

Evaluación de potenciales manifestaciones superficiales de licuación a través de índices de severidad a partir de información de CPTu aplicada a Jacó, Puntarenas, Costa Rica

Evaluation of potential surficial manifestations of liquefaction through severity indices from CPTu data applied to Jacó, Puntarenas, Costa Rica

Diego Alberto Cordero Carballo

CMG, ingeniero geotécnico, Costa Rica, diegocordero@cmg.cr

Gonzalo Montalva Alvarado

Universidad de Concepción, Profesor, Chile

RESUMEN: Se evaluaron posibles manifestaciones superficiales de licuefacción a través de índices de severidad, a escala regional, para la ciudad de Jacó, Puntarenas, Costa Rica, utilizando información generada por 15 ensayos CPTu, estimando de manera determinista la demanda sísmica para 24 escenarios, para aceleraciones esperadas a partir de ecuaciones de predicción del movimiento del terreno para Centroamérica, considerando terremotos corticales y de subducción, tanto intraplaca como interplaca. Los resultados permiten identificar tres áreas donde se esperarían diferentes niveles de daño, dependiendo de la peligrosidad sísmica representada en los análisis mediante la magnitud de un sismo y las aceleraciones que podría producir, y priorizar aquellas a investigar en mayor detalle para el desarrollo de proyectos privados, infraestructura pública y la ubicación de edificaciones esenciales. La utilidad de los resultados, presentados como mapas de severidad de licuación, se basa en orientar a las autoridades municipales y de gestión de riesgos a anticipar la respuesta ante la ocurrencia de un escenario de análisis u otro con condiciones intermedias, conociendo de antemano la distribución de los sitios donde el daño podría ser mayor para guiar la respuesta inmediata y los esfuerzos de recuperación. Se espera que los resultados de este estudio, si bien preliminares, sirvan como insumo para la gestión del riesgo asociado a la licuación a través de medidas de ingeniería y de otro tipo, para efectos del ordenamiento territorial y para el desarrollo de políticas públicas para el distrito de Jacó, como podría ser un plan regulador.

PALABRAS CLAVE: CPTu, Jacó, licuación, índices de severidad, manifestaciones superficiales.

ABSTRACT: Possible surface manifestations of liquefaction were evaluated by means of severity indices, at a regional scale for the city of Jacó, Puntarenas, Costa Rica, using information generated by 15 CPTu, estimating the seismic demand in a deterministic manner for 24 scenarios, for expected accelerations from ground motion prediction equations for Central America, considering crustal and subduction earthquakes, both intraplate and interplate. The results allow the identification of three areas where different levels of damage would be expected, depending on the seismic hazard represented in the analyzes by means of the magnitude of an earthquake and the accelerations that it could produce, and prioritize those to be investigated in greater detail for the development of private projects, public infrastructure and the location of essential buildings. The usefulness of the results, presented as maps of predicted liquefaction severity, is based on guiding municipal and risk management authorities to anticipate the response to the occurrence of an analysis scenario or another with intermediate conditions, knowing in advance the distribution of the sites where the damage could be greater in order to guide the immediate response and recovery efforts. It is expected that the results of this project, although preliminary, will serve as input for the management of the risk associated with liquefaction through engineering and other measures, for purposes of land use planning and for the development of public policies for the district of Jacó, as could be a regulatory plan.

KEYWORDS: CPTu, Jacó, liquefaction, severity indices, surficial manifestations.

1 INTRODUCCIÓN

Según el Código de Cimentaciones de Costa Rica (CCCR) (Asociación Costarricense de Geotecnia 2009), la alta sismicidad del país hace necesario definir zonas con suelos susceptibles a licuación, para lo cual presenta siete mapas de tipos de suelos que cubren todo el territorio nacional, donde se destacan zonas con suelos aluviales, aluviales en zonas húmedas, arenosos, aluviales pantanosos y aluviales saturados,

todos susceptibles a licuación. Algunos lugares ubicados en estas zonas han presentado evidencia de licuación luego de sismos importantes, como el de Cóbano (25/03/1990, Mw 7,3), el de Limón (22/4/1991, Mw 7,7), el de Puerto Armuelles (25/12/2003, Mw 6,6), el de Damas (20/11/2004, Mw 6,2), y el de Sámara (5/9/2012, Mw 7,6) (Asociación Costarricense de Geotecnia 2009, Red Sismológica Nacional 2021). Entre las zonas ubicadas en sitios con suelos susceptibles a licuación, particularmente suelos aluviales, se destaca la que comprende a

la ciudad de Jacó.

Si bien existen métodos para estimar el desencadenamiento de la licuación y pronosticar si el suelo a cierta profundidad licuará o no, estos tienen la limitante que no predicen la severidad de la manifestación de la licuación en la superficie, que se puede correlacionar más directamente con el daño potencial a nivel superficial y la respuesta acumulada del depósito de suelo. Este análisis sí se puede realizar por medio de índices de severidad, como son el índice de potencial de licuación (LPI) y el número de severidad de licuación (LSN). La metodología para estimar estos parámetros se explica por The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2016). Valores de LPI mayores a 15 consideran que los sitios podrían sufrir efectos severos por licuación, menores a 5 que podrían sufrir efectos secundarios, y entre 5 y 15 efectos intermedios. Valores de LSN menores a 20 consideran que se puede esperar poca o nula manifestación superficial de licuación, mayores a 40 manifestaciones importantes, y entre 20 y 40 manifestaciones de moderadas a severas.

