

# Análisis del fenómeno de licuefacción en suelos y sus implicaciones sanitarias

Analysis of the soil liquefaction phenomenon  
and its health implications



# Análisis del fenómeno de licuefacción en suelos y sus implicaciones sanitarias<sup>1</sup>

## Analysis of the soil liquefaction phenomenon and its health implications

Ángel Camilo Pascal Suarez<sup>2</sup>, Jeisson Fabian Martin Calvo<sup>3</sup>

Artículo recibido en julio 19 de 2019; artículo aceptado en noviembre 4 de 2019

Este artículo puede compartirse bajo la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional y se referencia usando el siguiente formato: Pascal, C. & Martin, J. (2020). Análisis del fenómeno de licuefacción en suelos y sus implicaciones sanitarias. *I+D Revista de Investigaciones*, 15 (1), 133-140. DOI: <https://doi.org/10.33304/revinv.v15n1-2020013>

### Resumen

La licuefacción ocurre en locaciones en las que el agua se eleva a la superficie del terreno, como en pantanos, arroyos y a lo largo de playas. El estudio de este fenómeno es importante en el campo de la ingeniería sanitaria, ya que se debe tener en cuenta en el diseño y construcción de obras hidrosanitarias en las que se debe conocer, a nivel conceptual y experimental, su ocurrencia. Lo anterior, a fin de analizar el comportamiento del suelo que se va a intervenir, de tal manera que la ocurrencia del fenómeno de licuefacción sea mínima, para que las estructuras no sufran posibles daños. En este artículo de investigación se presentan los resultados obtenidos de un trabajo teórico-experimental del fenómeno de licuefacción en suelos. El proceso se desarrolló en tres fases. En la etapa experimental, se caracterizaron las muestras de suelo no drenado que es posible someter a proceso de licuefacción, mediante la aplicación del modelo que se plantea. Posteriormente, se realizaron cinco ensayos con diferentes volúmenes de material sometidos a un nivel freático determinado. Finalmente, se analizaron los datos obtenidos mediante el modelo estadístico de correlación, con lo que se determinó la ocurrencia del evento y se logró analizar el fenómeno y sus posibles implicaciones en obras hidrosanitarias.

**Palabras clave:** Arenas, nivel freático, licuefacción, sanitaria, suelo.

### Abstract

Liquefaction occurs in locations where water rises to the surface of the ground, as in swamps, streams, and along beaches. The study of this phenomenon is important in the field of sanitary engineering, since this must be considered in the design and construction of hydro-sanitary works in which its occurrence must be known at conceptual and experimental levels. The above in order to analyze the behavior of the soil to be intervened, so that the occurrence of the liquefaction phenomenon is minimal and the structures do not suffer any possible damage. In this research article, the results obtained from a theoretical-experimental work in soil liquefaction phenomenon are presented. The

<sup>1</sup> Artículo de investigación, de enfoque cuantitativo, resultado de un proyecto de investigación llamado "La investigación formativa en el proyecto curricular de Ingeniería Sanitaria: Desde los espacios académicos de Física", perteneciente al área de ingeniería sanitaria, subárea de física ondulatoria, desarrollado en el Núcleo de Investigación en Ciencias para Ingeniería Sanitaria (NICIS) y financiado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de la ciudad de Bogotá (Colombia). Dirección: calle 52 sur n.º 93D-97. PBX 3239300, ext. 4060 Fecha de inicio: marzo de 2018.

<sup>2</sup> Ingeniero sanitario, NICIS, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia). Dirección: calle 52 sur n.º 93D-97. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6153-6998>. Correo electrónico institucional: [acpascals@correo.udistrital.edu.co](mailto:acpascals@correo.udistrital.edu.co).

