuente reducción de presiones efectivas..El cambio de estado sólido al licuado, ocurre con preferencia en suelos sueltos a medianamente compactos, pobremente drenados, como son arenas limosas o gravas confinadas o con sellos de materiales impermeables" (Youd y Idriss, 2001).

El planeamiento y desarrollo urbano de la ciudad que por sus características de topografía plana se ha realizado mayormente en escritorio, trazando circunferencias (denominados anillos de circunvalación) y radiales, mostrando similitud a una tela de araña. En los últimos 15 años se multiplicaron extraordinariamente los edificios en altura, construidos sobre suelos evaluados por su perfil geológico-geotécnico de sitio y su capacidad de soporte,

los que si bien se fundaron sobre pilotes, el diseño de los mismos sólo obedeció a satisfacer las solicitudes de capacidad de carga y normas en vigencia no actualizadas.

Dentro de tal planificación no se han considerado las características y propiedades de los suelos y peor aún la temática de licuefacción, con la adición de que la clasificación sísmica de zona es de bajo riesgo, por lo que la evaluación previa o actual de licuefacción en Santa Cruz de la Sierra es inexistente. La falta total de investigaciones sobre la temática de licuefacción llevó al necesario e imprescindible estudio sobre su potencialidad de licuefacción, a consecuencia del extraordinario incremento de la presión de poros, debido a las grandes vibraciones que generarían terremotos debidos a la liberación de energía de la falla Mandeyapeca.

El conocimiento de las características y propiedades de los suelos y su comportamiento frente a las solicitudes vibratorias nos llevará a realizar la zonificación de la ciudad en base esta amenaza geodinámica sísmica secundaria, y a la evaluación y cuantificación de los riesgos, llegando que base a los resultados obtenidos se efectuarán proposiciones de nuevas normativas y las posibles proposiciones de atenuación de daños.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

Ubicación

La ciudad de Santa Cruz de la Sierra está ubicada al este de Bolivia en el centro de Sudamérica. Su centro histórico se encuentra a 17° 47' de latitud sur y 63° 10' de longitud oeste, con una altitud promedio de 420 msnm está desarrollada en una llanura de gran extensión con poca pendiente. Debido a la alta productividad de su entorno, la ciudad tiene un impresionante crecimiento en extensión física, poblacional y económica. En 1959 tenía una población de 60.645 habitantes y en la actualidad la ciudad ocupa una superficie de 35.000 hectáreas y tiene una población cercana a los tres millones de habitantes (Figura 1).

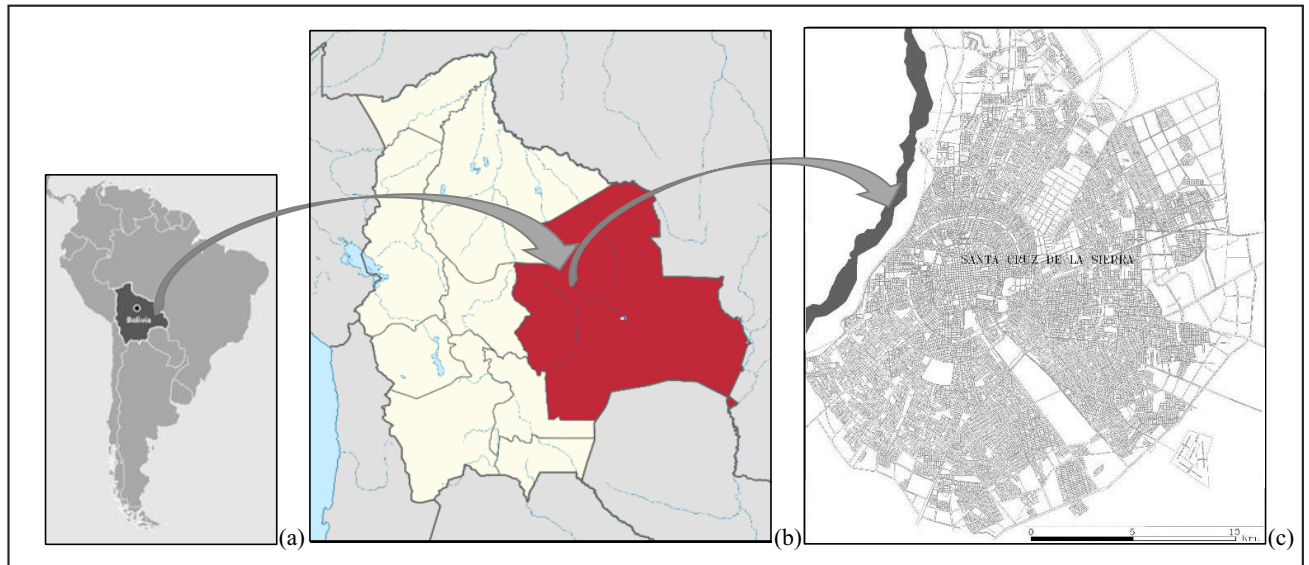


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

La ciudad se edificó en la región morfológica denominada llanura Chaco Beniense. Está asentada sobre una cubierta cuaternaria depositada sobre capas terciarias que se acumularon en secuencias sedimentarias semi planas, en una cuenca geológica continental ubicada entre los Andes y el escudo brasileño.

La cuenca fue rellenada por acciones sedimentarias del mega-abanico del río Grande y un gran abanico del río Pirai; ríos que provenientes del oeste arrastrando materiales de las zonas montañosas del subandino.

En la región urbana los suelos provienen de los depósitos de los abanicos, depósitos aluviales de los ríos Pirai y Peroveles, palustres de paleolagunas formadas por rebalse, sedimentación y evaporación de finos arrastrados por el río Grande; depósitos eólicos en dos etapas del "mar de arena" del Paleozoico y depósitos eólicos como dunas de arena del holoceno.

Se elaboró un mapa de zonificación (Figura 2) que muestra la existencia de siete zonas geológico- geotécnicas principales, determinadas en función de su geomorfología, tipo de depósitos superficiales, el perfil geotécnico de sondeos efectuados y las características geológicas geotécnicas de los suelos encontrados.

