ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.31-41

Cálculo de la presión de poro de un medio marino granular usando el modelo analítico de Biot

Emmanuel Arcos Hernández[1]; Manuel Peralta Gutierrez[1] y Enrique García Trinidad[1]
[1] Tecnológico de Estudios Superiores de Huixquilucan, TECNM, División de Ingeniería.
Correspondencia: emmanuel.a.h@huxquilucan.tecnm.mx

Resumen

En el presente trabajo se muestra un análisis de la respuesta de la presión de un suelo poro-elástico inducida por la presión hidrostática de las ondas largas de agua. Para ciertas combinaciones de los parámetros físicos del suelo y del oleaje la presión de poro tiende a cero, en estas condiciones se identifica la profundidad de inestabilidad de suelo marino. Este fenómeno ha sido estudiado ampliamente en la literatura especializada en variables físicas, siendo complicado identificar las variables dominantes y que cambian significativamente la presión de poro. Por lo que la contribución del presente trabajo es desarrollar el modelo matemático adimensional y obtener parámetros adimensionales que agrupan las variables físicas del suelo y del oleaje. Los resultados muestran que las ondas largas presentan una mayor presión en el poro que ondas cortas. La frecuencia, la permeabilidad, porosidad y módulo de corte son otras variables que se deben tomar en cuenta para obtener cimentaciones seguras. El presente modelo matemático se validó con resultados de modelos analíticos reportados en la literatura especializada y la solución numérica del presente modelo matemático obteniendo una buena aproximación, en ambos casos.

Palabras clave: Licuefacción, Modelo matemático, Oleaje, Suelo poro-elástico, Adimensionalización.

Abstract

In this work is shown an analysis of the pressure response of a poro-elastic soil induced by hydrostatic pressure of long waves of water. For certain combinations of the physical parameters of the soil and the waves, the pore pressure tends to zero. Under these conditions, the depth of soil instability is identified. This phenomenon has been widely studied in the literature specialized in physical variables, being complicated to identify the dominant variables that significantly change the pore pressure, so the contribution of the present work is develop a dimensionless mathematical model and obtain dimensionless parameters that group the physical variables of the soil and the waves. The results show that long waves present greater pressure in the pore than short waves. Frequency, permeability, porosity and shear modulus are other variables that must be taken into account for obtain safe foundations. The present mathematical model was validated with results of mathematical models reported in

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.32-41

the specialized literature and numerical solution of present mathematical model obtaining a good approximation, in both cases.

Keywords: Liquefaction, Mathematical model, Water waves, Poro-elastic seabed, Dimensionless.

Introducción

El fenómeno de la interacción del oleaje con el fondo marino ha atraído la atención de ingenieros marítimos y geotécnicos en los años recientes. Comprender los mecanismos y procesos del problema de la interacción del oleaje con el suelo marino, es particularmente importante para el diseño de las cimentaciones de estructuras marítimas cuando éstas están sujetas a la hidrodinámica de oleaje, con alto contenido energético. Las condiciones de flujo alrededor de las estructuras, no solo afectan las fuerzas del oleaje que actúan sobre éstas, sino también pueden desarrollarse inestabilidades en el suelo del fondo marino Lundgren et al. (1989).

En las décadas pasadas, se han hecho esfuerzos considerables, dedicándose a estudiar el fenómeno de interacción oleaje-fondo marino-estructuras. La razón del incremento en el interés de estudiar este fenómeno es que muchas estructuras costeras (tales como paredes verticales, marinas, columnas de plataformas petroleras, tuberías, rompeolas, entre otras.) han presentado daños por la respuesta de la presión del poro del suelo marino inducida por el oleaje y no necesariamente por deficiencias constructivas.



Figura. 1. Inestabilidad de cimentaciones de plataformas petroleras.

