

# Evaluación del Potencial de Licuefacción del Suelo a partir de Mediciones de Microtemblores: Un Estudio del Caso del Terremoto de Lagunas en 2019

## Evaluation of the Soil Liquefaction Potential based on Microtremor Measurements: A Case Study of The Lagunas Earthquake in 2019

Marko López

*Instituto de Investigación Científica, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad de Lima, Perú, mlopezb@ulima.edu.pe*

Joao Rengifo

*Carrera de Ingeniería Civil, Universidad de Lima, Perú*

Luis Vallejos

*Departamento de Postgrado de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú*

**ABSTRACT:** Las pruebas geofísicas para medir la velocidad de las ondas de corte se pueden realizar en áreas donde los equipos SPT no pueden penetrar debido a las condiciones geológicas. Estas pruebas son fáciles de ejecutar en lugares de difícil acceso y tienen costos menores, como el método de medición de matriz de microtemblores (MAM, por sus siglas en inglés), que se utiliza recientemente en estudios de licuefacción. Durante el terremoto de magnitud 8.0 ocurrido en Alto Amazonas, Loreto, Perú, el 26 de mayo de 2019, el centro poblado de Tamarate presentó volcanes de arena, lo cual es una representación superficial de la licuefacción a poca profundidad. El objetivo de la investigación es determinar el potencial de licuefacción basado en los resultados de los microtemblores. Para el análisis de datos de la relación espectral horizontal a vertical (H/V) se utiliza el software Geopsy. La comparación de los métodos considera su precisión y aplicabilidad en el contexto para evaluar el potencial de licuefacción del suelo, presentando los resultados en forma de perfiles de velocidad y propiedades geotécnicas. Finalmente, se identifican las ventajas del método y se ofrecen recomendaciones para la mitigación del peligro sísmico.

**ABSTRACT:** Geophysical tests to measure shear wave velocity can be performed in areas where SPT equipment cannot penetrate due to geological conditions, also, they are easy to implement and for places with difficult access the costs are lower. The Microtremor Array Measurement (MAM) method is recently used in sand liquefaction studies. In this work an exhaustive evaluation of the characterization of the subsoil is carried out, which is composed of liquefiable sand deposits in the Tamarate populated center located in the Peruvian Amazon, and that numerous sand boils remained, which is a superficial representation of the liquefaction at shallow depth during the MW 8.0 earthquake occurred in Alto Amazonas (Lagunas) in Loreto, Peru, on 26 May 2019. This research proposes liquefaction potential based on microtremor observation results. Geopsy software were used for data analysis for horizontal to vertical (H/V) spectral ratio analysis. The comparison of the methods considers their precision and applicability in the context to assess soil liquefaction potential, presenting the results in the form of velocity profiles and geotechnical properties. Finally, the advantages of the method are identified, offering recommendations to consider the mitigation of the seismic hazard.

**KEYWORDS:** Geophysical test, geopsy, liquefaction, microtremor.

### 1 INTRODUCCION

En el mundo existen desastres naturales capaces de comprometer la integridad de personas y edificaciones, la licuefacción del suelo después de un terremoto se destaca como un desafío significativo. La licuefacción del suelo es un proceso en el cual se produce una deformación excesiva del suelo, resultando en una pérdida de resistencia debido a perturbaciones transitorias. En la literatura se encuentra varios enfoques de la predicción de licuefacción, como el análisis numérico por elementos finitos o diferencias finitas, los métodos simplificados analíticos y métodos empíricos basados en

pruebas de campo, de laboratorio y estadísticas.

Los microtemblores es una alternativa para determinar la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) por medio del análisis de las ondas superficiales obtenidas del monitoreo de vibraciones ambientales. Esta medición es útil para investigar el suelo para la evaluación del peligro sísmico. Es uno de los métodos sísmicos pasivos más comunes utilizados en entornos urbanos por su bajo costo y eficiencia.