Aunque se realiza un análisis determinista, la utilidad de los resultados se basa en orientar a autoridades municipales y de emergencia a anticipar la respuesta ante la ocurrencia de un escenario de análisis u otro con condiciones intermedias, en conocer anticipadamente la distribución de los sitios donde el daño podría ser mayor para orientar los esfuerzos en cuanto a respuesta inmediata y recuperación luego de llegar a suceder un evento como los analizados. De igual manera, se espera que sirva de base inicial para futuros proyectos a escala regional para distintas zonas de Costa Rica susceptibles a licuación, y que los resultados particulares de este proyecto, si bien preliminares, sirvan como insumo para la gestión del riesgo asociado a licuación por medio de medidas ingenieriles y de otra naturaleza para efectos de ordenamiento territorial y para el desarrollo de políticas públicas para el distrito de Jacó, como podría ser un plan regulador.

2 CASO DE ESTUDIO

2.1 Ubicación geográfica de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde al distrito de Jacó, cantón de Garabito, provincia de Puntarenas, con una población cercana a las 18000 personas (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos 2021). De acuerdo con Gómez et al. (2019) la zona en estudio se ubica dentro de la cuenca Jacó, la cual tiene una extensión de 47 km², y consiste en tres micro cuencas correspondientes a los ríos Pueblo Nuevo (Mona), Copey y Naranjal. Un acuífero se ubica en la parte baja y media de estas micro cuencas, asentado en depósitos no consolidados, con una extensión aproximada de 15 km².

2.2 Amenazas geológicas de la zona de estudio

De acuerdo con la Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias de Costa Rica (2021), el cantón de Garabito se localiza en una región sísmica caracterizada por el choque de las placas Cocos y Caribe. Estos eventos suelen tener magnitudes altas, a profundidades mayores a los 20 km, con epicentros alejados de los centros de población. Hay registros

históricos de sismos de importancia frente a las costas del Pacífico costarricense, que han causado daños de relevancia en el cantón. Según la Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias de Costa Rica (2021), entre los efectos geológicos más importantes de un sismo cerca del cantón de Garabito están la amplificación de ondas sísmicas y la licuación del terreno, estando ubicada la ciudad de Jacó en terrenos susceptibles a presentar ambos fenómenos.

2.3 Susceptibilidad a licuación de la zona de Jacó

En Costa Rica, se destacan como potencialmente licuables las zonas aluviales costeras y las llanuras de inundación de los ríos más importantes. El propio CCCR (Asociación Costarricense de Geotecnia 2009), presenta una zonificación de los tipos de suelos de Costa Rica, entre los que se destacan los suelos aluviales, los suelos aluviales en zonas húmedas, los suelos arenosos, los suelos aluviales pantanosos y los suelos aluviales saturados como susceptibles a sufrir licuación.

En el mapa de tipos de suelos de la Hoja Quepos del CCCR se destaca la ubicación de la ciudad de Jacó en suelos que se clasifican como suelos aluviales. La zona de análisis, resaltada en color naranja en la Fig. 1, cuenta con un área aproximada de 11,3 km².

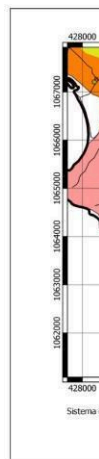


Fig. 1. Mapa de tipos de suelos para zona de Jacó. Adaptado de la Asociación Costarricense de Geotecnia (2009).

En la figura 1 Am hace referencia a suelos residuales de color amarillento, Lat a suelos lateríticos y Lic a suelos licuables.

2.4 Aspectos geológicos de la zona de estudio

Los suelos aluviales identificados en el CCCR corresponden con una unidad lito estratigráfica asociada a depósitos no consolidados (Gómez et al., 2019). Según Gómez et al. (2019) todos los depósitos recientes asociados a depósitos por gravedad al pie de las montañas o coluvios y todos los relacionados a procesos aluviales pertenecen a esta unidad. También, los depósitos de materiales arenosos con influencia marina son incluidos en esta unidad (Gómez et al., 2019). Los depósitos asociados a material arrastrado por la acción fluvial o de la



gravidad son generalmente fragmentos de rocas de diversos tamaños y de composición inmersa en una matriz limo- arcilla arenosa. Hacia el pie de las montañas, los bloques de fragmentos son de mayor tamaño y sub redondeadas o redondeadas, mientras que hacia la parte baja de la cuenca, donde se ubica la zona de estudio, los fragmentos son más pequeños, dado que han sido arrastrados una mayor distancia, como evidencia de su menor grado de angulosidad.