En la figura 1, se muestra un ejemplo real de inestabilidad de cimentaciones de una plataforma petrolera, situada en el Golfo de México la cual se inclinó peligrosamente. El hundimiento de la plataforma petrolera fue causado por una combinación de factores, siendo uno de ellos la inestabilidad del suelo marino, dando como resultado el ladeo y hundimiento de la plataforma petrolera lo que resalta la importancia del buen diseño y cálculo de cimentaciones seguras de estructuras marinas y que son aspectos fundamentales para garantizar la seguridad, estabilidad, funcionalidad de las estructuras en entornos marinos inestables. Un enfoque principal en el proceso es para prevenir hundimientos, proteger la integridad estructural y promover prácticas operativas seguras en la industria petrolera.

Actualmente en la industria petrolera existen varias necesidades ingenieriles y nuevos requerimientos complejos en el análisis de la

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.33-41

respuesta de la presión de poro del suelo del mar para el diseño y construcción de anclajes seguros como se muestra en Summer et al. (2011). Para la estabilidad de conductos de petróleo que transportan el hidrocarburo desde aguas profundas hasta aguas someras, los ingenieros han considerado cuidadosamente factores como el diámetro, el grosor de la pared y la topografía submarina al diseñar y construir asegurando su capacidad para manejar eficientemente la presión y el flujo de gas. La instalación de los gasoductos se lleva a cabo con precisión superando obstáculos naturales en el fondo marino mediante técnicas especializadas de tendido y anclaje, ver figura 2.

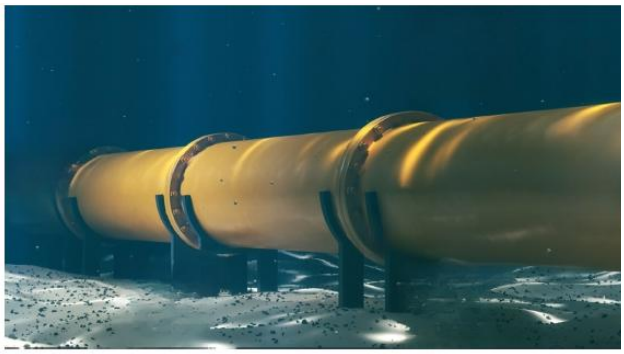


Figura 2. Oleoducto anclado en el fondo marino

Los anclajes deben ser seguros para asegurar que al presentarse la licuefacción del suelo el oleoducto no se mueva con el mismo movimiento del oleaje o cuando se presentan corrientes marinas. Para el diseño de cimentaciones seguras se requiere entender el comportamiento del fenómeno de licuefacción que a continuación se describe.

Licuefacción de suelos marinos: El suelo marino es considerado como un medio poroso saturado o parcialmente saturado, (contiene burbujas de aire) y puede ser cohesivo o no cohesivo. Desde una perspectiva formal, la licuefacción de un suelo no-cohesivo, es la transformación del suelo en estado sólido a un estado licuado, como una consecuencia del incremento de la presión de poro y la reducción de los esfuerzos efectivos, cuando se presenta la licuefacción el suelo pierde sus fuerzas estructurales, como se puede observar en la figura 3. La licuefacción se presenta cuando el oleaje se encuentra en un valle, en ese momento se lleva a cabo una descompresión instantánea del suelo marino y por lo tanto los esfuerzos efectivos tienden a cero.

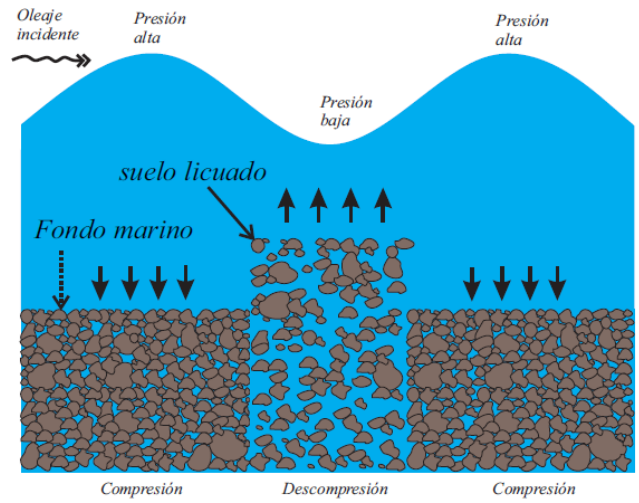


Figura 3. Descripción del fenómeno de licuefacción.