Esto es crucial para entender las propiedades geotécnicas y la respuesta sísmica del suelo logrando determinar la ocurrencia de licuefacción. Para ello, la elección de la curva de relación espectral H/V (*Horizontal-to-Vertical spectral ratio*) permite un

análisis preciso al analizar registros de vibraciones ambientales logrando identificar las frecuencias de resonancia del suelo y estimar la amplificación en diferentes frecuencias.

Las relaciones espectrales de microtremores horizontales a verticales (MHVR, *Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) son útiles para encontrar la frecuencia dominante de un sitio y, por lo tanto, son útiles para la caracterización y microzonificación del sitio, porque la medición de microtremores en una sola estación es mucho más fácil que la medición de los movimientos del suelo sísmicos y más fácil que cualquier otra medición de métodos de exploración con fuentes activas, como los estudios de reflexión y refracción. La cuestión más importante asociada con el uso de MHVR como método de exploración simple y fácil radica en su interpretación teórica Nakamura (1989).

A lo largo de las últimas dos décadas, se han experimentado notables avances en el refinamiento del enfoque de análisis MHVSR, esto incluye la determinación de la frecuencia máxima para espesores del suelo, así como la inversión de los resultados de MHVSR para obtener perfiles de velocidad de corte en función de la profundidad. El factor determinante radica en su practicidad y el requerimiento de equipos mínimos, lo que se traduce en costos reducidos.

Se ha probado en estudios internacionales, como en el Valle de Mexicali, demostrando la importancia de emplear diversas técnicas como microtremores en conjunto con otros ensayos como el SPT, además del uso de Geopsy (2023), software de código abierto que procesa vibraciones ambientales teniendo en cuenta la caracterización del sitio para la obtención de gráficas y valores necesarios para determinar los valores de  $V_s$  para cada profundidad proveniente de las señales de microtremores.

Seed e Idriss (1971) fueron los pioneros en la evaluación del potencial de licuefacción del suelo mediante su procedimiento simplificado que utiliza el número de golpes del ensayo SPT. Una alternativa prometedora es el uso de mediciones in campo de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). El uso de  $V_s$  como indicador de la resistencia a la licuefacción está bien fundamentado, ya que tanto  $V_s$  como la resistencia a la licuefacción están influenciadas de manera similar por muchos de los mismos factores.

Para evaluar el nivel de vulnerabilidad de los suelos, es fundamental considerar el perfil estratigráfico del subsuelo, que incluye el tipo de suelo y la ubicación del nivel freático. Además, se deben analizar las características de los estratos subterráneos, tales como la densidad, el contenido de finos y el diámetro promedio de las partículas, entre otros factores. Finalmente, es necesario definir los parámetros del sismo de diseño, como su magnitud y la aceleración máxima en la superficie del terreno (Bensoula et al., 2018).

El objetivo principal es estimar el potencial de licuefacción en el suelo de Tamarate en Lagunas ubicado en el departamento de Loreto en el noreste del Perú, utilizando ensayos de microtremor, utilizando Geopsy para el análisis espectral.

## 2 AREA DE ESTUDIO

### 2.1 Características geológicas

La Figura 1 muestra la ubicación del distrito de Lagunas, uno de los seis que conforman la provincia de Alto Amazonas, en el departamento de Loreto, en el noreste del Perú. Dentro de este distrito se encuentra el Centro Poblado de Tamarate, situado a 126 metros sobre el nivel del mar. La evaluación de los peligros geológicos ocasionados por el sismo de 2019 en los sectores de San Manuel, Nueva Corina, Tamarate, Nueva Esperanza,

Pucacuro y Lagunas está detallada en el informe técnico del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2019).

La litología del terreno, la elevada magnitud y la prolongada duración del sismo fueron factores desencadenantes de fenómenos sísmicos como volcanes de arena, agrietamientos y asentamientos en el terreno. Por ello, se considera que estos terrenos son altamente susceptibles a la licuefacción de suelos.

En los poblados de San Manuel, Nueva Corina, Tamarate, Nueva Esperanza y Pucacuro, se ha observado la expulsión de arena y agua del subsuelo, evidenciando la ocurrencia de licuefacción.