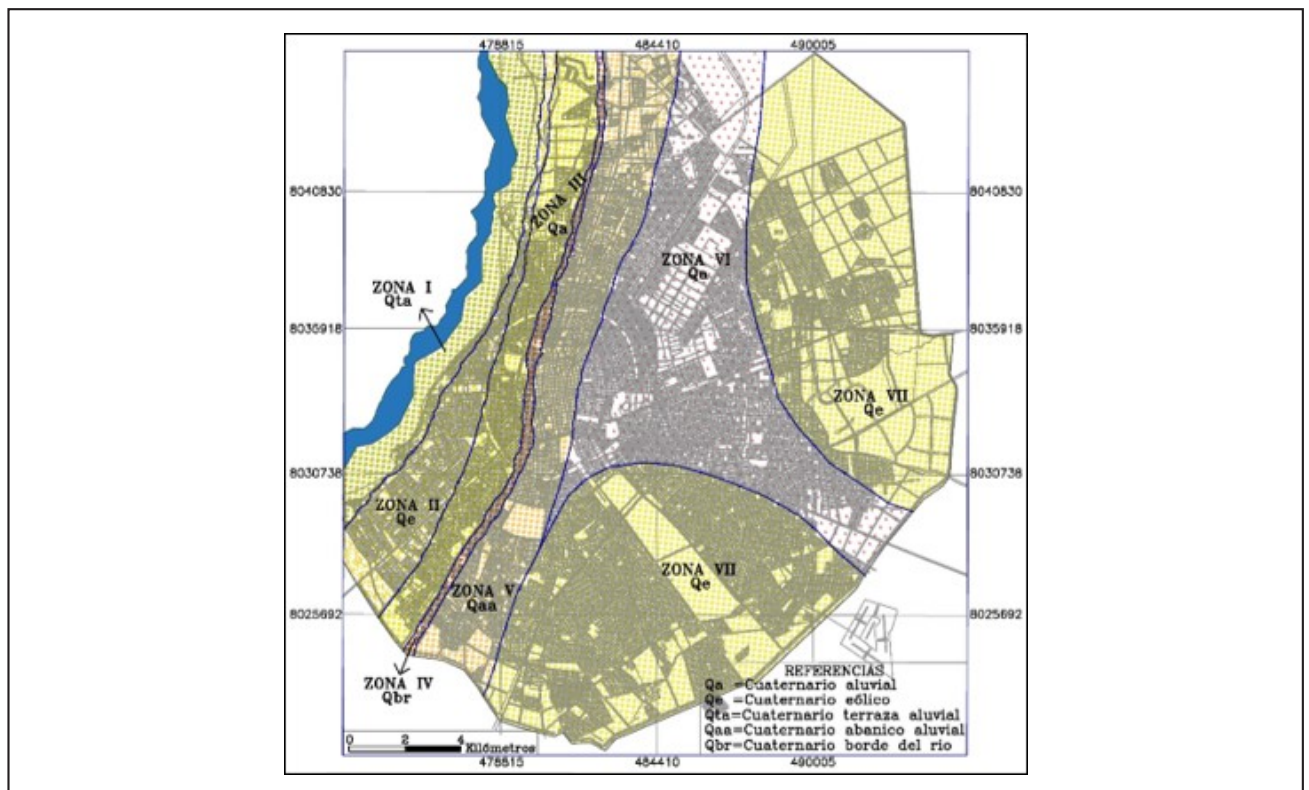


Figura 2. Mapa de Zonificación de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Fuente: elaboración propia.

Los límites entre zonas no están totalmente definidos por la falta de mayores datos. Las características generales de las zonas son las siguientes:

La zona I (Qta) (Qta= Cuaternario terraza aluvial) corresponde a las terrazas del río Piraí, caracterizadas por arenas limosas SM y limos arenosos ML en los primeros metros y de tipo SM-SP, SP en las capas más profundas. La profundidad de nivel freático oscila entre 1 y 3 metros. Posibilidad de licuefacción alta.

La zona II (Qe) (Qe= Cuaternario eólico) está constituida por una secuencia de dunas de elevación suave con desniveles entre pie y cresta de hasta 3 m, que son notorias en calles y avenidas. Las arenas limosas finas de coloración marrón claro rojizo finas mal graduadas características de suelos loessicos. La profundidad del nivel freático está relacionada con la morfología de las dunas, cresta o pie. En general se encuentra a 6 m de profundidad.

La zona III (Qa) (Qa= Cuaternario aluvial) es una terraza aluvial formada por un antiguo río llamado Perovelez, que en la actualidad corre con muy poco caudal en canales de drenaje construidos en la ciudad. Esta área está caracterizada por arenas SM saturadas y con nivel freático entre 2 y 3 m de profundidad.

La zona IV (Qbr) (Qbr= Cuaternario borde del río) se caracteriza por una fuerte pendiente en corto espacio, formando el mayor desnivel de la ciudad, construido por erosión de la terraza chacobeniana formada por los abanicos aluviales, por los ríos Piraí y Perovelez. Tratándose de una zona de depósitos de erosión de terraza y de borde de río, los suelos son heterogéneos con presencia de arenas limosas (SM), limos arcillosos (CL-ML), delgados lentes de arcilla limosa (CL). La profundidad del nivel freático es variable en función de la cota del talud.

La zona V (Qaa) (Qaa= Cuaternario abanico aluvial) es la más alta de la ciudad (Desnivel con la zona III 10 m) y la geológicamente más antigua. Está formada por los mega abanicos que rellenaron la cuenca estratigráfica la llanura chacobeniana. Tiene materiales arenosos de tipo (SM), limos (ML) y en profundidad se encuentran arenas limpias y de tipo (SM-SP) a los 8 metros se encuentran gravas finas bien graduadas El NF está en promedio a los 9 metros.

La VI (Qa) zona, está ubicada en el sector este de la ciudad, caracterizada por depósitos de paleolagunas con suelos cohesivos (CL), y (CL-ML), que se extienden a profundidad variable. Los depósitos producto de sedimentación de derrames del río Grande están compuestos por limos, arcillas y limos arcillosos (limo cuarzoso e illita subordinada) En esta zona se ubicaron antiguas "tejerías" y modernamente industrias cerámicas. La distribución es caótica en función de las antiguas depresiones de evaporación y sedimentación de los coloides.

La zona VII (Qe) está caracterizada por depósitos eólicos holocenos, en los que son notorias dunas de altura y extensión variable distribuidas caóticamente sobre suelos preponderantemente limosos y arenosos. Los materiales superficiales formadores de dunas son de tipo loésico. Los suelos inferiores desde 3 metros hasta el final las exploraciones (20 m) son limos arenosos y arenas (SM) y arenas limpias (SM-SP) y (SP). El nivel freático es detectado entre 4 y 5 metros de profundidad.

En muchas zonas de la ciudad pueden apreciarse dunas de arena sueltas sin continuidad y que en algunos casos alcanzan hasta 10 metros de altura, las que por su destaque panorámico han sido aprovechadas por clubes de tenis, hoteles y pistas de motocross.

El río Piraí, ubicado al oeste, divide a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra con el municipio de Porongo, donde se ha desarrollado desde hace pocos años una nueva y gran urbanización denominada Urubó, que en realidad es un nuevo barrio de la ciudad sin que pertenezca políticamente a ella. La geomorfología del área del Urubó, muy diferente a la de Santa Cruz de la Sierra, está caracterizada por colinas y depresiones de poca magnitud, con muchos cursos de agua estacionales; con suelos lateríticos y depósitos eólicos de magnitud. Este trabajo no contempla esta zona por no contar con ensayos suficientes y por no ser políticamente integrante de la ciudad.

OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es elaborar mapas de susceptibilidad a la licuefacción de los suelos de Santa Cruz de la Sierra, empleando el método simplificado para determinar los valores del Factor de seguridad de licuefacción FS_{LIQ} y el Índice Potencial de Licuefacción LPI (Liquid Potential Index) considerando sismos de $M_w = 7,7$ y $M_w = 8,5$ (determinados en los trabajos de Brooks) y $M_w = 6,0$ generados por sismos corticales ocurridos en Bolivia. Ante la falta de datos experimentales se adoptaron valores de aceleraciones $a_{max} = 0,15; 0,2; 0,3; 0,4;$ y $0,5g$ ($g = galileo$).

También han servido de base para el trabajo las propiedades y parámetros de los suelos, determinados por SPT, perfiles geotécnicos y ensayos de laboratorio de 172 puntos de muestreo distribuidos en el área citadina.

La probabilidad de las M_w adoptadas fue determinada en los trabajos de Brooks, quedando determinar la probabilidad de ocurrencia de la combinación de M_w vs. a_{max} , las que determinarían la aplicabilidad de normativas de sitio.

MARCO TEÓRICO

Después de los terremotos ocurridos en 1964 en Alaska, Estados Unidos y Niigata, Japón, que causaron desastres por licuefacción de suelos, se desarrolló y publicó el denominado "Método simplificado" (Seed y Idriss, 1971) convirtiéndose en una práctica común para evaluar la resistencia a la licuefacción de los suelos. Al transcurso de los años, el método se ha modificado y mejorado constantemente con documentos históricos (Seed, 1979; Seed y Idriss, 1982; Seed, 1985; Boulanger y Idriss 2008, 2012, 2014).

El método simplificado y sus actualizaciones determina los factores de seguridad contra la licuefacción FS_{LIQ} , (Seed y Idriss, antes citado) basado en dos términos de evaluación de: la demanda sísmica sobre las capas de suelos expresadas en términos de Relación Cíclica de Tensiones CSR y la capacidad del suelo de resistir la licuefacción expresado como Relación de Resistencia Cíclica CRR.

El método simplificado se basa en el desarrollo empírico, en la colección de datos de los suelos observaciones de campo y laboratorio y en la demanda sísmica de la zona. Para la práctica de rutina de investigación de la licuefacción en sitio se emplean ensayos de campo que incluyen al SPT, CPT (CPT= Ensayo de Penetración de Cono), velocidad de ondas de corte y ensayo BPT (BPT=Becker penetration test).