El principal factor que causa el fenómeno de la licuefacción en el medio granular, se debe al crecimiento excesivo de la presión de poro (Ps) y la reducción de los esfuerzos cortantes (τ) y efectivos (σ′z). Existen dos mecanismos

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.34-41

causantes de la acumulación de la presión excesiva en el poro, 1) cargas cíclicas debidas a un evento sísmico y 2) cargas dinámicas oscilantes del oleaje.

El estudio del fenómeno de la licuefacción está ligado a la comprensión de los siguientes fenómenos:

1. Mecanismos del suelo asumiéndolo seco.
2. El comportamiento del suelo completamente no drenado, saturado, considerando que no existe aire atrapado.
3. La condición de un suelo parcialmente saturado, sin drenar, tomando en cuenta la compresibilidad de la mezcla aire-agua en el poro; esta condición se presenta cuando existen burbujas de aire atrapadas.

Para determinar el potencial de licuefacción (competencia entre esfuerzos efectivos normales y la presión de poro), la literatura especializada, sugiere considerar la influencia que tiene la compresibilidad del fluido, el material sólido y la permeabilidad de la matriz porosa. La compresibilidad de la mezcla agua-aire en el poro genera una contracción del volumen de la masa, esto causa un incremento ligero de la presión en el poro y a su vez un ligero decremento del esfuerzo efectivo y de la resistencia al corte. En el caso de la dilatación del suelo, la compresibilidad de la mezcla agua-aire en el poro causa un suave decremento de la presión en el poro y un ligero crecimiento del esfuerzo efectivo y de la resistencia al corte. La pérdida de resistencia de carga del suelo, debida al tipo de presión que se presenta, puede generar inestabilidades en las cimentaciones de las estructuras marítimas, éstas pueden ser de dos tipos, por asentamiento y por asentamiento y corrimiento. Los órdenes de magnitud de los desplazamientos de suelos de estructuras reales son del orden de metros (Lundgren et al., 1989).

Fundamentos teóricos

Los trabajos pioneros en el estudio de los mecanismos que se presentan en materiales sujetos a cargas cíclicas, son la teoría poro-elástica de Biot. (1941). y la ecuación de Verruijt. (1969), estos investigadores desarrollaron tres teorías. 1) Teoría cuasi-estático (QS) la mezcla del fluido entre el poro y suelo se considera compresible, pero las aceleraciones relativas entre el fluido y el suelo se ignoran, esta hipótesis conduce a la ecuación de consolidación de biot, en la cual los términos inerciales asociados con la masa del suelo y el agua del medio poroso no son tomados en cuenta, 2) Aproximación parcialmente dinámica (*u-p*), las ecuaciones acopladas de flujo y deformación consideran la aceleración de la masa del suelo pero no la aceleración relativa del agua en el poro Zienkiewicz et al. (1980), y 3) teoría completamente dinámica (FD) en este caso las ecuaciones acopladas de flujo y deformación, son formuladas del tal forma, que involucran la aceleración relativa de la masa del suelo y del fluido en el medio poro-elástico. Basadas en estas