El mapa geológico, presentado en la Figura 2, muestra que las unidades estratigráficas en el área del cuadrante de Lagunas son predominantemente sedimentarias, con edades que abarcan el Plioceno y el Cuaternario. Se destacan los depósitos fluviales, aluviales, palustres (de edad holocénica) y Ucamara (del Pleistoceno).

Estos sectores están asentados sobre depósitos recientes compuestos principalmente por arenas y limos. Desde un punto de vista geomorfológico, San Manuel, Nueva Corina, Tamarate, Nueva Esperanza y Pucacuro se encuentran sobre planicies, mientras que el sector de Lagunas está ubicado en planicies inundables originadas por meandros. Las características geomorfológicas del área incluyen terrazas aluviales, complejos de orillas meándricas recientes y barras de arena.



Figura 1: Mapa de Loreto donde está el distrito de Lagunas.

Los datos del sismo ocurrido en Lagunas el 26 de mayo de 2019 se presentan en la Tabla 1, junto con los registros de aceleración obtenidos en la estación UNTRM de la Red Acelerográfica UNI (2019), ubicada en Chachapoyas, Amazonas, a 292.21 km de Lagunas. En esta estación, se registró una aceleración de 0.098 g. Cabe destacar que para la presente investigación también se utilizarán los valores mínimos de aceleración necesarios para producir licuefacción, determinados por Rengifo (2023) en su estudio, siendo estos de 0.12 g hasta una profundidad de aproximadamente 13 m. Además, se considerará lo indicado en la Norma E.030, que establece un valor de 0.35 g según la zona para el análisis de licuefacción.

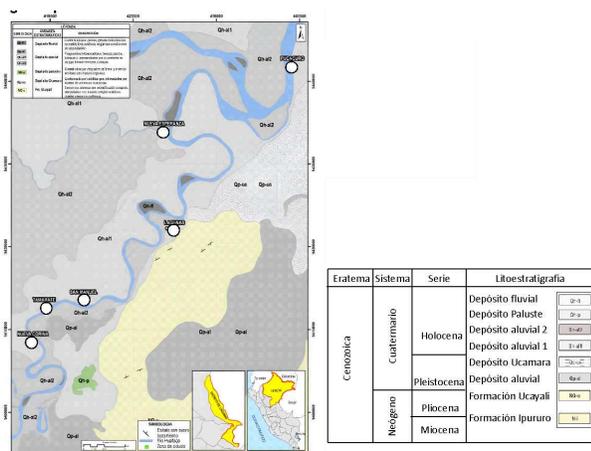


Figura 2: Mapa geológico.

Tabla 1: Datos del sismo de Lagunas.

Data	Descripción
Tiempo origen	07:41h (hora universal) 02:41h (hora local)
Latitud sur	-05.74°
Longitud oeste	-75.55°
Profundidad	135 km
Magnitud	Mw8.0
Epicentro	60 km al sur de la localidad de Laguna
Intensidad	VII, localidad de Lagunas y ciudad Yurimaguas

### 2.2 Ensayos de campo

Se realizaron ensayos geofísicos utilizando el método de microtremores, cuyas coordenadas se presentan en la Tabla 2 y la Figura 3. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos de caracterización de las muestras recolectadas mediante calicatas cercanas a los puntos de medición de los microtremores. Estos ensayos revelaron la presencia de estratos de arcilla superficial, seguidos de arena con un contenido variable de finos hasta la profundidad máxima evaluada. Además, se encontró el nivel freático a aproximadamente 3 metros de profundidad. Finalmente, los datos obtenidos de los microtremores en campo se procesarán utilizando el software Geopsy.

Tabla 2: Coordenadas de puntos de exploración.

Punto de exploración	Coordenada este	Coordenada norte
P-09	409068.00	9412737.00
P-10	409106.00	9412763.00
P-11	409139.00	9412775.00
P-12	409182.00	9412755.00



Figura 3: Ubicación de las pruebas realizadas en Tamarate.