2.5 Agua subterránea de la zona de estudio

De acuerdo con Gómez et al. (2019) el nivel de agua subterránea en la zona de estudio se ubica entre los 1 y 5 m de profundidad. Dicha conclusión concuerda con las mediciones tomadas en los sondeos CPTu realizados, con unas variaciones entre los 0,30 y 6,00 m en los sondeos donde se midió el nivel freático. Estos sondeos se realizaron entre los meses de junio y agosto de 2021, que corresponden con la época lluviosa de la zona que va de mayo a noviembre (Gómez et al. 2019).

2.6 Zonificación sísmo genética de la zona de estudio

Climent et al. (2008) presenta una zonificación sísmo genética para Costa Rica, tomando en consideración criterios como patrones de fallamiento, mecanismos de ruptura, tamaño de las zonas de ruptura de terremotos pasados, entre otros, dando como resultados zonas sísmicas delimitadas geométricamente en tres dimensiones y regidas por el mismo proceso de producción de sismos.

Para la zonificación para fallas corticales o superficiales, con profundidades de ruptura entre 0 y 25 km, se puede ubicar la zona de estudio en la zona sísmica Antearco Pacífico Central (Climent et al. 2008) Por la extensión de las fallas enmarcadas en esta zona, se podría esperar un evento máximo de magnitud 7,1 Mw.

De acuerdo con Denyer et al. (2009) la zona de estudio es atravesada por una falla inferida o probable del Terciario y/o Cretácico, y cerca pasan dos fallas del Cuaternario, La Falla Tárcoles y la Falla Herradura. La Falla Herradura tiene una longitud de 7 km y con movimiento vertical. Tiene un potencial de generar sismos de magnitud 5,6 Mw con aceleraciones de 0,20g y una intensidad máxima VIII en la zona epicentral (Laboratorio de Ingeniería Sísmica 2021) La Falla Tárcoles, por su parte, tiene una longitud de 55 km y es de tipo inversa con una componente transcurrente. Tiene un potencial de producir sismos de magnitud 7,0 Mw con aceleraciones de 0,5 g a 0,6 g a lo largo de la zona de ruptura, con intensidades entre VIII y IX en Jacó (Laboratorio de Ingeniería Sísmica 2021). Históricamente, para la ciudad de Jacó se han registrado sismos importantes. Climent et al. (2008) destacan un sismo asociado a la Falla Tárcoles ocurrido en 1924 de Mw 7,0 que alcanzó intensidades máximas de X.

Para ambas fallas, como para el resto de fallas activas en Costa Rica, el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica ha planteado escenarios simulados de eventos máximos posibles de acuerdo a la longitud de cada falla, para un sismo con una profundidad de 10 km. Para el caso de la Falla Tárcoles, para un sismo de magnitud Mw 7,0 con una profundidad de 10 km, se podrían esperar en la zona de

estudio aceleraciones cercanas a los 0,20g; mientras que, para la Falla Herradura, para un sismo de magnitud Mw 5,6 con una profundidad de 10 km, se podrían esperar en la zona de estudio aceleraciones cercanas a los 0,20g (Laboratorio de Ingeniería Sísmica 2021).

Climent et al. (2008) define dos fuentes sísmicas asociadas con el proceso de subducción de la placa Caribe sobre la Cocos. Estas fuentes se definen de acuerdo con el mecanismo de producción de sismos y la profundidad de las mismas, dando como resultados una zona sísmica de subducción interplaca, con generación de sismos entre los 25 y 60 km de profundidad, y otra zona intraplaca con generación de sismos con profundidades mayores a 60 km.

El área en estudio se ubica según Climent et al. (2008) en la zona sísmica interplaca Quepos, la cual podría generar sismos máximos de 7,2 Mw. Respecto a la zonificación intraplaca, el área en estudio se ubica en la zona sísmica intraplaca Central, la cual podría generar eventos máximos del orden de 7,5 Mw.

2.6 Topografía de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde con llanuras aluviales de topografía relativamente plana, correspondientes a zona de deposición de baja energía, rodeada por montañas con elevaciones aproximadas a los 120 m sobre el nivel del mar (msnm) al oeste, 250 msnm al este y 500 msnm al norte. La propia zona de análisis se ubica entre los 60 msnm, aproximadamente, y cero msnm (zona de playa).

2.6 Sondeos CPTu

Se realizaron quince sondeos CPTu en total con una profundidad máxima de investigación correspondiente a la de rechazo del cono, variando de los 3,99 m hasta los 23,94 m de profundidad. Para la ejecución de los sondeos, se utilizó un sistema con medición de poro en la posición u2. Para la interpretación de los datos, se aplicó un filtro de correlación cruzada entre la resistencia del cono, qc, y la resistencia por fricción, fs, para compensar el desfase entre las profundidades en las que se miden ambos parámetros.

2.6 Descripción geotécnica de la zona de estudio

Se puede indicar, de manera general, que a nivel superficial se identificaron arenas, arenas limosas y limos arenosos de densidad relativa suelta a media, subyacidas por arenas de compacidad, variando entre suelta y densa, con intercalaciones de arcillas y arcillas limosas a diferentes profundidades del perfil según la ubicación de los sondeos, de consistencia variante entre suave y dura.