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.35-41

teorías, se desarrollaron modelos analíticos desde un punto de vista de la hidráulica marítima, a partir de la de década de los 70′s, para caracterizar la inestabilidad de un fondo marino, Yamamoto el at. (1978) usó teoría lineal del oleaje para estudiar la estabilidad del suelo granular isotrópico, poro-elástico, por otro lado Groot et al. (2006), identificó que la inestabilidad del suelo marino no es solo por grandes deformaciones también podría presentarse licuefacción por pasos sumándose deformaciones pequeñas del suelo marino. Debido a los requerimientos científicos otros trabajos en enfocan en modelos numéricos, Jeng et al. (2010) estudiaron la respuesta del suelo marino (presión de poro, esfuerzos efectivos y esfuerzos cortantes) afectado por una carga combinada oleaje-corriente marina, los resultados muestran el efecto que tiene la velocidad de la corriente marina en la respuesta del suelo marino poro-elástico. Posteriormente Cha et al. (2011), obtuvieron numéricamente el potencial de licuefacción, en un fondo marino poroso. Otros trabajos se enfocan en estudiar el suelo marino asumiendo que éste está formado por varias capas con características físicas diferentes. Otros trabajos se enfocan en realizar los trabajos de experimentación, en esta dirección Summer et al. (2011) demostraron que las rocas que sujetan las líneas de tuberías submarinas, son estables bajo el efecto de la carga hidrostática de ondas muy largas, pero pueden ser inestables al exponerse al movimiento del suelo licuado. Además, Liu et al. (2011) desarrollaron estudios paramétricos, experimentales para investigar los efectos de la longitud y periodo del oleaje, compresibilidad del fluido en el poro, permeabilidad del suelo y rigidez del medio granular deformable, los resultados fueron comparados con tres criterios distintos de licuefacción momentánea. Otros trabajos se enfocan en calcular el potencial máximo de licuefacción formulando el modelo matemático como un problema de valores propios e identifico la profundidad máxima de licuefacción del suelo marino, Arcos et al. (2017). Por otro lado, Cheng et al. (2020), estudiaron numéricamente la interacción de la rotura de oleaje con rompeolas compuesto y su efecto en el suelo marino. En paralelo, Qibo et al. (2020) describieron un estudio experimental realizado para investigar cómo las olas irregulares afectan las presiones de poro alrededor de un mono pilote en el lecho marino. El mono pilote es una estructura utilizada en ingeniería costera para soportar estructuras como plataformas petroleras o parques eólicos marinos. Los investigadores realizaron pruebas en un canal de ondas utilizando cinco tipos diferentes de oleaje irregular. Descubrieron que, a medida que la altura de las olas aumentaba, también lo hacía la presión del agua alrededor del mono pilote. Sin embargo, encontraron que la presión máxima del agua en el interior del suelo marino disminuye a medida que la profundidad aumenta. La distribución de la presión del agua cambia según dónde se ubique el

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.36-41

mono pilote y que tan profundo se encuentre del lecho marino, estos hallazgos tienen importantes implicaciones para el diseño de estructuras marinas y la ingeniería costera. Comprender cómo el oleaje irregular afecta las presiones de poro puede ayudar a diseñar estructuras más resistentes y seguras, reduciendo los riesgos de daños causados por las olas y mejorando la durabilidad de las instalaciones marinas.

Hasta el momento los estudios analíticos, numéricos y experimentales no se han determinado las variables características que afectan la presión del poro y es la aportación científica que tiene el presente trabajo, en el presente estudio se realiza una solución analítica adimensional que incluyen combinaciones de parámetros del oleaje y el suelo marino, logrando una mejor compresión de los mecanismos de licuefacción en términos de las variables físicas dominantes y que se deben de tomar en cuenta para desplantar estructuras seguras en el fondo del océano.

Materiales y métodos

La teoría de consolidación de biot se fundamenta en las siguientes consideraciones:

1. El material es isotrópico.
2. Existe linealidad en la relación esfuerzo-deformación.
3. Las deformaciones volumétricas son pequeñas.
4. El agua puede contener aire atrapado.
5. El flujo de agua que atraviesa el medio poroso obedece a la ley de Darcy.

Tomando en cuenta lo arriba señalado, las ecuaciones de equilibrio estático, Biot. (1941) son las siguiente

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \qquad (1),$$

y

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial z} = 0 \qquad (2).$$

Donde los ejes coordenados son x y z, Ps es la presión de poro, σ y τ son los esfuerzos totales y cortantes, respectivamente.