<sup>3</sup> Ph. D. en Educación, NICIS, Profesor de Física de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia). Dirección: calle 52 sur n.º 93D-97. PBX: calle 52 sur n.º 93D-97. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2390-9677>. Correo electrónico institucional: [jfmartinc@udistrital.edu.co](mailto:jfmartinc@udistrital.edu.co).

process was developed in three phases. In the experimental stage, the samples of undrained soil were characterized, which can be subjected to the process of liquefaction, by applying the model proposed. Subsequently, five trials were conducted with different volumes of material that underwent a specific water table. Finally, the data obtained through the statistical correlation model were analyzed, which allowed to determine the occurrence of the event, and to analyze the phenomenon and its possible implications in hydro-sanitary works.

**Keywords:** Sand, water table, liquefaction, soil.

## Introducción

Según Delgado (2011), el fenómeno de licuefacción ocurre en la naturaleza cuando un suelo se transforma de un sólido saturado a un estado líquido, como consecuencia de un incremento en la presión que ejerce el agua contenida en los poros del material. Este fenómeno se produce normalmente en sedimentos no cohesivos, con arenas de grano fino, tamaño uniforme y poco compactadas; es decir, con poros de gran tamaño.

De acuerdo con Kramer y Stewart (2004), la licuefacción ocurre cuando las tensiones de corte para mantener el equilibrio estático de una masa de suelo son mayores que la resistencia al corte del suelo en su estado licuado o de resistencia residual. En términos de Johansson (2000), cuando se produce un movimiento, por lo general de carácter sísmico, actúa como un disipador y en adelante las grandes deformaciones generadas son el producto del estado de esfuerzos estáticos. Al respecto, Obermeier (2005) afirma que los esfuerzos cíclicos que inducen las ondas al propagarse por el medio hacen que las partículas se reorganicen en una estructura más densa, por reducción de poros. De tal forma que la licuefacción está relacionada con la porosidad del material, y se origina pérdida de la fuerza de cizallamiento como respuesta al exceso de presión del agua capilar. Por lo anterior, la aparición de algunos de estos fenómenos está limitada al tipo de sedimento –limos, arenas y grava–, así como al sometimiento a fuerzas externas para la ocurrencia del evento, en las que la fricción entre los granos es dependiente de la presión, lo que los obliga a estar juntos. Este fenómeno se conoce como presión normal intergranular. En cualquier punto en el interior de determinado sedimento, la presión normal se aplica por la sobrecarga de presión y se contrarresta por la presión del agua capilar.

Se han descrito varios casos de licuefacción, en los que se comprende y cuantifica el comportamiento fundamental del suelo asociado con la activación y análisis de este fenómeno y su determinación de riesgo. Esto es particularmente necesario para el diseño de estructuras de gran tamaño y de alto riesgo, como embalses, presas y cimientos de los edificios para los que una falla por licuefacción tiene el potencial de originar grandes daños y pérdidas humanas. Por su parte, Sadrekarimi (2014) manifiesta que las técnicas apropiadas de mitigación de

este fenómeno y mejoramiento del suelo podrían ser implementadas en el diseño de estructuras críticas, en las que se debe contemplar la dilatación como un aspecto fundamental del comportamiento de corte del suelo, que depende de su densidad y del nivel de tensión efectiva.

La licuefacción provoca el fallo de las cimentaciones, rotura de taludes y deslizamientos. En términos de Gonzalez y Ferrer (2002), los suelos susceptibles a perder parte de su resistencia ante oscilaciones dinámicas son las arenas finas y flojas, así como las arenas y limos mal graduados. Otras de las condiciones necesarias para que tenga lugar este comportamiento del suelo son niveles freáticos altos cerca de la superficie. Siguiendo a González (2012), los ensayos consolidados y no drenados proporcionan los parámetros de corte más desfavorables del suelo, aplicando a este un esfuerzo que provoca la rotura rápida y sin admitir el drenaje para una muestra saturada.