### 3 RESULTADOS

Se realizó el ensayo geofísico de microtremores, con para luego determinar las velocidades de onda de los cuatro puntos denominados P09, P10, P11 y P12. Para el análisis se utiliza el software Geopsy el cual procesa las señales para su posterior evaluación. En la Figura 4 se observa la interpretación gráfica de los diferentes componentes NS, EW y V de cada punto filtrando únicamente el intervalo de 0.1 a 10 Hz.

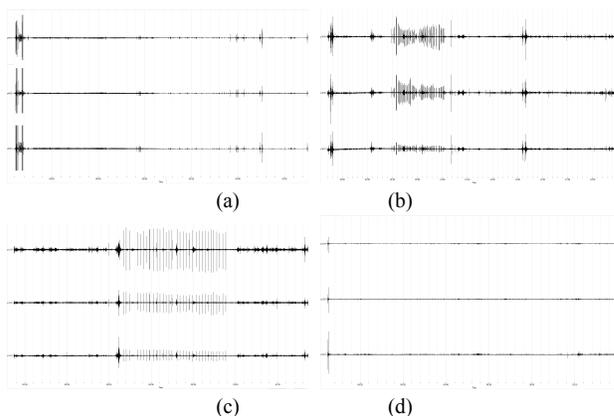


Figura 4: Señal de microtremores: (a) P09, (b) P10, (c) P11 y (d) P12.

El software permite el análisis por el método H/V (Nakamura, 1989) con el cual se determina la frecuencia natural y periodo fundamental de vibración del suelo. El proceso de cálculo de la metodología se realiza con la señal filtrada y corregida, usando una gráfica cónica tipo coseno y un alisado con Kohno & Ohmachi al 25%. Se procede a evaluar de esta manera cada una de las señales de cada microtremor obteniéndose las gráficas H/V presentadas en la Figura 5.

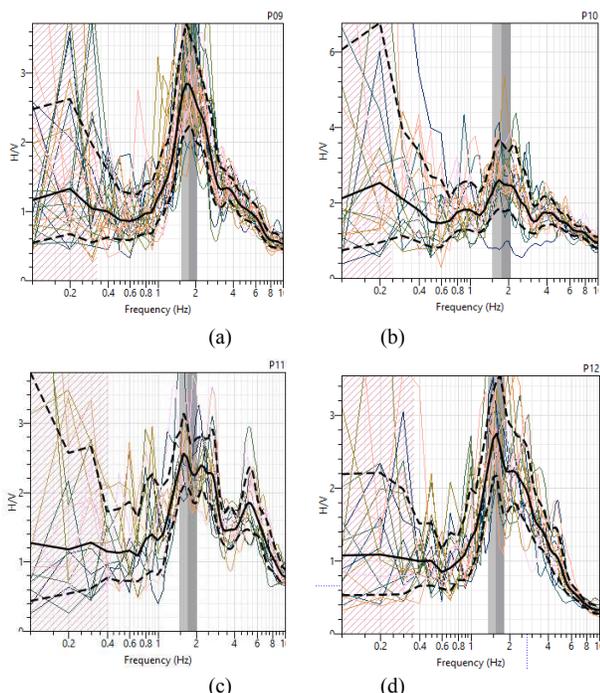


Figura 5: H/V vs periodo: (a) P09, (b) P10, (c) P11 y (d) P12.

Este software también cuenta con un módulo denominado Dinver, que permite invertir las gráficas H/V para generar el perfil de velocidad de onda de corte a partir de los datos de microtremor. El proceso comienza con la selección de la inversión de la curva elíptica y la definición de parámetros como  $V_p$ ,  $V_s$ , el coeficiente de Poisson y la densidad en estratos de diferentes profundidades, tal como se presenta en la Tabla 3. Además, se utilizan valores recomendados del coeficiente de Poisson y densidad para el tipo de suelo encontrado, basados en la revisión de la literatura correspondiente.