A partir de las ecuaciones estáticas de Biot, (1941) propuso las ecuaciones dinámicas considerando la relación σ = σ′ + Ps establecida por Verruijt. (1969) donde σ′ es el esfuerzo efectivo total, obteniendo las siguientes expresiones

$$\frac{\partial \sigma' x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = -\frac{\partial P_s}{\partial x} + \rho \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} \qquad (3),$$

y

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma' z}{\partial z} + \rho g = -\frac{\partial P_s}{\partial z} + \rho \frac{\partial^2 w_s}{\partial t^2} \qquad (4).$$

En las ecuaciones (3) y (4) la densidad media del fondo marino está dada por la siguiente relación $\rho_f n + \rho_s (1-n)$, donde ρ_f es la densidad del fluido, n es la porosidad, ρ_s es la densidad del sólido, en las mismas ecuaciones $\sigma' x$ y $\sigma' z$ son los esfuerzos efectivos en dirección x y dirección z , respectivamente, g es la aceleración de la gravedad y las variables u_s y w_s son los desplazamientos del suelo en dirección horizontal y vertical.

Considerando deformaciones lineales, los esfuerzos efectivos se relacionan con las

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.37-41

deformaciones mediante la ley de Hooke, en la forma siguiente

$$\sigma' x = 2G\left(\frac{\partial u_s}{\partial x} + \upsilon\frac{\varepsilon_s}{1-2\upsilon}\right) \qquad (5),$$

$$\sigma' z = 2G\left(\frac{\partial w_s}{\partial z} + \upsilon\frac{\varepsilon_s}{1-2\upsilon}\right) \qquad (6),$$

$$\tau_{xz} = G\left(\frac{\partial u_s}{\partial z} + \frac{\partial w_s}{\partial x}\right) \qquad (7),$$

y

$$\varepsilon_s = \frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial x} \qquad (8).$$

Donde G es el módulo de corte del suelo, υ es la razón de Poisson y ε_s es la deformación volumétrica que se debe a que los granos son impulsados por las fuerzas verticales y horizontales del oleaje, que ocasiona un reacomodamiento entre granos, su representación física se muestra en la Fig. 4.

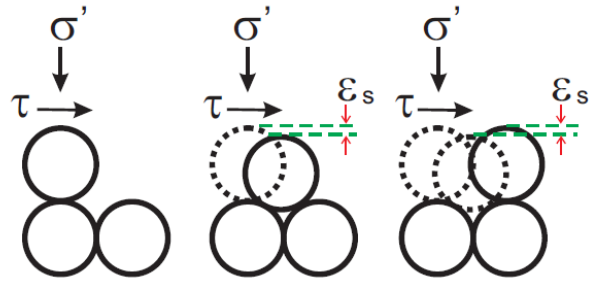


Figura 4. Contracción y dilatación volumétrica debido al reacomodamiento del sedimento

En la misma figura se observa que el valor de la deformación volumétrica ε_s es función de los esfuerzos cortantes τ y los esfuerzos efectivos σ'. Sustituyendo las ecuaciones (5)-(8) en (3) y (4) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales

$$G\nabla^2 u_s + \frac{G}{1-2\upsilon}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} = -\frac{\partial P_s}{\partial x} + \rho\frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} \qquad (9),$$

$$G\nabla^2 w_s + \frac{G}{1-2\upsilon}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} = -\frac{\partial P_s}{\partial x} + \rho\frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} \qquad (10),$$

y

$$k_s\nabla^2 P_s - \gamma_w n\beta\frac{\partial P_s}{\partial t} + \rho_f k_s\frac{\partial^2 \varepsilon_s}{\partial t^2} = \gamma_w\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} \qquad (11).$$

donde k_s es la permeabilidad de Darcy del suelo poroso, el término β corresponde a la compresibilidad del agua en los poros y se representa como

$$\beta = \left(\frac{1}{K_f} + \frac{(1-S_r)}{P_{w0}}\right) \qquad (12).$$

donde K_f es el modulo de compresibilidad del agua en los poros, S_r equivale al grado de saturación del fondo marino, P_{w0} es la presión absoluta estática. En el presente trabajo se usa el modelo matemático previamente explicado para el cálculo de la presión de poro como se explica a continuación.