El estudio del fenómeno de la licuefacción de suelos para estructuras hidrosanitarias tiene importancia en el desarrollo de las actividades de los ingenieros sanitarios, en términos de diseño de redes de acueducto y alcantarillado, ya que en estos se transporta el recurso hídrico de consumo y de disposición. Por tanto, al ocurrir este fenómeno se pueden generar daños en las tuberías y presentar contaminación cruzada. También, en términos de la dotación, un cambio de dirección de las tuberías puede ocasionar pérdidas por fricción y por variación de las pendientes (SCG, 2006). Teniendo en cuenta lo anterior, así como lo planteado por Brenes (2008), la licuefacción de los suelos ha sido causa de destrucción de estructuras como puentes, edificios, muelles y viviendas. Además, afecta directamente obras lineales, como oleoductos, acueductos, alcantarillados sanitarios y líneas de ferrocarril.

El modelo para determinar la ocurrencia o no de la licuefacción se reprodujo experimentalmente, mediante el uso de una cubeta con arena en la que se inyectó agua por su base. El agua procede de una manguera y asciende por la muestra de suelo confinada en un contenedor, sufriendo en algunos casos licuefacción, lo que genera el hundimiento de cualquier estructura que se encuentre en la superficie. Una consecuencia de las presiones intersticiales desarrolladas es que se establece un flujo desde la parte licuefactada –altas presiones– hacia la superficie –presiones intersticiales nulas–, que arrastra

partículas del suelo que se acumulan en la superficie del terreno y forman cuerpos cónicos alrededor de la abertura por donde emergió el fluido. Este modelo experimental se ajustó y se desarrolló en la asignatura de Física Ondulatoria para Ingeniería Sanitaria, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Además, hace parte de las evidencias del proyecto "La investigación formativa en el proyecto curricular de Ingeniería Sanitaria: Desde los espacios académicos de Física".

### Metodología

El tipo de investigación de este proyecto es de orden experimental, que, en términos de Vergel (2010), permite, en condiciones rigurosas, establecer las relaciones entre causa y efecto, así como tener en consideración los factores que pueden afectar el desarrollo del experimento. Además, según el tiempo de ocurrencia de los hechos y el registro de la información relacionada con el objeto de estudio, el tipo de investigación aplicada se considera retrospectiva, con el propósito de alcanzar conocimientos.

### Materiales e instrumentos

Para analizar el fenómeno de licuefacción en arenas, se estableció una metodología que conduce al desarrollo de un montaje piloto para observar dicho fenómeno y demostrar su ocurrencia, mediante la aplicación de las ecuaciones 2 y 3. Por esta razón, el proceso se planteó en diferentes fases:

**Fase I:** En esta etapa se realizó el análisis documental y descriptivo, con el propósito de identificar y analizar las características de la producción investigativa realizada acerca del fenómeno de licuefacción en suelos. Se ejecutaron las siguientes actividades: definición de los criterios de búsqueda y selección de documentos, sistematización y análisis de la información. La búsqueda de documentos se efectuó en bases de datos como SciELO, Dialnet, Elsevier, ScienceDirect, Redalyc y Scopus.

**Fase II:** En esta fase se construyó el montaje piloto y se realizaron los respectivos ajustes experimentales.

**Fase III:** Se realizó la recopilación de datos y su respectivo análisis.

### Procedimiento

El montaje comprende una manguera atóxica con alambre de diámetro de 2", que corresponde al medio material por el que se transportaba el fluido –agua–. La base donde se deposita la muestra de suelo es rectangular. Allí reposa el material sólido –arena–. Para generar el fenómeno, se comienza con un flujo ascendente que genera la presión efectiva normal, que actúa sobre un plano horizontal arbitrario. Con el fin de

observar el comportamiento, se realizaron 5 ensayos con arenas de diferentes granulometrías, sometidas a presiones generadas por el fluido.

### Resultados

La vibración del suelo durante un terremoto provoca una perturbación en su estado de esfuerzos que puede desencadenar efectos geotécnicos de un terremoto, como licuefacción y movimientos de ladera. Según Garrido y Lopez (2011), en ambos casos el terreno natural pierde su equilibrio y propiedades originales, lo que da lugar a un movimiento de la superficie del terreno que puede causar daños en viviendas e infraestructuras. En términos de Santibañez (2006), la *licuefacción* es un término usado para describir un rango de fenómenos en los que la resistencia y la rigidez de un depósito de suelos se reducen debido a un aumento de la presión en poros. Este fenómeno ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos. Estos suelos pueden densificarse cuando están sujetos a una carga cíclica. La tendencia a densificarse reduce el volumen de suelo y agua, e incrementa la presión de poros si estos se saturan de agua. Al respecto, Karmal (2014) plantea que cuando la presión de poros se vuelve igual a la tensión media total, el suelo pierde su resistencia y se licúa. Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuefacción.