El FS_{LIQ} muestra el potencial de licuefacción y no la severidad de esta, por lo que Iwasaki et al (1978) propusieron el LPI. Este proporciona una integración del potencial de licuefacción a lo largo de la profundidad de un perfil de suelo y predice el rendimiento de toda la columna del suelo y con

dependencia de la magnitud de la aceleración horizontal máxima del terreno (Luna & Frost, 1998).

Determinación de los factores de seguridad contra la licuefacción FS_{L10}

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron, como base, ensayos de SPT y el Método Simplificado (Boulanger y Idriss, 2014).

Relación cíclica de tensiones inducido por terremoto (CSR)

La razón de esfuerzo cíclico inducido por terremoto (CSR) a una profundidad z según el Procedimiento Simplificado de Seed y Idriss, (1971) se expresa como:

$$CSR_{(M,\sigma'v)} = 0,65 * \frac{amax}{g} * \frac{\sigma'v}{\sigma'v} * r_d \quad (1)$$

Donde: $\sigma'v$ = tensión total vertical en la profundidad z ; $\sigma'v$ = tensión vertical efectiva en la profundidad z ; $amax/g$ = aceleración horizontal pico (como una fracción de la aceleración de la gravedad) en la superficie del suelo; r_d = factor de reducción del esfuerzo cortante que explica la respuesta dinámica del perfil del suelo.

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) * M] \quad (2)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (3)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (4)$$

Donde: z = profundidad debajo de la superficie y M = Magnitud del momento del sismo.

Ante la inexistencia de una base de datos de Santa Cruz de La Sierra sobre la respuesta dinámica de los suelos $amax$, para este trabajo han sido asumidos valores de $amax=0,15, 0,2; 0,3; 0,4$ y $0,5$ g.

Corrección del número de golpes del SPT (NSPT)

Por la variabilidad e incertidumbre de ensayos de SPT, los valores de NSPT para evaluación de licuefacción son corregidos por una serie de factores según:

$$(N_1)_{60} = C_N C_E C_R C_B C_S N_m \quad (5)$$

Donde: N_m es el número medido golpes del SPT; $(N_1)_{60}$ es N_m SPT corregido por porcentaje de energía que recibe el suelo con relación a la energía total ejercida por el martinete;

C_N = Factor de corrección por sobrecarga

C_E = Factor de corrección de energía del martillo, C_E

$$C_E = ER_m / 60 \quad (6)$$

Donde: ER_m = Razón de energía medida como porcentaje del máximo teórico

Factor de corrección por longitud de barra, C_R

$$C_R = 1 - 0,36e^{(-0,085 * L)} \quad (7)$$

Donde: L = Longitud de barra total, desde el punto de impacto del martillo hasta la base del muestreador.

Factor de corrección por diámetro de la perforación, C_B Factor de corrección por diámetro del pozo de perforación

Diámetro de 65 - 115 mm. $C_B = 1.00$

Diámetro de 115 mm. $C_B = 1.05$

Diámetro de 200 mm. $C_B = 1.15$

(Skempton, 1986)

Factor de corrección para el uso de cucharas bipartida con o sin alineador, C_S

Para muestreador sin alineador $C_S=1$

Corrección por presión de confinamiento (C_N)

Idriss y Boulanger (2003,2008) recomendaron que C_N pudiera expresarse en términos de $(N_1)_{60cs}$ de la siguiente manera:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'v}\right)^m \leq 1.7 \quad (8)$$

$$m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}} \quad (9)$$

Donde: P_a =Presión atmosférica; $(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos; $(N_1)_{60cs}$ limitados a valores ≤ 46 .

El uso de la ecuación requiere una iteración que se logra utilizando la opción de iteración automática en una hoja de cálculo de Excel.

Corrección por contenido de finos

Las ecuaciones para determinar CRR, están basadas en arenas limpias, por lo que no siendo así se debe corregir $(N_1)_{60}$ por contenido de finos (FC) según la siguiente ecuación.

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (10)$$

Los ajustes a $\square (N_1)_{60} = f(FC)$ se derivan para que el CRR pueda expresarse únicamente en términos de $(N_1)_{60cs}$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 - \frac{9.7}{FC+0.01} - \left(\frac{15.7}{FC+0.01}\right)^2\right) \quad (11)$$

Relación de resistencia cíclica

La razón de máxima resistencia cíclica (CRR) representa la máxima razón de esfuerzo cíclico (CSR) a la cual un suelo puede resistir licuación.

$$CRR_{(M,\sigma'v)} = CRR_{(M=7.5,\sigma'v=1)} * MSF * K_\sigma \quad (12)$$

Donde: $CRR_{(M=7.5, \sigma'v=1)}$ = CRR normalizada a una magnitud $M=7.5$ $\sigma'v=1$ atm; $CRR_{M \sigma'v}$ = CRR corregida para magnitud M y esfuerzo efectivo $\sigma'v$.

$$CRR_{(M=7.5, \sigma'v=1atm)} = \exp \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right) \quad (13)$$

Factor de corrección de sobrecarga (K_σ)

La relación K_σ utilizada fue desarrollada por *Boulanger (2003)* y modificada por *Boulanger y Idriss (2008)* que recomienda que la relación K_σ resultante se exprese en términos de los valores de $(N_1)_{60cs}$ como sigue:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left(\frac{\sigma'v}{P_a} \right) \leq 1.0.3 \quad (14)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3 \quad (15)$$

El coeficiente C_σ puede limitarse a su valor máximo de 0.3 al restringir $(N_1)_{60cs} \leq 37$

Factor de escala de magnitud, MSF

El factor de escala de magnitud MSF (Magnitude Scaling Factor) es utilizado para contabilizar los efectos de duración (es decir, el número y amplitud relativa de los ciclos de carga) en el desencadenamiento de la licuefacción.

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left(8.64 \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 1.325 \right) \quad (16)$$

Donde: MSF max Factor de Escala de Magnitud Máximo

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31.5} \right)^2 \leq 2 \quad (17)$$

Factor de Seguridad a la Licuación (FS_{LIQ})

Seed & Idriss (1971) propusieron un procedimiento simplificado para evaluar la resistencia a la licuación de los suelos en términos de factores de seguridad (FS_{LIQ}) relacionando la razón de resistencia cíclica (CRR) con la razón de esfuerzo cíclico (CSR).

La determinación de CRR y CSR sufrió las adecuaciones que se describieron en los puntos específicos llegando a:

$$FS_{LIQ} = \frac{CRR_{\sigma'v}}{CSR_{\sigma'v}} \quad (18)$$

Una capa de suelo con $FS_{LIQ} < 1$ generalmente se clasifica como licuable y con $FS_{LIQ} > 1$ se clasifica como no licuable (*Seed e Idriss, 1971*).

Determinación del índice potencial de licuefacción (LPI)

La expresión propuesta por *Iwasaki et al (1978)* es la siguiente:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) * w(z) dz \quad (19)$$

Donde: LPI: Índice de potencial de licuación; z: Profundidad hasta el punto medio de la capa de suelo; F(z): Factor de severidad calculado por

$$F(z) = 1 - FS_{LIQ} \text{ para } FS_{LIQ} < 1 \quad (20)$$

$$F(z) = 0 \text{ para } FS_{LIQ} \geq 1 \quad (21)$$

w(z): Factor de ponderación calculado por

$$w(z) = 10 - 0.5z \text{ para } z \leq 20 \text{ m.} \quad (22)$$

$$w(z) = 0 \text{ para } z > 20 \text{ m.} \quad (23)$$

dz: Incremento diferencial de la profundidad

Para la interpretación del significado de los valores de LPI hemos adoptado la clasificación de categorías de *Luna & Frost, (1998)* que adaptaron la clasificación de *Iwasaki, et al. (1982)*, el que compilando información de 6 terremotos históricos en Japón propuso 4 categorías. Ambas clasificaciones están contenidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorías potencial de licuefacción basadas en valor LPI.