Modelo Matemático

El modelo físico en estudio se muestra en la Fig. 5, en ésta el eje z es positivo en el sentido vertical, con origen en la interfaz agua del mar-medio poro-elástico y el eje horizontal x es positivo hacia la derecha. En este trabajo se considera que el oleaje incidente corresponde a ondas largas lineales de longitud λ y amplitud A_I. El oleaje se propaga de izquierda a derecha sobre un suelo poroso de profundidad semi-infinita. La profundidad media y uniforme del agua es *h*. En el modelo físico, el medio poroso y el suelo impermeable se identifican por regiones café (medio poroso) y grises (suelo impermeable), respectivamente. Se asume que el suelo poroso es

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.38-41

un medio poroso deformable y que está compuesto de una mezcla de tres fases. Una fase sólida formada por el medio granular, una fase líquida que ocupa la mayor parte del espacio poroso y una fase gaseosa que a veces ocupa una pequeña porción del espacio poroso. El medio granular y el fluido en el poro (incluyendo tanto el líquido como el gas) pueden considerarse juntos como un medio compresible.

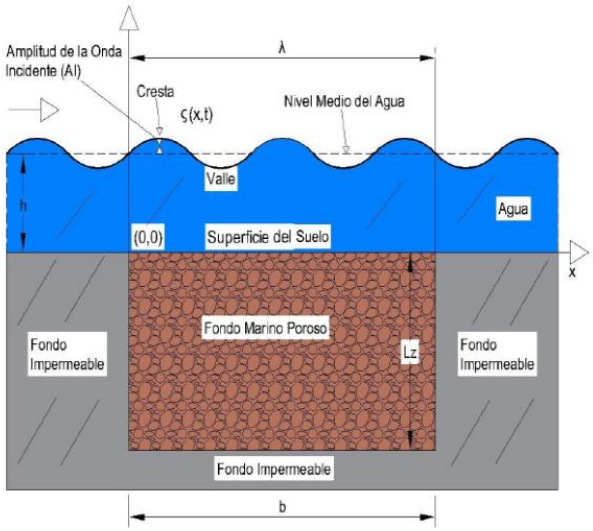


Figura 5. Vista en perfil del modelo físico en estudio.

La deformación del suelo marino se lleva a cabo por la competencia entre la presión de poro y el esfuerzo efectivo del suelo marino y su análisis se lleva a cabo mediante las ecuaciones de Biot. (1941) y Zienkiewics et al. (1980). A continuación, se presentan estos modelos matemáticos en su forma adimensional.

Solución Analítica

La Aproximación (*u-p*), para medios poro-elásticos puede reducirse a un problema de valores en la frontera, asumiendo que las variables dependientes tengan una oscilación armónica, con frecuencia igual a la del oleaje, en estas condiciones las ecuaciones de gobierno transitorias del suelo marino pueden plantearse como un problema de valores de frontera lineal, Zienkiewicz et al (1980). En este contexto y combinando las ecuaciones (9)-(11) se obtiene una ecuación diferencias en términos de la presión de poro.

Para determinar la presión del poro del medio permeable se lleva a cabo usando las ecuaciones en su forma adimensional como sigue,

$$\frac{d^4\hat{P}_s}{d\bar{Z}^4} + i\beta_0 \frac{(\Gamma-\psi\alpha-\alpha)}{(1+\psi)} \frac{d^2\hat{P}_s}{d\bar{Z}^2} - i\frac{{\beta_0}^2 4\pi^2\Gamma}{(1+\psi)}\hat{P}_s \qquad (13)$$

donde los parámetros adimensionales son $\beta_0 = Lz/\lambda$, Lz es la profundidad de licuefacción, λ es la longitud de onda, $\Gamma = \gamma_w\omega\lambda^2/Gk_s$, ω es la frecuencia del oleaje y γ_w es el peso especifico del agua, $\psi = 1/1-2v$ y $\alpha = \gamma_w n\beta\omega\lambda^2/k_s$.