2.7 Método de análisis, magnitud de sismos, aceleraciones máximas y escenario de análisis

Para la determinación del desencadenamiento de la licuación, se hizo uso del método de Boulanger y Idriss (2014). La escogencia de este método sobre otros se hizo en función a que este considera de una manera más precisa la forma de la curva de resistencia a licuación, que depende del tipo de suelo y su densidad, como se ha observado en ensayos de laboratorio

(Ishihara y Yoshimine 1992).

Para la determinación de las magnitudes de sismos a considerar en los análisis, se tomó de referencia la zonificación sísmica genética realizada por Climent et al. (2008) para Costa Rica, que separa las fuentes en relacionadas con el proceso de subducción, tanto interplaca como intraplaca, así como en relacionadas con sistemas de fallas corticales.

Sobre los sismos por subducción, Climent et al. (2008) identifica dos zonas sísmicas, una de subducción interplaca y otra intraplaca. El área en estudio se ubica en la zona sísmica interplaca Quepos con sismos máximos esperables de hasta 7,2 Mw. Por su parte, el área en estudio se ubica en la zona sísmica interplaca Central, la cual podría producir sismos máximos cercanos a 7,5 Mw.

Sobre los sismos corticales, la zona del proyecto se ubica en la zona sísmica Antearco Pacífico Central con un potencial de producir un sismo máximo de magnitud 7,1 Mw (Climent et al. 2008) El Laboratorio de Ingeniería Sísmica identifica dos fallas activas en la zona de estudio, la Herradura y la Tárcoles, descritas en el apartado anteriormente, las cuales muestran un potencial de producir sismos máximos de una magnitud congruente con la propuesta por Climent et al. (2008) para sismos corticales en la Zona Pacífico Central, de magnitud 5,6 Mw y 7,0 Mw, respectivamente, para la ruptura total de la falla a una profundidad de 10 km.

Para la determinación de las aceleraciones máximas a considerar en los análisis, se hizo uso de las ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para sismos corticales y de subducción propuestas por Schmidt (2014) para América Central. Se analizan escenarios considerando aceleraciones iguales a la media y a la media más una desviación estándar para cada caso, junto a las variaciones máximas del nivel freático, que se estiman para la zona por Gómez et al. (2019).

3 RESULTADOS

Se presenta un análisis de los resultados para el escenario considerado como crítico (escenario 5 de los 24 analizados), el cual supone el nivel freático a 1 m de profundidad y un sismo por subducción interplaca de magnitud 7,2 Mw a una distancia hipocentral de 25 km, produciendo una aceleración media en la zona de estudio de 0,80 g.

Si bien el CCCR define la zona de la ciudad de Jacó como susceptible a licuación, pudiéndose en un principio suponer que el potencial de licuación y sus posibles consecuencias pudieran ser las mismas para toda el área, los análisis realizados permiten determinar que no es así. Los suelos con mayor potencial de licuación, asociados a valores de LPI altos, se concentran en una zona que corresponde a los suelos no consolidados atravesados por el Río Copey y la Quebrada Doña María, cuerpos de agua que corren a través de los barrios Copey, Camboya, Santa Lucía y Los Frijoles, asociados a los sondeos C-3, C-4, C-5, C-6, C-14, C-9 y C-7 y en los cuales se podría esperar licuación severa según los valores de LPI estimados. Precisamente, en esta zona, se ubican algunos centros de enseñanza primaria y secundaria, entre otra infraestructura primordial, los cuales se verían expuestos, en mayor grado, a potenciales daños producto de licuación de suelos, en caso de que utilicen sistemas de

suelo- cimentación superficiales.

Existe otra zona correspondiente a barrios Pochotal y Los Cholos, donde los resultados de LPI obtenidos permiten concluir que el potencial de licuación es bajo. En esta zona, se ubica el centro de salud de la ciudad de Jacó y la estación local de Cruz Roja, organismo de primera respuesta ante una eventual emergencia. Entre ambas zonas, donde se ubican los barrios La Amistad y El Invu, según los valores de LPI estimados, se esperarían condiciones intermedias. En el barrio La Amistad, se ubica la estación de bomberos de la ciudad de Jacó, igualmente institución de primera respuesta ante una eventual emergencia. La Fig. 2 muestra la distribución de los valores de LPI obtenidos en la zona de estudio, siendo la zona azul la que presenta menores valores de LPI y las rojas los mayores, las verdes corresponden a zonas intermedias.

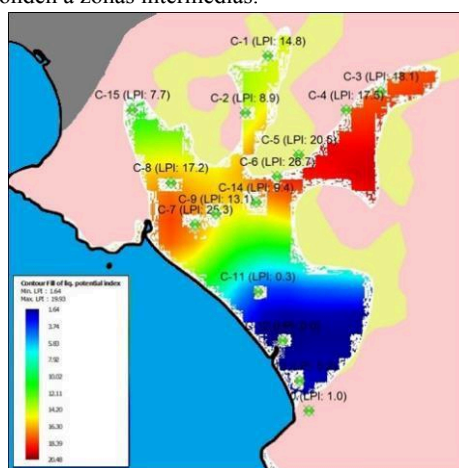


Fig. 2. Mapa de LPI para escenario 5 (aceleración media).