Por tanto, la licuefacción también se presenta en las arenas movedizas, cuando existe una cantidad de agua que se encuentra atascada en la arena y se disuelve en el suelo, lo que provoca que la arena pierda la capacidad de soportar peso. Así, allí donde el agua toca los granos de suelo, las fuerzas capilares actúan causando presiones granulares en los huecos del suelo que tienden a comprimirlos. Es la llamada presión capilar, que genera una presión negativa.

### Módulo de esfuerzo y deformación

El módulo de esfuerzo y deformación del suelo, definido por Nicholl y Karnowsky (2006), se ve expuesto por cambios de estado, debido al movimiento en sus partículas, y se expresa de la forma:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

*Ecuación 1:* Módulo de esfuerzo deformación.

Donde:

$\Delta\sigma = \text{Esfuerzo}$

$\Delta\varepsilon = \text{deformacion}$

La elasticidad es un factor dependiente de este módulo. Para calcularlo, se pueden emplear dos métodos: por medio de un módulo tangente o de un módulo

secante. La deformación lineal puede hallarse a través de la relación entre la relación de Poisson y el módulo de la deformación del suelo. La relación de Poisson se encuentra entre 0,5 y 0,0 para suelos saturados y secos, respectivamente. Además, la superficie homogénea expuesta a vibración produce tres ondas elásticas que se producen a diferentes velocidades:

- Ondas primarias o de compresión  $P$
- Ondas secundarias o cortantes  $S$
- Ondas cercanas a la superficie  $R$

Una de las condiciones para la licuefacción se desarrolla cuando la presión del agua capilar es suficiente para sobrepasar la presión sobrecargada, que puede ocurrir bajo carga dinámica y por flujo ascendente. Según Nicholl y Karnowsky (2006), la ecuación para determinar la presión capilar es:

$$\beta = [Z_1 Y_d + n Z_1 Y_w + (Z_2 - Z_1) Y_w] - h_p Y_w$$

Ecuación 2: Ecuación para determinar la presión capilar.

Donde:

$Y_d$  = Peso del sedimento seco

$n$  = Porosidad del sedimento

$Y_w$  = Peso del agua

$Z_1$  = Altura vertical del sedimento sobre el plano

$Z_2$  = Altura vertical de agua sobre el plano

$h_p$  = Cabeza hidráulica

Establecidos los parámetros para determinar la presión, se conduce a la siguiente ecuación planteada por Nicholl y Karnowsky (2006), para determinar la ocurrencia del fenómeno:

$$i \geq \frac{Y_d + n Y_w}{Y_w} - 1$$

Ecuación 3: Ecuación para determinar la ocurrencia del fenómeno.

Donde  $i$  corresponde a la pendiente, que se calcula mediante la ecuación:

$$i = \frac{h_p - Z_2}{Z_1}$$

Ecuación 4: Ecuación para determinar la pendiente.

Los suelos saturados y los suelos secos constituyen un sistema de dos fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire, respectivamente. En términos de Mesa (2011), en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran tres fases que interactúan entre sí: partículas sólidas, agua y aire. Debido a la interacción entre las fases, además de los principios de la mecánica e hidráulica, se requiere utilizar conceptos de termodinámica aplicados a las diferentes fases del suelo, lo que hace complejo el estudio cuando está parcialmente saturado. Aun así, se ha planteado un esquema, que se muestra en la Figura 1, para representar los estados del suelo dependiendo de las fases.