La Ecuación (13) es una ecuación diferencial lineal de cuarto orden las cuales necesita cuatro condiciones de frontera para poderse resolver y son las siguientes condiciones de frontera

$$\hat{P}_s = 1 \qquad \bar{Z} = 0 \qquad (14)$$

$$\frac{d\hat{P}_s}{d\bar{Z}} = 0 \qquad \bar{Z} = 0 \qquad (15)$$

$$\hat{P}_s = 0 \qquad \bar{Z} = -1 \qquad (16)$$

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.39-41

$$\frac{d\hat{P}_s}{d\bar{Z}} = 0 \qquad \bar{Z} = -1. \qquad (17)$$

La solución de la (13) y sus condiciones de frontera (14)-(17) se lleva a cabo utilizando la ecuación exacta desarrollada por Zienkiewicz et al. (1980).

Resultados y discusión

La solución analítica de la (13) se comparó con la solución numérica y se observa una buena aproximación en ambos resultados, ver Fig. 6.

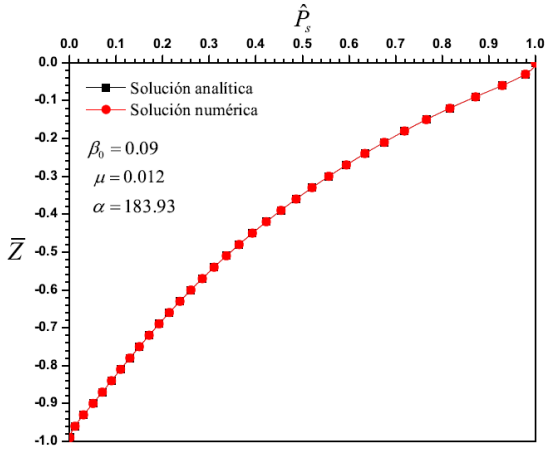


Figura 6. Comparación de la solución analítica contra la solución numérica de la presión de poro $\hat{P}_s$ a lo largo de la profundidad del suelo marino $\bar{Z}$.

En la misma gráfica se observa la propagación de la presión de poro $\hat{P}_s$ a lo largo del fondo marino para valores de $\beta_0 = 0.09$, $\mu = 0.012$, α =183.93, se observa que el máximo valor de $\hat{P}_s$ se presenta en la interfaz oleaje-fondo marino donde $\bar{Z} = 0$ y $\hat{P}_s = 1$ y conforme aumenta el espesor del suelo, la presión de poro $\hat{P}_s$ decrece conforme $\bar{Z} \to 1$. Esto quiere decir que en la interfaz oleaje-fondo marino se presenta una mayor presión de poro lo cual el suelo tiene una mayor probabilidad de presentarse licuefacción, por otro lado, conforme aumenta el espesor del suelo la presión de poro disminuye y los esfuerzos efectivos aumentan logrando mayor estabilidad del suelo.

A. Aportación Científica

Una de las principales aportaciones del trabajo es resolver el modelo matemático adimensional e identificar los parámetros físicos dominantes en la solución del modelo matemático.

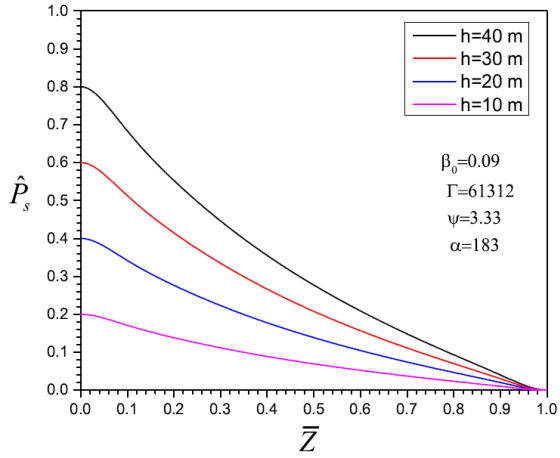


Figura 7. Distribución de la presión del poro para diferentes profundidades del agua del mar.