La presencia de arenas saturadas con contenido de finos, como limos y/o arcillas, sugiere valores aproximados del coeficiente de Poisson de 0.45. De manera similar, los valores de densidad para este suelo saturado, debido a su posición por debajo de la napa freática, se estimaron en promedio en  $1700 \text{ kg/m}^3$ . Los valores de  $V_p$  y  $V_s$  se obtuvieron mediante la correlación con la densidad, tal como lo presenta Anbazhagan (2016), y se determinaron para diferentes profundidades para su uso en el programa Geopsy.

De esta manera, los valores se vinculan con la gráfica para determinar los valores de  $V_s$  a distintas profundidades. Es importante destacar que estos valores de  $V_s$  se generan mediante curvas teóricas, las cuales pueden o no asemejarse completamente a los valores reales. Así se obtienen las velocidades de onda de corte presentadas en la Figura 6.

Tabla 3: Parámetros usados para procesamiento en Geopsy.

Prof. (m)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	Poisson	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )
0-5	1350 - 1450	50 - 100	0.4 - 0.5	1600 - 1800
5-10	1400 - 1450	100 - 150		
10-15	1450 - 1500	150 - 200		
20-25	1500 - 1550	200 - 250		
25-30	1550 - 1650	250 - 300		

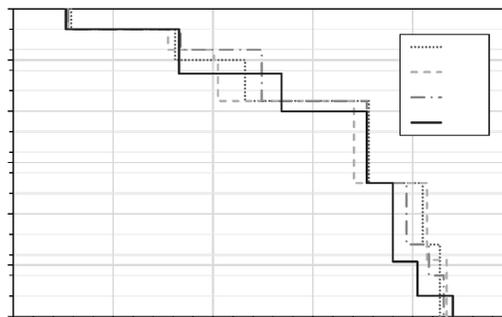


Figura 6: Velocidad de corte vs profundidad en base a microtremores.

Con base en los valores de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) obtenidos, se determina el potencial de licuefacción calculando los valores de la relación de resistencia sísmica (CSR) y la relación de resistencia a la licuefacción (CRR), y, en consecuencia, el factor de seguridad contra licuefacción (FSL).

El valor de CSR se calcula utilizando la ecuación propuesta por Seed e Idriss en 1971 (Ecuación 1), mientras que el parámetro  $r_d$  se obtiene según el método presentado por Liao y Whitman (1986) (Ecuación 2). Además, la densidad se determina a partir del valor de  $V_s$  para cada profundidad obtenidos de la Figura 6, de acuerdo con Anbazhagan (2016) presentado en la Ecuación 3.

$$CSR = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) * \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) * r_d \quad (1)$$

$$r_d = 1 - 0.00765 * z, \text{ para } z \leq 9.15 \text{ m.} \quad (2)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 * z, \text{ para } 9.15 < z \leq 23 \text{ m.}$$

$$\rho_w = 0.742V_s^{0.166} \quad (3)$$

El valor del CRR para una magnitud de 7.5 se determina utilizando la ecuación propuesta por Andrus y Stokoe (2004) (Ecuación 4),  $V_{s_{11}}$  es la velocidad de onda cortante corregida (Ecuación 5),  $P_a$  es la presión atmosférica ( $1 \text{ kg/cm}^2$ ),  $V_{s_1}^*$  es el valor máximo de  $V_{s_1}$ , con un valor sugerido de  $215 \text{ m/s}$  para un contenido de finos (FC) menor o igual al 5%, y  $K_{a1}$  es un factor de corrección para valores altos de  $V_{s_1}$ . Además, el CRR

calculado debe ser multiplicado por el factor de corrección de magnitud sísmica (MSF) (Ecuación 7), obteniendo así el valor del factor de seguridad contra licuefacción (FSL) (Ecuación 8).