La Fig. 3 muestra un gráfico con los valores de LPI asociado a cada sondeo para el escenario de análisis 5.

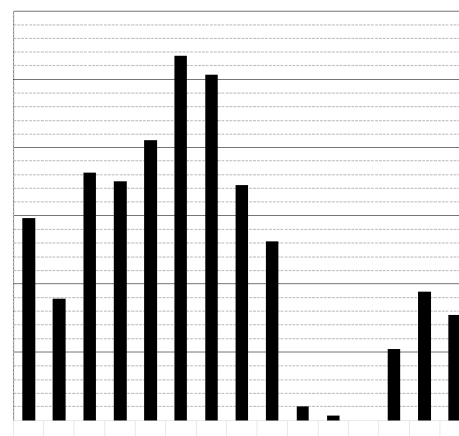


Fig. 3. Gráfico de LPI para escenario 5 (aceleración media).

La Fig. 4 muestra, por su parte, un gráfico con la variación de los valores de LSN para el escenario de análisis 5.

De acuerdo con los niveles de desempeño que define la New Zealand Geotechnical Society (2016), para la zona de terreno que abarca los sondeos C-3, C-4, C-5, C-6, C-14, C-9 y C-7, con valores de LPI entre 9,4 y 26,7 y valores de LSN entre 12 y 42, sería de esperar que se presenten daños moderados a severos, que podrían verse representados superficialmente por asentamientos desde los 10 cm a más de 20 cm. Esta categorización corresponde con la estimación de asentamientos realizados para los mismos sondeos, que va desde los 5 a 17 cm, según se muestra en la Fig. 5.

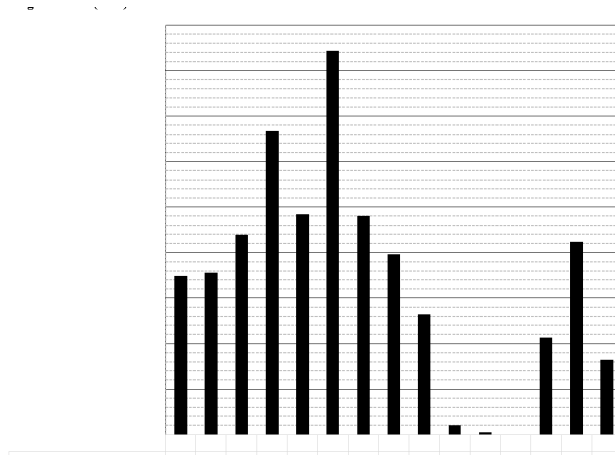


Fig. 4. Gráfico de LSN para escenario 5 (aceleración media).

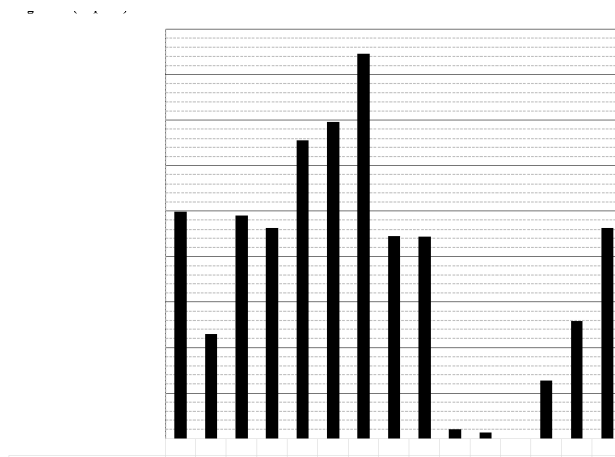


Fig. 5. Gráfico de asentamientos para escenario 5 (aceleración media).

Para la zona que abarca los sondeos C-10, C-13, C-12 y C-11, los valores de LPI y LSN permiten concluir que en este caso se esperarían daños leves o insignificantes, asociados a deformaciones despreciables del terreno y pequeños asentamientos. Esta misma condición se refleja en la estimación de asentamientos realizada, pues, para los sondeos C-10, C-11 y C-12, los asentamientos estimados están por debajo de los 0,5 cm y, para el sondeo C-13, se estimaron en 2,5 cm,

aproximadamente.

Por último, para la zona identificada como de potencial de daño intermedio, correspondiente a los sondeos C-1, C-2, C-8 y C-15, los valores estimados de LPI y LSN permiten determinar que para la zona de los sondeos C-1, C-2 y C-8 se podrían esperar daños altos, asociados a asentamientos en el rango de los 10 a 20 cm, mientras que, para la zona del sondeo C-15, se esperarían daños moderados. A partir de la estimación de los valores de asentamientos, los resultados del sondeo C-2 corresponden a un nivel de desempeño moderado, mientras que los sondeos C-1, C-8 y C-15 están asociados a un nivel de daño alto, con valores estimados de asentamientos entre 9 y 10 cm. Para el sondeo C-2, los asentamientos estimados son de casi 5 cm.