Fuente: Categoría potencial de licuefacción (Iwasaki et al., 1982) y (Luna & Frost, 1998)

LPI	Categoría potencial licuefacción (Iwasaki et al., 1982)	Categoría potencial licuefacción (Luna and Frost, 1998)
0	Muy bajo	Bajo a nulo
$0 < LPI \leq 5$	Bajo	Bajo
$5 < LPI \leq 15$	Alto	Moderado
$LPI > 15$	Muy alto	Alto

DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTUDIO

Para la evaluación de la licuefacción potencial de Santa Cruz de la sierra se utilizó la zonificación geológica y geotécnica de la ciudad, los datos recolectados en 172 ensayos de SPT distribuidos en distintas zonas urbanas y la nueva condición sísmica alertada por los trabajos de (*Brooks et al., 2011*) y (*Weiss et al., 2016*).

Ensayos de Standard Penetration Test (SPT)

Los ensayos utilizados se ejecutaron bajo la norma ASTM D1586 en 172 sitios (Figura 3), en los que se determinó su

posición en coordenadas UTM, se midió la cota del terreno registrándose el diámetro del pozo y demás características.

De todos y cada uno de los sondeos ejecutados, han sido confeccionadas tablas que contienen la numeración correlativa,

el nombre del sitio de sondeo, su ubicación en CUTM, la cota, la profundidad, descripción y clasificación unificada de los suelos, las capas de suelo, el valor de N y de la densidad.

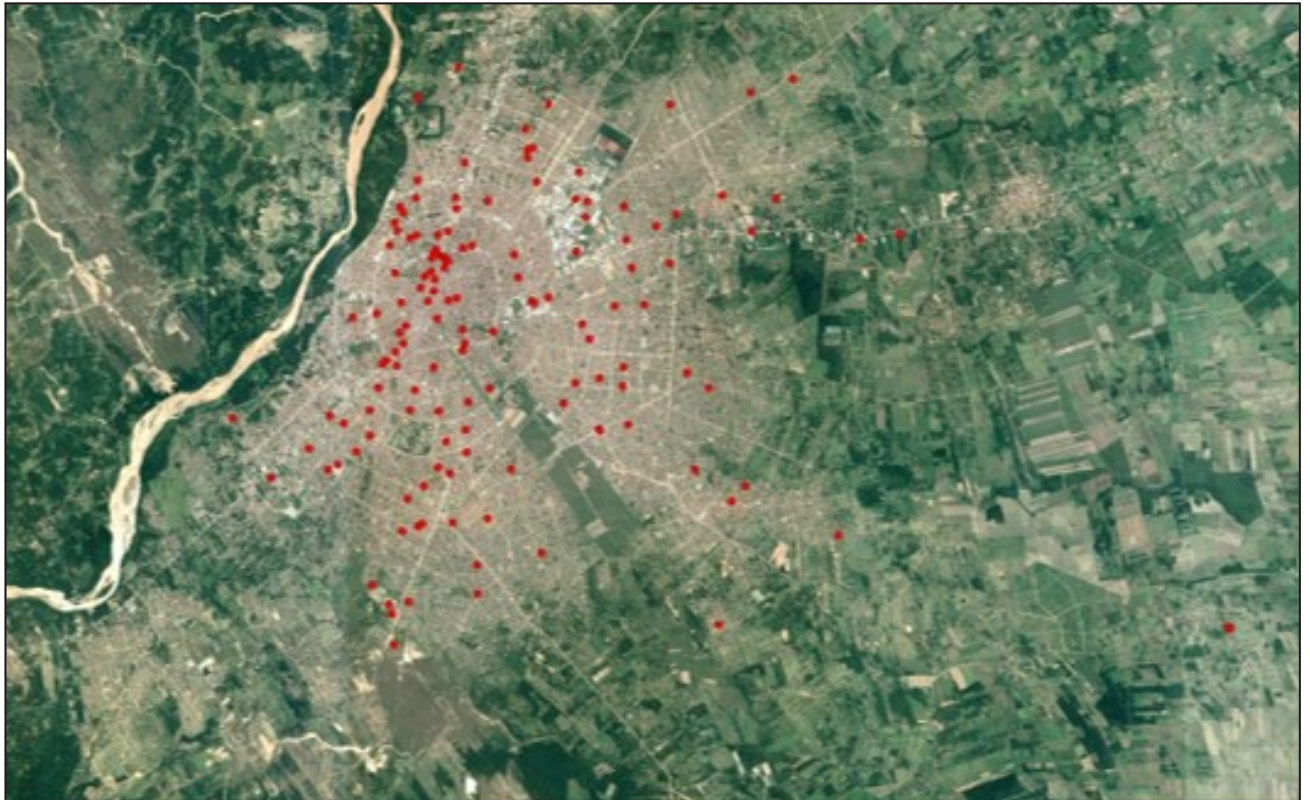


Figura 3. Ubicación de sitios de sondeo.

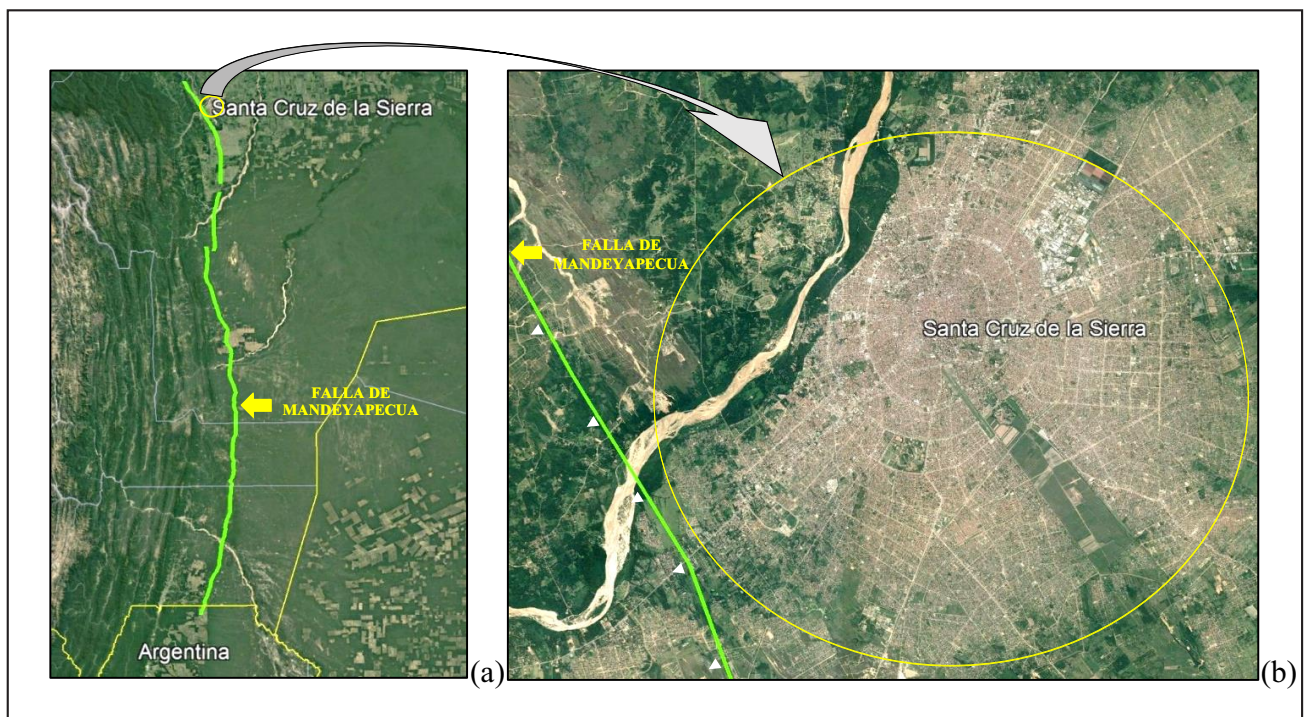


Figura 4. Falla de Mandeyapeca.