$$CRR_{7.5} = 0.022 \left( \frac{K_{a1} V_{s1}}{100} \right)^2 + 2.8 \left( \frac{1}{V_{s1}^{*-(K_{a1} V_{s1})}} - \frac{1}{V_{s1}^{*}} \right) \quad (4)$$

$$V_{s1} = V_s * \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad (5)$$

$$V_{s1} = V_s * \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad (6)$$

$$MSF = \left( \frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad (7)$$

$$FSL = \frac{CRR}{CSR} \quad (8)$$

Las Tablas 4 a 7 presentan los perfiles de densidad, velocidad de onda de corte, así como los valores de CRR, CSR y el factor de seguridad contra licuefacción (FS) obtenidos para los datos de cada microtremor, desde la profundidad promedio donde inicia el estrato de arena en los cuatro puntos evaluados. Cabe destacar que los resultados presentados corresponden a una aceleración de 0.35g (valor de la zona según la Norma E.030), la cual presento los valores más críticos para el área de estudio.

Tabla 4: Valores obtenidos para P-09.

Prof. (m)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	V <sub>s1</sub>	CRR	CSR	FSL
3.85	1.659	127.5	148.09	0.057	0.247	0.231
4.85	1.706	150.5	169.60	0.095	0.277	0.342
5.85	1.709	152.5	167.27	0.091	0.301	0.302
6.85	1.709	152.5	163.23	0.084	0.319	0.265
7.85	1.709	152.5	159.64	0.079	0.333	0.238
8.85	1.709	152.5	156.41	0.075	0.345	0.218
9.85	1.817	220.5	221.31	0.179	0.347	0.514
10.85	1.817	220.5	216.94	0.211	0.345	0.611
11.85	1.817	220.5	212.98	0.132	0.342	0.386
12.85	1.817	220.5	209.35	0.179	0.337	0.529
13.85	1.817	220.5	206.01	0.305	0.331	0.919
14.85	1.817	220.5	202.92	0.262	0.325	0.808

Tabla 5: Valores obtenidos para P-10.

Prof. (m)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	V <sub>s1</sub>	CRR	CSR	FSL
3.85	1.667	131	151.99	0.057	0.247	0.232
4.85	1.667	131	147.72	0.065	0.277	0.234
5.85	1.734	166	182.01	0.105	0.301	0.351
6.85	1.734	166	177.48	0.111	0.318	0.349
7.85	1.734	166	173.47	0.102	0.332	0.308

8.85	1.734	166	169.87	0.095	0.343	0.278
9.85	1.827	228	228.30	0.179	0.346	0.516
10.85	1.827	228	223.79	0.211	0.344	0.614
11.85	1.827	228	219.69	0.132	0.341	0.387
12.85	1.827	228	215.94	0.179	0.336	0.532
13.85	1.827	228	212.48	0.305	0.330	0.923
14.85	1.827	228	209.29	0.409	0.323	1.265

Tabla 6: Valores obtenidos para P-11

Prof. (m)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	V <sub>s1</sub>	CRR	CSR	FSL
3.85	1.673	133.8	155.22	0.057	0.247	0.232
4.85	1.748	174.4	196.00	0.117	0.277	0.424
5.85	1.748	174.4	190.55	0.105	0.299	0.352
6.85	1.748	174.4	185.79	0.135	0.317	0.425
7.85	1.748	174.4	181.57	0.121	0.331	0.367
8.85	1.748	174.4	177.78	0.112	0.342	0.327
9.85	1.826	227	226.51	0.179	0.344	0.519
10.85	1.826	227	222.10	0.211	0.342	0.617
11.85	1.826	227	218.09	0.132	0.339	0.389
12.85	1.826	227	214.41	0.179	0.334	0.534
13.85	1.826	227	211.02	0.305	0.328	0.928
14.85	1.826	227	207.89	0.403	0.322	1.253

Tabla 7: Valores obtenidos para P-12.