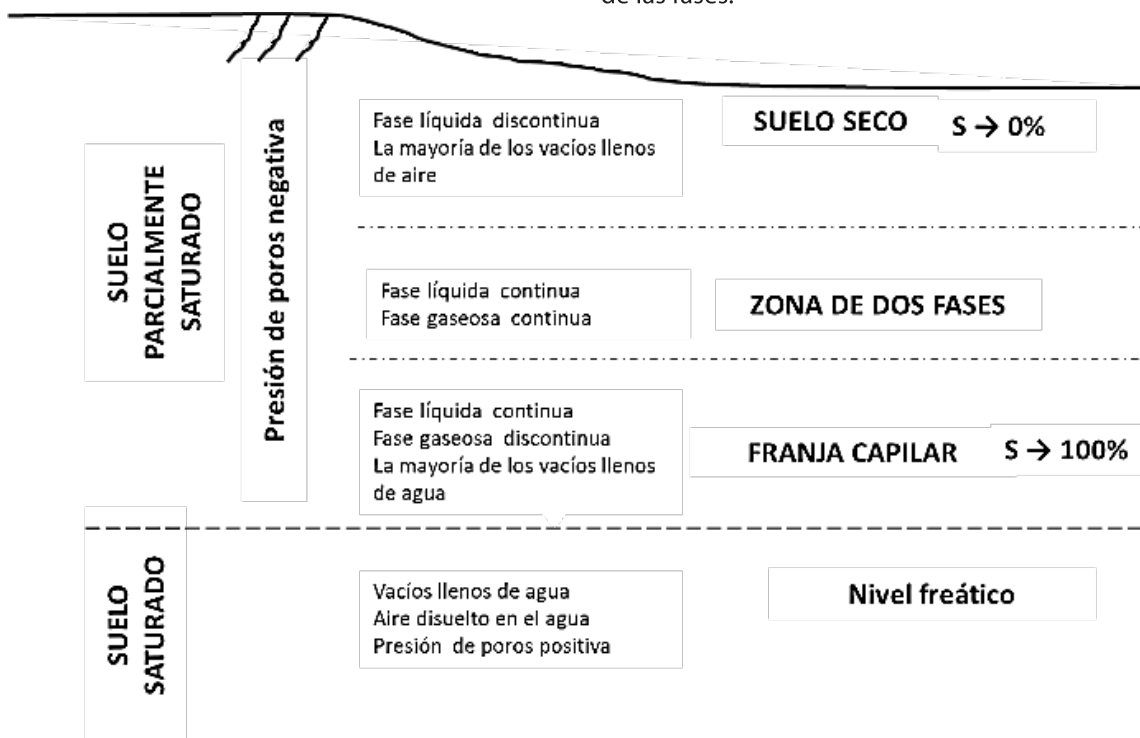


Figura 1. Zonas de suelos saturados y parcialmente saturado. Fuente: Tomado de Fredlund (2000).

Según los diferentes ensayos realizados, y teniendo en cuenta la literatura pertinente, el desarrollo del montaje dio como resultado la ocurrencia del fenómeno de licuefacción y arenas movedizas bajo una serie de condiciones establecidas y datos determinados experimentalmente, que se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 1

Variables para el cálculo del tipo de presión: ensayos 1, 2, y 3

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Yd	3 kg	4 kg	5,5 kg
N	0,001 cm	0,001 cm	0,001 cm
Yw	1 g/cm <sup>3</sup>	1 g/cm <sup>3</sup>	1 g/cm <sup>3</sup>
Z <sub>1</sub>	3,2 cm	4,2 cm	5,8 cm
Z <sub>2</sub>	12,6 cm	11,5 cm	9 cm
hp	100 cm	100 cm	100 cm

Fuente: Autores.

Tabla 2

Variables para el cálculo del tipo de presión: ensayos 4 y 5

	Ensayo 4	Ensayo 5
Yd	5 kg	5,5 kg
N	7,5 cm	8 cm
Yw	1 g/cm <sup>3</sup>	1 g/cm <sup>3</sup>
Z <sub>1</sub>	5,8 cm	5,8 cm
Z <sub>2</sub>	9 cm	9 cm
hp	100 cm	100 cm

Fuente: Autores.