Nueva Condición Sismo tectónica del Área de Estudio

Santa Cruz de la Sierra está catalogada con muy bajo riesgo sísmico con $Ao/g=0,06$ (*Norma Sísmica Boliviana en vigencia NBDS, 2006*).

Una nueva condición sísmica de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra está directamente relacionada con los trabajos de *Brook et al (2011)*, sobre la falla inversa denominada Mandeyapecuca.

La falla, mostrada en la Figura 4, está ubicada en el borde del sub-andino boliviano, que con una longitud de 486 km se extiende desde las proximidades de la localidad de Yacuiba, cercana a la frontera Bolivia-Argentina, con rumbo generalizado N, concluyendo a aproximadamente a 30 km al NW de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Fue mapeada por geólogos a principios del siglo XX y se encuentra definida en el Mapa Geológico de Bolivia. Se relaciona a esta falla con los sismos de magnitud 6,4 ocurridos en 1887 y 1899, que destruyeron la localidad de Yacuiba.

La notoriedad reciente de la mencionada falla se debe a que se publicó "*Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc*" (*Brooks et al.2011*)

en *Nature Geosciences*, estudio éste en el que utilizando controles satelitales con GPS se realizó la medición del desplazamiento de las placas tectónicas de Nazca y Continental sudamericana y se efectuaron trabajos de campo para observaciones y mediciones de la Neo tectónica.

La técnica de medición con GPS del desplazamiento entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, les permitió descubrir que una sección poco profunda entre 85 a 100 kilómetros de longitud de la falla Mandeyapecuca, está "encajada" con muy bajo movimiento respecto a la generalidad, lo que ocasiona tensión y acumulación de energía, la que al ser liberada determina la probabilidad de ocurrencia de terremotos de gran magnitud de hasta $Mw=8,5$.

La Figura 5, elaborada en base a *Brooks et al. (2011)*, muestra la geografía del subandino boliviano, la falla de Mandeyapecuca, la posición de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y zonas con diferentes velocidades de movimiento de las placas medidas con GPS. Se destaca claramente la muy baja velocidad en el sector atrapado.

En la Tabla 2, elaborada desde *Brooks et al (2011)*, se presenta el resumen de localidades cercanas, la magnitud probable de sismo y su tiempo de recarga. Se destaca Santa Cruz de la Sierra con $Mw=8,5$ en 1.326 años.

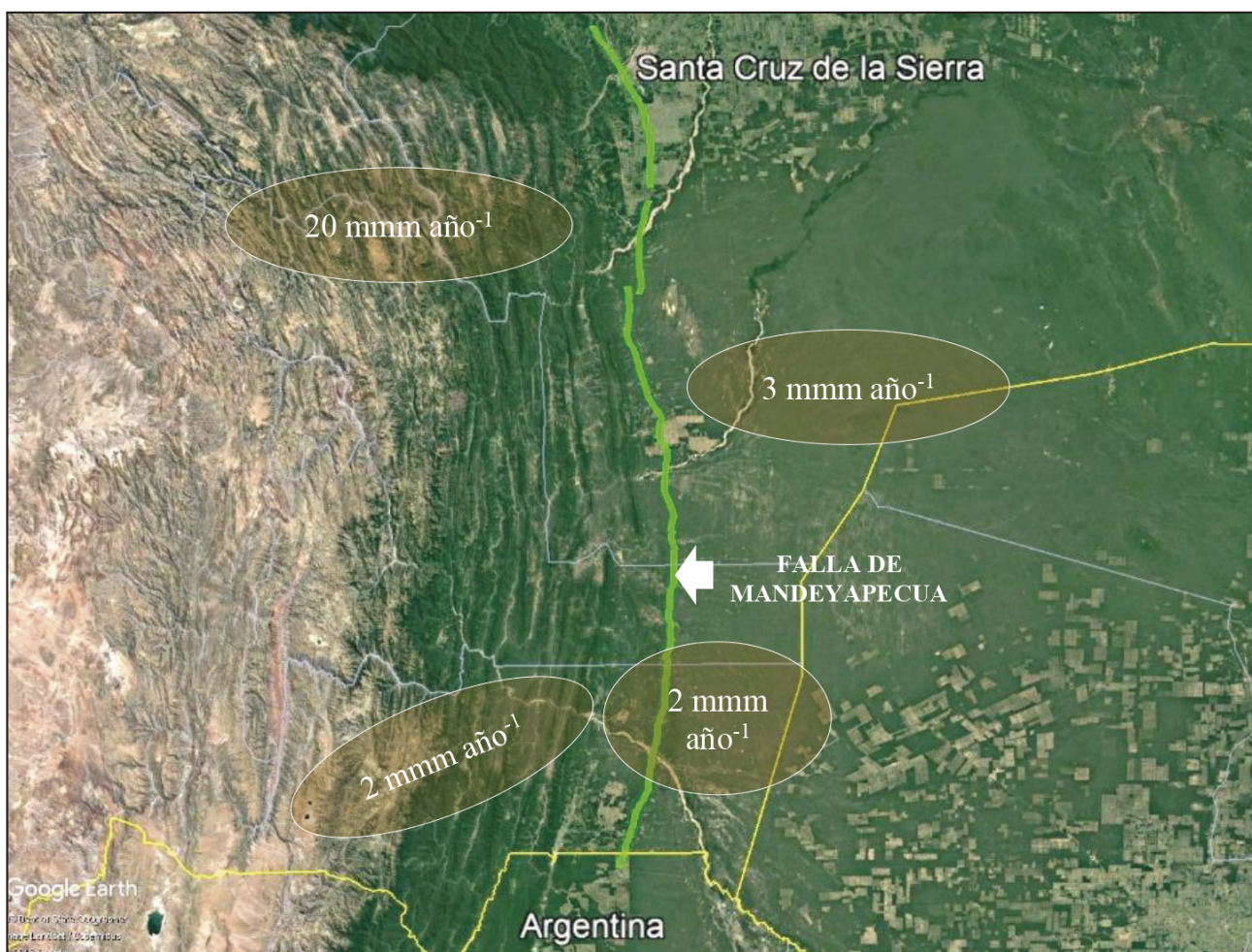


Figura 5. Velocidades de movimiento de placas tectónicas.

Tabla 2. Alivio de la Falla de Mandeyapeca.
Fuente: Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc. (Brooks et al., 2011).

Localidad	Ubicación	Mw	Tiempo (años)
Santa Cruz de la Sierra	17.7°S 63.2°W	8,5	1,326
	17.7°S 63.2°W	7,7	331
Charagua	19.9°S 63.2°W	8,5	1,326
	19.9°S 63.2°W	7,7	331
Villamontes	21.3°S 63.5°W	8,6	1,380
	21.3°S 63.5°W	7,9	388
Ibibobo	21.5°S 63°W	8,5	1,253
	21.5°S 63°W	7,7	313
Yacuiba	22°S 63.4°W	8,3	970
	22°S 63.4°W	7,5	242

Se ha continuado con los trabajos iniciados por Brooks y otros (2011) y es así que muchos investigadores del USGS han realizado estudios, y a nivel regional son destacables los trabajos de Yagupsky sobre *Modelación en el Área del Subandino*, de Rafael Toruál sobre *La Neo Tectónica de Mendoza y Subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Sudamericana*, y los de Ryan Anderson et al. (2017) sobre *La Arquitectura de Los Andes en Perfil del 21° S*. Merece especial mención el trabajo de Weiss et al (2016) "Isolating active orogenic wedge deformation in the southern Subandes of Bolivia journal of geophysical research: solid earth", en el que muestra testigos en tierra, que fueron colocados para los estudios de GPS satelitales en secciones transversales medibles.

En los últimos años se han producido sismos de magnitud variable en poblaciones ubicadas en la trayectoria de la falla, en la Tabla 3 se muestran sismos de Mw > 4 desde el 2015 hasta 2018.

Tabla 3. Sismos Mw>4 producidos en la trayectoria de la falla Mandeyapeca.
Fuente: United States Geological Survey (USGS).