Prof. (m)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	V <sub>s1</sub>	CRR	CSR	FSL
3.85	1.671	133	154.36	0.057	0.247	0.232
4.85	1.671	133	149.99	0.067	0.278	0.243
5.85	1.671	133	146.18	0.063	0.301	0.210
6.85	1.764	184.3	197.28	0.139	0.319	0.436
7.85	1.764	184.3	192.62	0.156	0.332	0.469
8.85	1.764	184.3	188.47	0.139	0.343	0.405
9.85	1.764	184.3	184.72	0.131	0.346	0.378
10.85	1.826	227	223.01	0.211	0.345	0.613
11.85	1.826	227	218.92	0.132	0.341	0.387
12.85	1.826	227	215.17	0.179	0.336	0.531
13.85	1.826	227	211.73	0.305	0.330	0.922
14.85	1.826	227	208.54	0.409	0.324	1.263

#### 4 DISCUSIÓN

Comparando los valores de CSR y CRR, obtenidos con valores de aceleración de 0.35g, se observa que para cada ensayo con microtremor hay una variación en relación a la profundidad del valor de CRR.

Al observar a los microtremores también se puede observar que, hay una dispersión de valores de CRR lo cual se relaciona con los valores de Vs, obtenidos del Geopsy, y los valores de Vs1 esperado para la metodología de Andrus y Stokoe (2004), conllevando a que el valor de Ka sea diferente a 1.

El valor de CSR, presenta una similitud, sin embargo, los valores obtenidos por la propuesta de Youd et al. (2001) los

microtremores presentan cierta igualdad, pero la aplicación del valor  $R_d$  planteada diferente para cada metodología ocasiona que estos valores vayan diferenciándose.

Para considerar licuefacción, el valor de FSL debe ser menor a uno. Para el caso de la aceleración máxima analizada (0.35g), podemos observar que esto ocurre en todos los casos, a excepción de profundidades mayores a 14 m. en los microtremores. Al analizar los FSL observamos un comportamiento similar a sus valores de CRR en relación a la dispersión y profundidad.

También debemos destacar que, al variar el valor de aceleración máxima a 0.12g, y 0.098g, se obtuvieron valores muy diferentes, para los microtremores, presenta licuefacción. Esta diferenciación puede deberse a diversos factores como lo son la atenuación del sismo, el paso del tiempo y la variación el nivel freático.

En base a las correlaciones, se visualiza la cercanía entre los valores de  $V_s$  de microtremores promediados. Se realizó un análisis desde la profundidad donde encontramos el estrato de arena, al ser justamente sobre la cual se fundamentan las correlaciones presentadas, logrando destacar la correlación de Dikmen (2009) al presentar los valores más cercanos. Esto puede deberse a la similitud entre el terreno explorado y el utilizado para la investigación de Dikmen. Sin embargo, es necesario determinar a futuro con una mayor cantidad de datos una correlación propia para la zona.

## 5 CONCLUSIONES

Se concluye principalmente que la viabilidad de la evaluación del potencial de licuefacción mediante microtremores con base en la relación de las ecuaciones proporcionadas para determinar CRR y CSR respectivamente con base en las velocidades de onda de corte es óptimo e incluso partiendo del principio de la existencia de licuefacción, se puede verificar que el valor del parámetro de aceleración de  $a=0.35g$ , siendo este valor de aceleración un parámetro que normalmente se toma de la Norma E.030: Diseño Sismorresistente.

La elección de las técnicas de investigación con microtremores para la determinación de las propiedades dinámicas con las que se evaluó el potencial de licuefacción, resultó de gran utilidad para una zona remota y de difícil acceso, la portabilidad de los equipos y el hecho de que son de peso ligero hace que su transporte y uso no sean complicados y las pruebas se pueden realizar en poco tiempo y cubren una mayor cantidad de área y profundidad en comparación con otras pruebas como el SPT.

El uso del software Geopsy facilita la obtención de valores obtenidos a partir de los microtremores usando diversas metodologías, como puede ser el análisis de las ondas sísmicas, el filtrado de señales, el método H/V y la inversión de estas gráficas. Pero se debe tomar en cuenta que el módulo dedicado a la inversión de gráficas H/V utiliza parámetros ingresados por el usuario para presentar los valores de  $V_s$ , si bien estos parámetros pueden justificarse con el uso de valores obtenidos de otras exploraciones geofísicas, o del análisis de parámetros geotécnicos de la zona, esto conlleva a ampliar el estudio respecto a este software y la influencia de estos parámetros en la obtención de  $V_s$ .