A pesar de estas últimas observaciones, se tiene que para la descripción que hace la New Zealand Geotechnical Society (2016) sobre los niveles de desempeño esperado y para los valores de asentamientos estimados, existe una buena correlación entre estos resultados y podría usarse esta clasificación como base para una escala adaptada a las condiciones propias de la ciudad de Jacó, ajustando las consecuencias esperadas, en cuanto a asentamientos superficiales, a la escala de valores de LPI y LSN que hace esta institución.

Otro factor importante a evaluar ante los resultados obtenidos es el efecto del nivel freático. Esto permite también anticipar la variación en el potencial de licuación y posibles daños en superficie ante la ocurrencia de un sismo en época seca o en época lluviosa, y definir planes de respuesta en caso de que un sismo con características similares a las analizadas suceda con nivel freático somero o a mayor profundidad.

Se presenta en la Fig. 6 el mapa de LPI y en las Fig. 7 y 8 gráficos con los resultados LPI y LSN considerando el nivel freático, a 5 m de profundidad, considerando un sismo de 7,2 Mw y una aceleración de 0,80g, correspondiente con el escenario 7 de los 24 analizados.

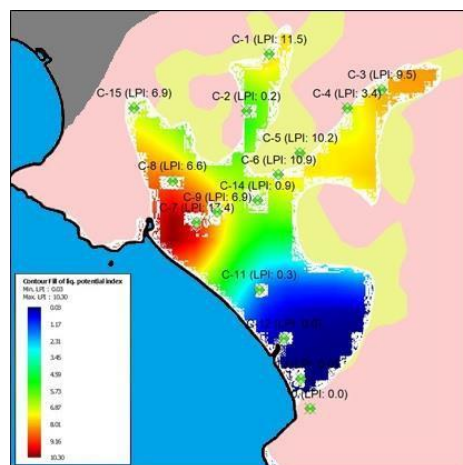


Fig. 6. Mapa de LPI para escenario 7 (aceleración media).

Se observa que la zona identificada como de bajo potencial mantiene su comportamiento, mientras que la zona donde se

esperaría mayor daño migra ahora hacia la zona del sondeo C-7, manteniendo, no obstante, un nivel de daño esperado alto. Sin embargo, para el resto de sondeos, el potencial daño esperado baja a leve (sondeo C-14) y a moderado.

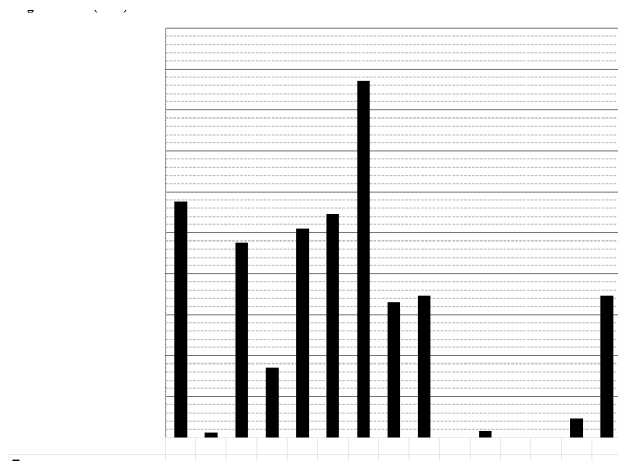


Fig. 7. Gráfico de LPI para escenario 7 (aceleración media).

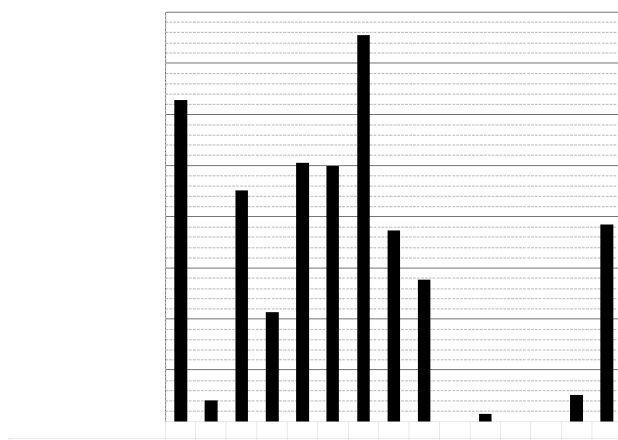


Fig. 8. Gráfico de LSN para escenario 7 (aceleración media).

Por tanto, la ocurrencia del sismo de análisis con niveles freáticos altos o bajos tiene implicancia en los potenciales daños que pudieran ocurrir y en las zonas donde sería esperable potenciales manifestaciones de licuación.