Fecha	Ubicación	Magnitud	Profundidad
03/05/2018	Carandaity	4,2	579
02/04/2018	Carandaity	4,5	560
02/04/2018	Boyuiibe	4,6	567
02/04/2018	Carandaity	5,0	570
02/04/2018	Carandaity	6,8	559
14/01/2016	Charagua	4,5	582
29/05/2016	Boyuiibe	4,3	565
14/01/2016	Charagua	6,1	582
12/01/2016	Carandaity	4,5	566
21/12/2015	Jorochito	4,9	36

RESULTADOS OBTENIDOS

Se llevaron a cabo los cálculos pertinentes confeccionando 1.892 hojas de cálculo en Microsoft Office Excel, 11 tablas de cada uno de los 172 sitios, siguiendo el método simplificado de Seed y Idriss (1971), Boulanger e Idriss (2014) y el método de Iwasaki et al (1978, 1982) determinando CRR, CSR y FS_{LIQ} y LPI, para sismos de Mw=6, Mw 7,5 y Mw=8,5 y valores de amax de 0,15g; 0,2g; 0,3g; 0,4g y 0,5g,

En la Tabla 4 se presenta el de resumen de resultados obtenidos para un punto típico (Sitio) de sondeo. Se elaboraron planillas de estas características para los 172 puntos.

Resúmenes de valores porcentuales $FS_{LIQ} < 1$ (Suelos licuables) presentados en la tabla 5.

Tabla 5. Valores porcentuales de FS_{LIQ} .
Fuente: Resultados de investigación F. Sadud

Mw	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5
6	2%	20%	56%	67%	74%
7,5	10%	45%	69%	85%	89%
8,5	1%	40%	82%	91%	95%

En la tabla 6 se presentan los valores de LPI para diferentes Mw y amax.

Tabla 6. Resumen de porcentaje de LPI con relación de Mw y amax.
Fuente: Resultados de investigación F. Sadud

Mw	amax	Bajo a nulo	Bajo	Moderado	Alto
6	0,15	81%	8%	1%	0%
	0,20	32%	46%	19%	3%
	0,30	3%	12%	33%	52%
	0,40	1%	3%	13%	83%
7,5	0,50	1%	0%	5%	94%
	0,15	60%	30%	9%	1%
	0,20	9%	33%	40%	18%
	0,30	1%	3%	15%	81%
8,5	0,40	1%	1%	3%	95%
	0,50	0%	1%	1%	98%
	0,15	54%	35%	10%	1%
	0,20	7%	34%	39%	20%
0,30	1%	1%	14%	84%	
	0,40	0%	1%	3%	96%
	0,50	0%	1%	2%	97%

Representación gráfica de resultados de CSR-CRR, FS_{LIQ} y LPI.

En la Figura 6 se representan los sondeos mostrando profundidad NF, clasificación de suelos USCS, $(N_1)_{60}$, la relación CRR- CSR y los valores de FS_{LIQ} y LPI con el propósito de comparar objetivamente el comportamiento de los suelos presentes en sitio.

Tabla 4. Resumen de resultados. Sondeo A1, Mw 7.5 y amax 0,20 g.
Fuente: Resultado de investigación F. Sadud

PUNTO:	A-1	USCS	rd	(N1)60cs	CSR7,5	CRR7,5	FS7,5	CAPA N° DE A:	PROF. (m)	N promedio	amax (m/s ²):		F	H (m)	Z (m)	W	LPI
											por capa	0,20g					
0,00	-	-	-	-	-	-	-	1	0,00	11	1,27	0,00	0,00	2,50	1,25	9,38	0,00
1,00	11	SC	1,00	17,09	0,13	0,17	1,32	1	1,00								
2,00	12	SC	0,99	15,44	0,13	0,16	1,22	2	2,00	13	0,00	1,00	1,00	2,00	2,00	9,00	18,00
3,00	14	SM	0,98	15,42	0,13	0,16	1,23		3,00								
4,00	18	SM	0,97	16,57	0,13	0,17	1,32	3	4,00	20	0,00	1,00	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00
5,00	22	SM	0,96	19,08	0,13	0,20	1,53		5,00								
6,00	26	SM	0,95	20,30	0,13	0,21	1,67	4	6,00	26	0,00	1,00	1,00	1,00	5,50	7,25	7,25
7,00	14	SM-SP	0,94	9,01	0,12	0,11	0,90	5	7,00	16	1,09	0,00	0,00	1,00	7,00	6,50	0,00
8,00	12	SP	0,92	6,09	0,13	0,09	0,70		8,00								
9,00	14	SM-SP	0,91	8,93	0,14	0,11	0,80		9,00								
10,00	16	SM	0,90	13,63	0,14	0,14	1,01		10,00								
11,00	18	SM	0,88	14,46	0,15	0,15	1,02		11,00								
12,00	24	SM	0,87	17,35	0,15	0,18	1,16		12,00								
13,00	11	CL	0,85	10,79	0,15	0,12	0,80		13,00								
14,00	26	SM-SP	0,84	13,77	0,16	0,15	0,93	6	14,00	26	1,06	0,00	0,00	0,70	14,15	2,93	0,00
15,00	34	SM	0,82	21,56	0,16	0,23	1,43	7	15,00	24	1,06	0,00	0,00	1,20	15,10	2,45	0,00
16,00	14	CL	0,81	11,78	0,16	0,13	0,83		16,00								
17,00	22	SM	0,79	15,08	0,16	0,16	0,99	8	17,00	22	0,00	1,00	1,00	1,30	1,10	9,45	12,29
18,00	12	CL	0,78	10,62	0,16	0,12	0,77	9	18,00	12	1,13	0,00	0,00	1,70	17,85	1,08	0,00
19,00	38	SM	0,76	22,23	0,16	0,24	1,49	10	19,00	36	1,10	0,00	0,00	1,30	19,35	0,32	0,00
20,00	34	SM-SP	0,75	15,89	0,16	0,16	1,03		20,00								

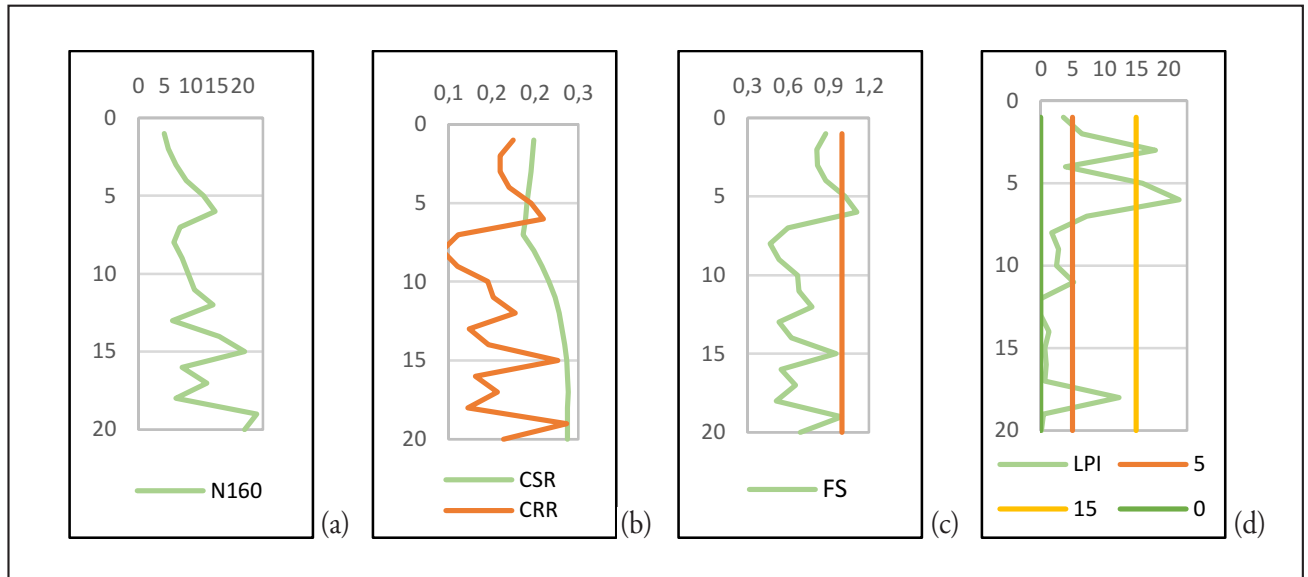


Figura 6. Sondeo A1 Graficación de la relación (N1)60- CRR-CSR, FSLIQ y LPI.