La porosidad del sedimento influye notoriamente en la ocurrencia del fenómeno. En la Figura 2 se visualiza la ocurrencia del fenómeno según la porosidad del sedimento.

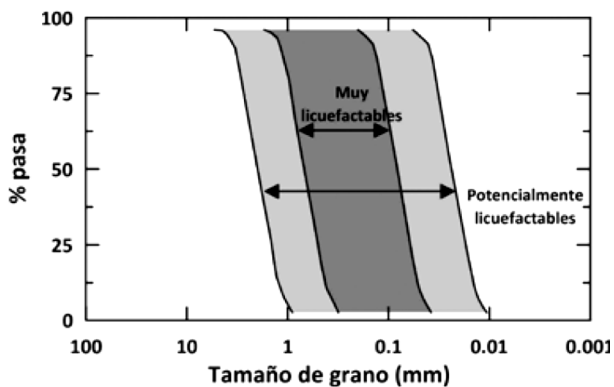


Figura 2. Granulometrías más propensas a sufrir licuefacción. Fuente: Obermeier (2005).

Una porosidad de 0,1 mm, como la utilizada experimentalmente en los ensayos 1, 2 y 3, implica una alta licuefacción. A su vez, al realizar el respectivo ensayo utilizando como sedimento arena, que tiene teóricamente una porosidad de 0,1 mm, se pudo establecer experimentalmente la ocurrencia del

fenómeno y la generación de vórtices en su superficie. De esta manera, resulta evidente la ocurrencia del fenómeno. Se observó la generación de intersticios en el fondo del lecho del material utilizado y cómo se establece la salida de aire –formación de burbujas– y la posterior generación de los vórtices. Al contrario, en los ensayos 3 y 4 no se evidenció la ocurrencia de licuefacción, ya que para estos ensayos se utilizó material de porosidad 75 y 80 mm. Además, no se generaron vórtices en el lecho del material.

Los resultados obtenidos corroboran la generación y/o no generación de estos fenómenos de forma experimental. Asimismo, se aplicaron las ecuaciones 2, 3 y 4 a los datos obtenidos en cada ensayo, como se muestra a continuación:

$$\beta_1 = [Z_1 Y_d + n Z_1 Y_w + (Z_2 - Z_1) Y_w] - h_p Y_w = -80,9968 P.$$

$$\beta_2 = -75,8958 P.$$

$$\beta_3 = -64,8942 P.$$

$$\beta_4 = 68,600 P.$$

$$\beta_5 = 74,400 P.$$

Según lo establecido en el fundamento teórico, así como lo planteado por Fredlund (2000), la presión es negativa para suelos saturados ( $S = 100$ ) y con porosidad ( $n = 0,1$  mm). Se logró determinar que el evento se genera, ya que la variable  $-i-$  es mayor al criterio de la ocurrencia, tal como lo describe la Ecuación 3. Asimismo, se corrobora lo expuesto en la Figura 2 por Obermeier (2005), al asociar que una granulometría de 0,1 mm tiene una probabilidad alta de presentar el fenómeno de licuefacción; esto para los ensayos 1, 2 y 3. Por el contrario, en los ensayos 4 y 5 no se presentó el evento, y la variable  $-i-$  es menos al criterio de ocurrencia.

Se calculó la probabilidad de generación del evento, mediante la Ecuación 2; y al reemplazar valores en la Ecuación 4 para la obtención de  $-i-$ , se obtuvo:

$$i_1 = \frac{h_p - Z_2}{Z_1} = 27,3125$$

$$i_2 = 21,0743$$

$$i_3 = 15,68965$$

$$i_4 = -0,327586$$

$$i_5 = -0,327586$$

Al corroborar la probabilidad de ocurrencia del evento, se obtuvo:

$$i_1 \geq \frac{Y_d + n Y_w}{Y_w} - 1 = 2,001$$

$$i_2 \geq 3,001$$

$$i_3 \geq 4,501$$

$$i_4 \geq 11,5$$

$$i_5 \geq 12,5$$

Dados los resultados obtenidos en función de la

ocurrencia del fenómeno y la altura del sedimento, se realizó una correlación de los datos obtenidos de los ensayos 1, 2 y 3. Estos resultados se pueden observar en la Figura 3.