Se analizan ahora las condiciones estratigráficas del terreno y la interacción entre capas correspondientes a los resultados obtenidos. En cuanto a la zona de bajo potencial de licuación, correspondiente a los sondeos C-10, C-11 y C-12, se identificaron suelos con comportamiento mecánico asociado a arcillas y arcillas limosas, suelos poco susceptibles a sufrir movilidad cíclica. Estos sondeos corresponden a la zona que atraviesan las quebradas Lisa y Seca para las cuales sería recomendable una mayor investigación con sondeos CPTu y otros métodos que permitan obtener muestras para envío a laboratorio para confirmar las características de los suelos

ensayados, revisar los resultados obtenidos en esta investigación y modificar el mapa de suelos susceptible a licuación, según corresponda.

Referente a la zona con alto potencial de licuación, para los sondeos ubicados en esta zona, se tiene de forma general una distribución en básicamente toda la profundidad de los sondeos de capas potencialmente licuables, que varían en espesor, pero distribuidas a lo largo de todo el sondeo. También, se observó la presencia de un estrato de espesor importante a profundidad potencialmente licuable, pero con capas superficiales, si bien de poco espesor, pero igualmente licuables. Para la primera condición, este comportamiento hace que la tendencia en los resultados de LPI y LSN sea similar, en cuanto a que se tiene una distribución en el perfil del terreno de muchas capas potencialmente licuables con una acumulación en todo el perfil de deformaciones volumétricas. Mientras que, para el segundo caso, se tiene una concentración en el perfil de capas potencialmente licuables con las deformaciones volumétricas concentradas en dichas capas, donde la acumulación de los asentamientos esperados se da en profundidad, lo cual podría mitigar las potenciales manifestaciones en superficie de la licuación.

Para el caso de las zonas con potencial intermedio, básicamente se tiene el segundo caso antes mencionado, donde las capas potencialmente licuables de suelo son de espesor importante pero concentradas en profundidad en el terreno o pocas y muy delgadas, pero ubicadas en superficie, según se muestra en la Fig. 9.

Fig. 9. Variación en la distribución de capas potencialmente licuables de acuerdo con estratigrafía identificada a partir de sondeos C-3 y C-9.



3 CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten concluir que:

La zona analizada, categorizada como de suelos susceptibles a licuación, presenta una zona definida donde el potencial de licuación es muy bajo, con suelos con comportamiento mecánico asociados a arcillas y arcillas limosas. El resto de la zona muestra un comportamiento diferenciado, con zonas donde el potencial es mayor que en otras.

Esta variación en el potencial de licuación se puede asociar a virtuales daños y manifestaciones superficiales diferenciados por zona, según la amenaza sísmica representada en los análisis por medio de la magnitud de un sismo y las aceleraciones que este podría producir.

La identificación de zonas con mayor potencial de evidencia superficial de licuación, retratado así por medio de índices de severidad de licuación, permite priorizar las zonas a investigar con mayor detalle para el desarrollo de proyectos privados, de infraestructura pública y la ubicación de edificaciones primordiales como pudieran ser escuelas, gimnasios, clínicas, estaciones de bomberos, entre otros. Estas consideraciones deberían tomarse en cuenta para un plan regulador, aprovechando que hay zonas donde hay poca o nula infraestructura construida.

Se hace evidente la necesidad de realizar una investigación con un mayor alcance para la valoración del potencial de licuación y las posibles consecuencias (riesgo) sobre la infraestructura ya construida y su posible afectación en caso de presentarse un sismo con características similares a los analizados en este estudio. Esta valoración debería hacerse de forma independiente para la infraestructura que se evalúe, es decir, un análisis para líneas vitales, por ejemplo, otro para infraestructura habitacional o edificios de corta altura, otra para edificios de mayor altura, etc., tomando en consideración para estos últimos casos el sistema estructural, el material de construcción, el estado de la construcción, etc.

La ocurrencia de un sismo, si bien se podría considerar que produciría aceleraciones similares en toda la zona de estudio, tendría efectos muy distintos en diferentes partes según lo evaluado.

Los resultados obtenidos por medio de índices sirven de insumo para la generación de mapas y para la toma de decisiones en zonas específicas donde se esperarían mayores daños superficiales por licuación de suelos.

El potencial de licuación de un sitio no imposibilita la construcción de infraestructura, pero sí es un indicativo que el diseño y construcción de las obras que se contemplen deben ser adaptadas técnicamente a las condiciones potenciales de licuación. Esto podría requerir de una exigencia mayor en el alcance y cantidad de investigación geotécnica para zonas con mayor potencial de licuación, así como mayores inversiones para estos proyectos en su adaptación a las condiciones identificadas. En el caso de estructuras, podría tratarse de cimentaciones profundas o sistemas de mejoramiento de suelos, los cuales, según su alcance, podrían representar una inversión importante para los proyectos que se planteen.

Se pueden caracterizar zonas particulares dentro del área analizada, donde las manifestaciones superficiales de licuación serían mayores respecto a otras zonas. Se recomienda

implementar zonas de observación en las cuales sería potencialmente evidente a nivel superficial la ocurrencia de licuación. Estas zonas se deberían estudiar en mayor detalle y podrían ser usadas de base para la calibración de rangos de daño esperado ante un eventual sismo que produzca evidencia superficial de licuación.