MAPAS DE POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA

Se elaboraron 15 mapas de potencial de licuefacción de Santa Cruz de la Sierra-Bolivia, empleando el software ArcGis 10.2, resultantes de las combinaciones de $M_w=6, 7,5$ y $8,5$ con $a_{max}=0,15; 0,2; 0,3; 0,4$ y $0,5g$. Se presenta como mapa típico

en la Figura 7, mostrando la categorización de licuefacción para $M_w= 7,5$ y $a_{max} 0,2g$.

En la Figura 7 se presenta un mapa característico de potencial de licuefacción de suelos en Santa Cruz de la Sierra, obtenido con $M_w=7,5$ y $a_{max}=0,2g$.

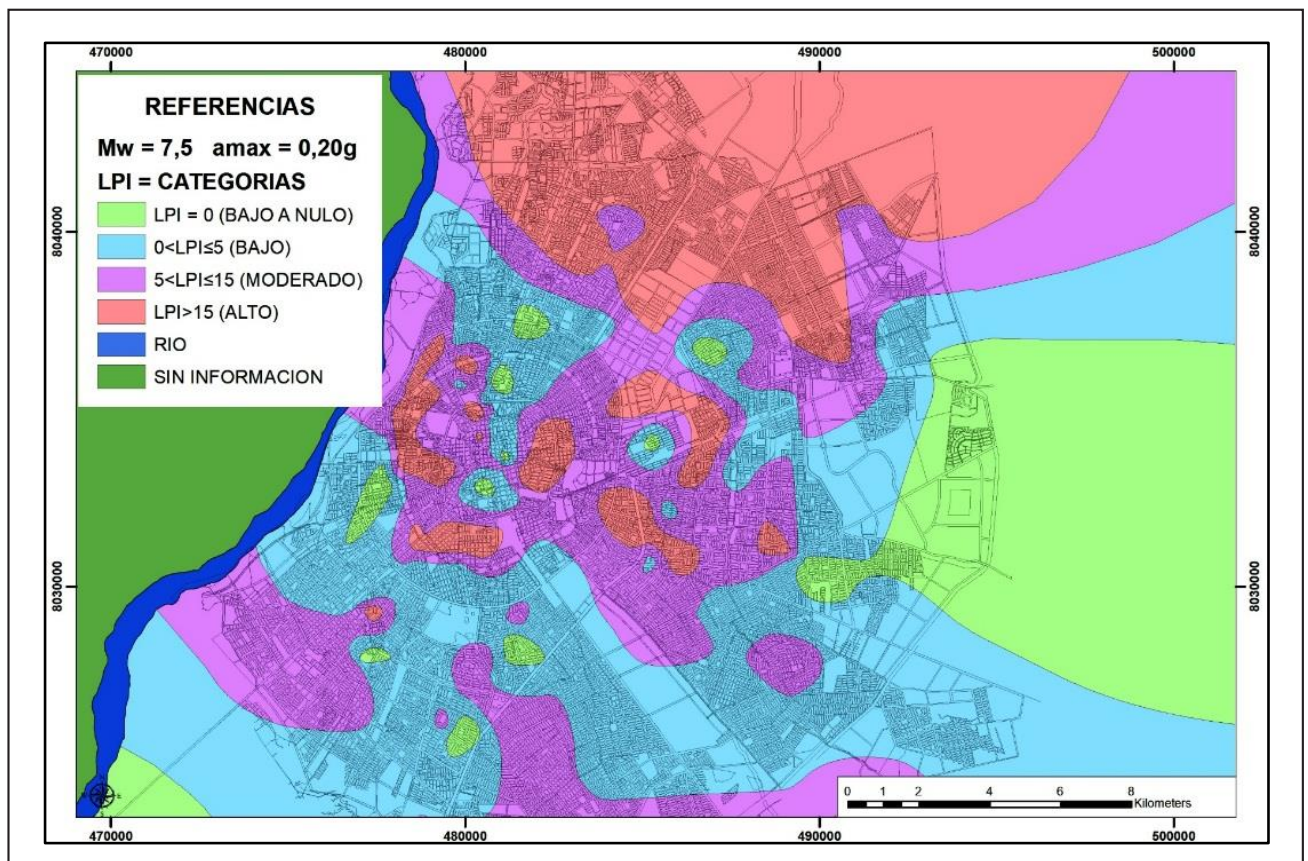


Figura 7. Mapa de Potencialidad de Licuefacción para $M_w= 7,5$ y $a_{max}= 0,2$.

ESTUDIO ESTADÍSTICO

Se ha realizado el estudio estadístico para cada una de las zonas geológico-geotécnicas en que dividiéramos la ciudad, considerando los sondeos presentes en cada una de ellas y también la evaluación total de los valores obtenidos en todos los puntos de sondeo.

En la Figura 8, se muestra la graficación típica de la frecuencia frente a LPI para $M_w=6$ y aceleraciones de $a_{max}=0,15$; $0,2$ y $0,3g$.

También se ejecutaron gráficos relacionando los valores porcentuales de LPI frente a M_w y diferentes a_{max} . Del gráfico como el de la Figura 9 (Típica) se extrae la dependencia directa de la licuefacción respecto a las aceleraciones.

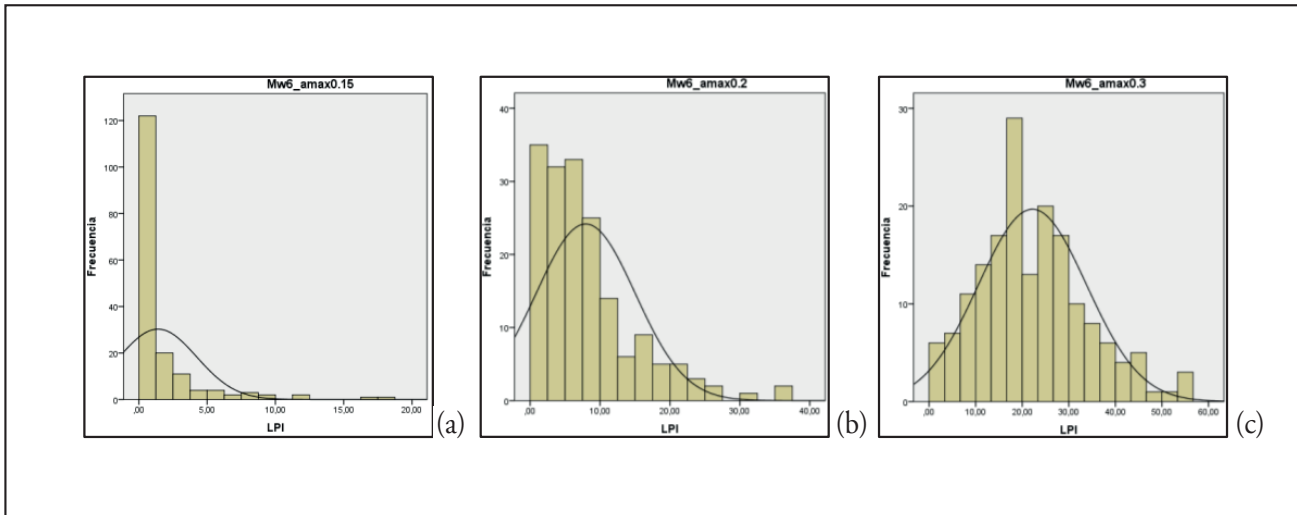


Figura 8. Gráfico de frecuencia de LPI con $M_w=6$.