Esto también debe manejarse con precaución según la aceleración usada, ya que tal y como se observó, conforme esta aceleración disminuía era menor la probabilidad de ocurrencia de licuefacción

en la zona analizando los valores de microtremores obtenidos, se debe tener en cuenta que la atenuación del sismo con respecto a la distancia del punto de origen puede concurrir en que la aceleración usada sea menor a la ocurrida en el sitio. Algunas de las explicaciones pueden basarse en la diferencia de años entre las exploraciones, lo que conlleva a cambios en el terreno por acción del hombre y/o la naturaleza, y a cambios en la profundidad del nivel freático. Esto también podría afectar a resultados adicionales como los obtenidos en las correlaciones, justificando de alguna manera la diferencia entre estos valores.

Finalmente, podemos determinar que a partir de las 4 pruebas de microtremores se obtuvieron resultados adecuados y propios del fenómeno ocurrido en 2019 en la zona de Tamarate. Esto puede asociarse no solo con los resultados de las pruebas de clasificación de suelos, sino también con la geología del área, que se describe como depósitos aluviales de areniscas en arena, matrices arcillosas - limosas o arenas limosas; sumado a las diferentes metodologías como el uso del Geopsy y las ecuaciones de Andrus y Stokoe, usadas para determinar valores de  $V_s$ , y en consecuencia el CSR, CRR y FSS.

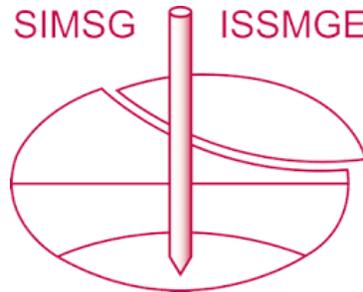
## AGRADECIMIENTOS

La investigación presentada en este artículo fue apoyada por el Instituto de Investigaciones Científicas (IDIC) de la Universidad de Lima. Adicionalmente, los autores desean expresar su agradecimiento al Laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Lima por su gran ayuda en este trabajo.

## REFERENCIAS

- Anbazhagan, P., Uday, A., Moustafa, S. S., & Al-Arifi, N. S. (2016). Correlation of densities with shear wave velocities and SPT N values. *Journal of Geophysics and Engineering*, 13(3), 320-341.
- Andrus, R. D., & Stokoe, K. H. (2000). Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(11), 1015-1026.
- Bensoula, M., Missoum, H., & Béndani, K. (2018). Liquefaction potential sand-silt mixtures under static loading. *Revista de la construcción*, 17(2), 196-208. <https://dx.doi.org/10.7764/rdlc.17.2.196>
- Geopsy (2008) Geopsy Manual. [www.geopsy.org/documentation/](http://www.geopsy.org/documentation/)
- INGEMET. (2019). Primer reporte: Evaluación técnica geológica en el distrito de Lagunas en los sectores de San Manuel, Nueva Corina, Tamarate, Nueva Esperanza, Pucacuro y Lagunas detonados por el sismo del 26 de mayo 2019, del distrito de Lagunas, provincia de Alto Amazonas, región Loreto. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/>
- Liao, S. S., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of geotechnical engineering*, 112(3), 373-377. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:3\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:3(373))
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018) Norma Técnica E.050 Suelos y Cimentaciones. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Nakamura Y (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Q Rep Railway Tech Res Inst* 30:25-33.
- Rengifo, J. (2023). Evaluación del Potencial de Licuación de Suelos mediante Ensayos Geofísicos en Tamarate – Loreto debido al sismo de Lagunas (2019) [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, 97(9), 1249-1273.
- Youd, T.L. and Idriss, I.M. (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

# 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 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*