Las estructuras enterradas, como líneas vitales (e.g. acueductos, gaseoductos) son predominantemente afectadas por la deformación del suelo circundante. Es importante identificar las zonas críticas de este tipo de infraestructura y ubicarlas respecto a los mapas generados para tomar las acciones de reforzamiento necesarios para que no fallen en caso de emergencia, o bien construir sistemas con redundancia que no detengan su funcionamiento en caso de que se presente licuación en un grado tal que dañe partes de estos sistemas.

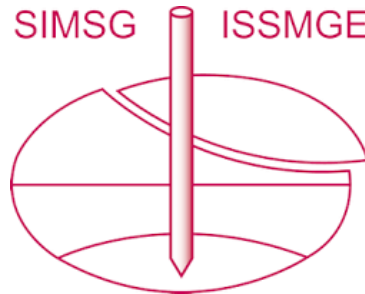
Los índices de severidad de licuación discutidos pueden proporcionar una indicación de la gravedad de un problema de asentamiento inducido por licuación, pero requerirán ajustarse a partir de casos de ocurrencia de licuación apegadas a las condiciones propias de la zona de estudio.

4 REFERENCIAS

- A. Climent, W. Rojas, G. Alvarado y B. Benito. 2008. *Proyecto Resis II Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- A. Gomez, H. Madrigal, C. Nuñez, H. Calderón y P. Jiménez. 2019. Vulnerabilidad hidrogeológica en la zona costera de Jacó, Pacífico Central, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, no. 63, pp. 141-163.
- Asociación Costarricense de Geotecnia. 2009. *Código de Cimentaciones de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica.
- B. Maurer, R. Green y O. Taylor. 2015. Moving towards an improved index of assessing liquefaction hazard: lessons from historical data. *Soils and foundations*, no. 55, pp. 778 - 787.
- Boulanger. y M. Idriss. 2014. *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. California, Estados Unidos.
- Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias de Costa Rica, “Mapa de amenazas naturales potenciales cantón Garabito (en línea)”. https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/puntarena_s.aspx (accesado en Ago. 22, 2021).
- F.Schnaid, H. Nierwinski y E. Odebrecht. 2020. Classification and State-Parameter Assessment of Granular Soils Using the Seismic Cone. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, no. 146(8), pp. 060200091-060200095.
- F.Schnaid y H.S. Yu. 2007. Interpretation of the seismic cone test in granular soils. *Géotechnique* 57, no. 3, pp. 265-272.
- G. Zhang, P. Robertson y R. Brachman. 2002. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, no. 39, pp.1168-1180.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, “Estadísticas demográficas 2011-2025 (en línea)”. <https://www.inec.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion> (accesado en Ago. 22, 2021).
- K. Ishihara. 1985. Stability of natural deposits during earthquakes. *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 321-376.
- K. Ishihara y M. Yoshimine. 1992. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soil and foundations*, no. 32, pp. 173-188.
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica, “Estación PJAC (en línea)”. <http://lis.ucr.ac.cr/1556> (accesado en Ago. 22, 2021).

- Laboratorio de Ingeniería Sísmica, “Falla Herradura (en línea)”.
<http://www.lis.ucr.ac.cr/845> (accesado en Ago. 22, 2021).
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica, “Falla Tárcoles (en línea)”.
<http://www.lis.ucr.ac.cr/302> (accesado en Ago. 22, 2021).
- Ministry of Business, Innovation & Employment. 2017. *Planning and engineering guidance for potentially liquefaction-prone land*. Wellington, Nueva Zelanda.
- New Zealand Geotechnical Society. 2016. *Earthquake geotechnical engineering practice Module 3: Identification, assessment and mitigation of liquefaction hazards*. Wellington, Nueva Zelanda.
- P. Denyer, W. Montero y G. Alvarado. 2009. *Atlas tectónico de Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- R. Bogantes, G. Laporte, y C. Quesada. 2002. Zonificación Geotécnica General de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos. *VIII Seminario Nacional de Geotecnia y III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas*, San José, Costa Rica.
- Red Sismológica Nacional, “Terremoto de Limón, 22 de abril de 1991 (en línea)”.<https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/26-sismologia/sismos-historicos/3235-terremoto-de-limon-22-de-abril-de-1991?Itemid=225>. (accesado en Ago. 22, 2021).
- S. van Ballegooy, P. Malan, M. Jacka, V. Lacrosse, J. Leeves y J. Lyth. 2012. Methods for characterizing effects of liquefaction in terms of damage severity. *15th World Conference on Earthquake Engineering* Lisboa, Portugal.
- S. van Ballegooy, R. Green, J. Lees, F. Wentz y B. Maurer. 2015. Assessment of various CPT based liquefaction severity index frameworks relative to the Ishihara (1985) H₁-H₂ boundary curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. 79.
- The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. 2015. *State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences*. Washington, DC., EEUU.
- T. Iwasaki, F. Tatsuoka, K. Tokida y S. Yasuda. 1978. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *Proceedings of the 2nd International Conference on Micro zonation*.
- V. Schmidt. 2014. Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010. *Revista Geológica de América Central*, no. 50.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.