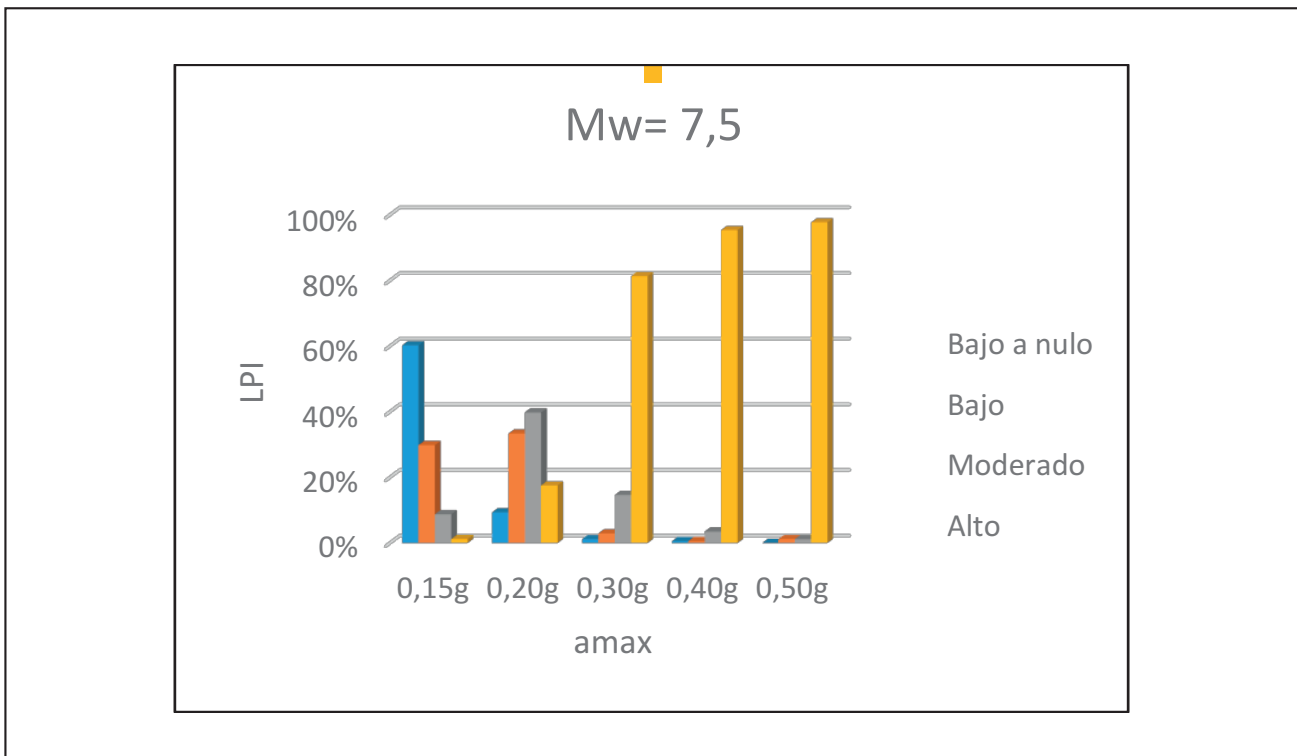


Figura 9. Gráfico de relación de LPI y a_{max} con $M_w=7,5$.

CONCLUSIONES

Realizados los trabajos correspondientes para la determinación de factores de seguridad a la licuefacción empleando el método simplificado con el empleo de SPT y la determinación del índice de licuefacción potencial para los 172 sitios de muestreo en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, se llegó a lo siguiente:

- Con las mínimas condiciones consideradas $M_w=6$ y $a_{max}=0,15$, se genera la licuefacción de 2% del área de la ciudad.
- Para la máxima condición $M_w=8,5$ y $a_{max}=0,5$ g se generaría la licuefacción del 95% del área.
- El Índice de Licuefacción Potencial (LPI) con los mínimos valores estudiados $M_w=6$ y $a_{max}=0,15$ el área, presenta un 18% categorizado como BAJO.
- Para todos los M_w considerados a una aceleración $a_{max}=0,3$, más del 50% del área presenta un potencial de licuefacción ALTO.

- El máximo extremo determinado se presenta a $M_w=7,5$ y $a_{max}=0,5$ con 98% del área de Santa Cruz de la Sierra presenta un potencial de licuefacción ALTO.

- De acuerdo con los valores obtenidos se determina que los suelos de Santa Cruz de la Sierra son potencialmente licuables.
- Se han elaborado 15 mapas de susceptibilidad de licuefacción potencial de los suelos de la ciudad en base a los valores de LPI, que muestran la potencialidad de licuefacción en la mancha citadina diferenciando regiones categorizadas como nulo, bajo y alto potencial de licuefacción.
- La aplicación de la zonificación determinada en este trabajo debe ser refrendada con la ejecución del correspondiente estudio de probabilidad de ocurrencia, que sería realizado en base a la combinación de magnitudes de momento sísmico (M_w) con relación a las aceleraciones (a_{max}) que se consideraron en los cálculos ejecutados.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BROOKS, B. A., BEVIS, M., WHIPPLE, K., ARROWSMITH, J. R., FOSTER, J., ZAPATA, T., KENDRICK, E., MINAYA, E., ECHALAR, A., BLANCO, M., EUILLADES, P., SANDOVAL, M., SMALLEY, R. J., (2011).
Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc.
Journey of Nature Geoscience. Doi: 10.1038/NGEO1143.
- BOULANGER, R. W., & IDRIS, I. M. (2008).
Soil liquefaction during earthquakes.
Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI). Doi: ISBN#978-1-932884-36-4.
- BOULANGER, R. W., AND IDRIS, I. M. (2012A).
Probabilistic SPT-based liquefaction triggering.
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 138(10), 1185-1195.
- BOULANGER, R. W., & IDRIS, I. M. (2014).
CPT and SPT based liquefaction triggering procedures.
University of California, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, CA.
- BOULANGER R. W. (2003A).
Relating K_s to relative state parameter index.
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(8), 770-773.
- IRIONDO, M. 2008
El Chaco santafesino. Neógeno y Geomorfología.
Comunicación Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, 13:1-39. Santa Fe.
- IWASAKI, T., TOKIDA, K., TATSUKO, F., & YASUDA, S. (1978).
A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan.
En Proceeding of 2nd International Conference on Microzonation (págs. 885-896). San Francisco.
- IWASAKI, T., TOKIDA, K., TATSUKO, F., WATANABE, S., YASUDA, S., & SATO, H. (1982).
Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods.
En Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation. Seattle: 1319-1330.
- LUNA, R., & FROST, J. D. (1998).
Spatial Liquefaction analysis system.
Journal of Computing in Civil Engineering, 12(1), 48-56. Doi: 10.1061/(asce)0887-3801(1998)12:1(48)
- RYAN ANDERSON ET AL. (2017).
Shortening and Structural architecture of the Andean fold-thrust belt of southern Bolivia (210 s).
Implications of kinematic development and crustal thickening of central Andes. Geoscience World.
- SEED, H. B., & IDRIS, I. M. (1971).
Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential.
Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97, 1249-1273.

- SEED Y IDRIS, (1982): SEED, H. B., & IDRIS, I. M. (1982).
Ground motions and Soil Liquefaction during earthquakes.
Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Institute.
- SEED, H. B., TOKIMATSU, K., HARDER, L.F., & CHUNG, R. M. (1985).
Influence of SPT procedures in soil Liquefaction resistance evaluations.
Journal of Geotechnical Engineering, 111 (12), 1425-1445. *Doi:10.1061/(asce)0733-9410(1985)111:12(1425).*
- YOUNG, T. L. & IDRIS, I. M. (4 DE 2001).
Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops
on evaluation of Liquefaction resistance of soils.
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 127 (4), 297-313- *doi:10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:4(297).*
- WEISS, J. R., BROOKS, B. A., FOSTER, J.A., BEVIS, M., ECHALAR, A., CACCAMISA, S., HECK, J., KENDRICK, E., AHLGREN,
K., RALEIGH, D., SMALLEY, R., VARGANI, G., (2016)
Isolating active orogenic wedge deformation in the southern Subandes of Bolivia.
Journal of Geophysical Research: Solid Earth. *Doi: 10.1002/2016JB013145.*