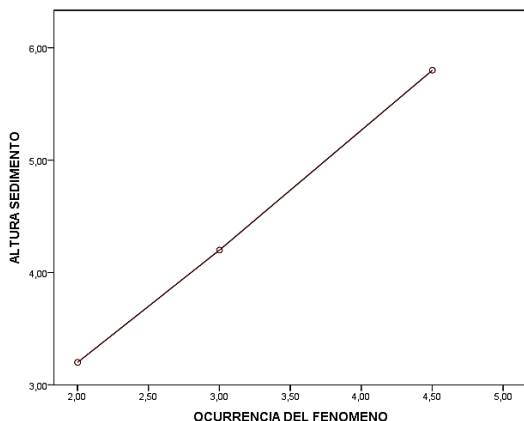


Figura 3. Relación ocurrencia del fenómeno vs. altura sedimento. Fuente: Autores.

Dentro del proceso de licuefacción del suelo, se pudo observar que la ocurrencia del fenómeno está directamente relacionada con la altura del sedimento y la porosidad del material, ya que se obtuvo un coeficiente de correlación  $R = 0.9997$ . Este coeficiente es cercano a 1. Esto se puede expresar como un tipo de correlación excelente, lo que manifiesta que a mayor altura del sedimento, la ocurrencia del fenómeno es menor, ya que este se aleja del origen (Figura 4). Esto para los ensayos 1, 2 y 3. Como caso contrario, en los ensayos 4 y 5 se determinó que el valor de  $-i-$  calculado es inferior a la probabilidad de ocurrencia de licuefacción. Esto se puede observar en la Figura 4.

En la Figura 4 se puede observar que, para partículas superiores a 10 mm, la alta permeabilidad impide el incremento de presión de poros en esta zona, por lo que no se presenta licuefacción. Asimismo, se establece la grava como material utilizado para los ensayos 4 y 5, dadas las porosidades de 7, 5 y 8 mm, respectivamente.

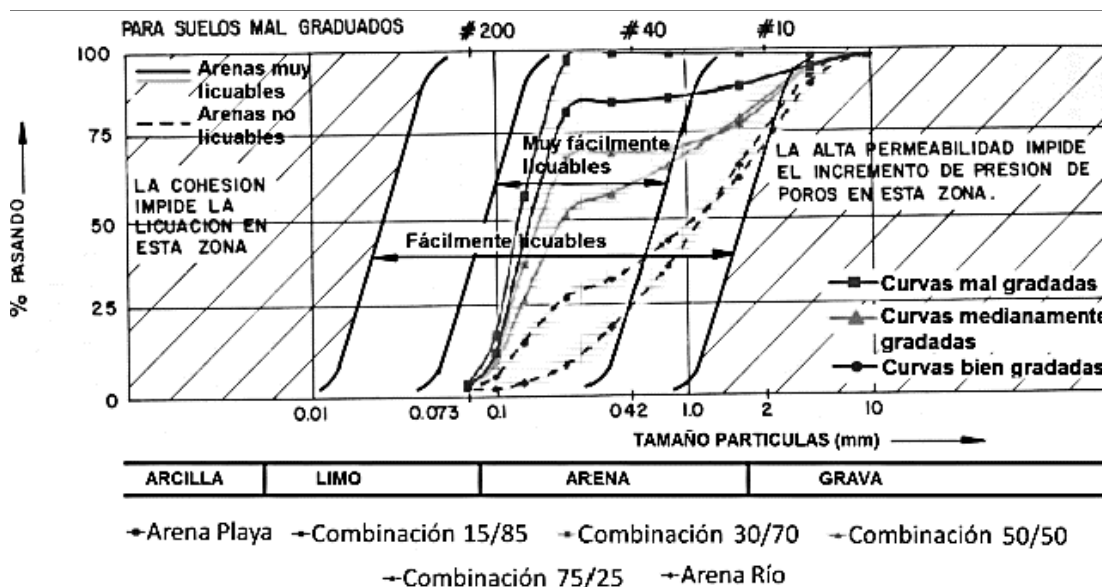


Figura 4. Comparación de curvas granulométricas. Fuente: Tomado de C.C.C.R (2009).

## Conclusiones

- El comportamiento de los suelos, al estar sometidos a algún tipo de fuerza externa, debe ser estudiado de manera minuciosa, sobre todo al momento de realizar algún tipo de obra de carácter hidrosanitario, ya que la licuefacción puede afectar dichas obras y generar problemas mayores a las poblaciones beneficiadas.
- El rango de granulometría en el que se clasifica la arena utilizada en el montaje presentó las condiciones ideales para el desarrollo del fenómeno

de licuefacción de suelos. Haber usado arena de grano fino permite la adhesión del agua y, por tanto, la generación de vórtices.

- Cuando la arena fina entra en contacto con el agua se presenta un cambio de estado. En términos de desestabilización, se da el paso de sólido a semilíquido. Las pruebas realizadas durante el montaje muestran la incidencia de la presión para generar el fenómeno. Además, se evidenció que un término negativo en la presión significa cambio en esta, por acción del fluido.

- Se logró la conceptualización del fenómeno partiendo de una aproximación teórica de carácter documental y con el uso del experimento, con el fin de generar la divulgación y apropiación del fenómeno en la formación de ingenieros sanitarios.

### Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por su apoyo y financiamiento, así como al programa de Ingeniería Sanitaria, por los espacios brindados para el desarrollo de la presente investigación.

### Referencias

- Brenes Quesada, F. (2008). *Evaluación del potencial de licuefacción de suelos. (Tesis de pregrado), Instituto Tecnológico de Costa Rica.*
- C.C.C.R. (2009). *Código de cimentaciones de Costa Rica.* Cartago, Costa Rica : Tecnológica de Costa Rica.
- Delgado, J. (2011). Efectos geotécnicos de los terremotos. *Universidad de Alicante*, 19.3, 276-288
- Fredlund, D. G. (2000). The 1999 RM Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 963-986.
- Garrido, J., & Lopez Casado, C. (2011). On Far Field occurrence of seismically induced landslides. *Engineering Geology*, 123, 204-213.
- González, D., & Ferrer, M. (2002). *Ingeniería Geológica.* Madrid: Prentice Hall Pearson Educación.
- González, M. (2012). *El terreno.* Barcelona: Universitat Politécnica de Catalunya, SL.
- Karmal, I. (2014). Liquefaction analysis of alluvial soil deposits in Bedsa south west of Cairo. *Ain Shams Engineering Journal*, 741-655.
- Kramer, S. & Stewart J. (2004). Geotechnical Aspects of seismic Hazards. (Chapter 4), 1-4.
- Mesa, V. (2011). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Revista boletín ciencias de la tierra*, 1-14
- Nicholl, & Karnowsky. (2006). Laboratory apparatus for the demonstration of quicksand. *Journal of Geoscience Education*, 54:5,578-583
- Obermeier, S. (2005). Field Occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking. *Engineering Geology*, 2009-234.
- Santibañez. (2006). *Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar.(tesis de pregrado), Universidad Austral de Chile, Valdivia.*
- Sadrekarami. (2014). Static liquefaction analysis considering soil dilatancy. *Soil and foundations*, 54(5): 955-966.
- SCG. (2006). *Sociedad Colombiana de Geotecnia, NSR-*

10 Capítulo H10- Rehabilitación sísmica de edificios: Amenazas de origen sísmico geotécnico y reforzamiento de cimentaciones.

Vergel, G. (2010). *Metodología. Un manual para la elaboración de diseños y proyectos de investigación. Compilación y ampliación temática.* Barranquilla: Publicaciones Corporación UNICOSTA.