En la figura 7 Se muestra la distribución de la presión de poro $\hat{P}_s$ a lo largo del fondo $\bar{Z}$, en la misma figura se muestra el efecto que tiene la profundidad h desde la superficie libre del agua hasta fondo del suelo del océano para los valores de los parámetros adimensionales $\beta_0 = 0.09$, $\Gamma = 61312$, $\psi = 3.33$, $\alpha = 183$. Se observa que conforme aumenta el valor de la profundidad del agua también aumenta la presión de poro, es

Recibido: 14 de marzo de 2026. Aceptado: 22 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.40-41

decir, para profundidades de h = 40 m se tiene una presión de poro adimensional de $\hat{P}_s = 0.8$, y para valores de h = 10m se tiene una presión de poro $\hat{P}_s = 0.2$. Estos resultados demuestran la importancia que tiene la carga hidrostática con respecto a la respuesta de suelo marino

Conclusiones

En el presente trabajo, se determinó una solución analítica del modelo matemático adimensional parcialmente dinámico (u-p) para calcular la presión de poro a lo largo del suelo marino. Los resultados muestran el comportamiento de la presión de poro como función de los parámetros que agrupan las propiedades del oleaje y el suelo marino. Con base a los resultados analíticos obtenidos se concluye:

La propagación de la presión de poro es fuertemente afectada por el parámetro $\beta_0 = Lz/\lambda$. Esto es porque la longitud de onda depende de la celeridad, la cual es una función de la profundidad del agua, es decir conforme aumenta la longitud de onda, crece la profundidad del agua y se tiene una mayor carga hidrostática en la interfaz oleaje-suelo marino.

El parámetro α también tiene un efecto considerable en la distribución de la presión de poro $\hat{P}_s$, ya que es un parámetro que agrupa la permeabilidad del suelo k_s, la longitud de onda λ, el modulo de corte G , la porosidad n y la frecuencia del oleaje ω.

La presente solución puede ser utilizada en primera aproximación para identificar los variables físicas que se deben de tomar en cuenta en el diseño de cimentaciones de estructuras situadas en lechos marinos de arenas finas parcialmente saturadas.

1. Arcos, E., Bautista, E., & Méndez, F. (2017). *Dynamic response of a poro-elastic soil to the action of long water waves: Determination of the maximum liquefaction depth as an eigenvalue problem*. *Journal of Applied Ocean Research*, 67, 213–224.
2. Biot, M. A. (1941). *General theory of three-dimensional consolidation*. *Journal of Applied Physics*, 12(2), 155–164. http://dx.doi.org/10.1063/1.1712886
3. Cha, D., Zhang, H., & Blumenstein, M. (2011). *Prediction of maximum wave-induced liquefaction in porous seabed using multi-artificial neural network model*. *Ocean Engineering*, 38, 878–887.
4. Cheng, L., Hualing, Z., & Pandhi. (2020). *Physical modelling of combined waves and current propagating around a partially embedded monopile in a porous seabed*. *Journal of Applied Ocean Research*, 205, 1–20.
5. Groot, M. B., Kudela, M., Meijers, P., & Oumeraci, H. (2006). *Liquefaction phenomena underneath marine gravity structures subjected to wave loads*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, 325–335.
6. Jeng, D. S., Zhou, X. D., Luo, J. H., Wang, Z., Zhang, X., & Gao, F. (2010). *Response of porous seabed to dynamic loadings*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 41, 46–58.
7. Liu, B., Jeng, D. S., Ye, D., & Zhou, Y. (2015). *Laboratory study for pore pressure in sandy*

deposit under wave loading. *Ocean Engineering*, 106, 207–219.

8. Lundgren, H., Lindhardt, C., & Romold, F. (1989). *Stability of breakwater on porous foundation*. In *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 451–454).
9. Polyanin, A., & Saizev, F. (2002). *Handbook of exact solutions for ordinary differential equations* (2nd ed.). Chapman & Hall. p. 666.
10. Qibo, Z., Hualing, Z., Pandi, Shaohua, W., & Duanb, L. (2020). *Experimental study on irregular wave-induced pore-water pressures in a porous seabed around a monopile*. *Journal of Applied Ocean Research*, 95, 1–14.
11. Summer, F. H., Dixen, & Fredsoe, J. (2011). *Stability of submerged rock berms exposed to motion of liquified soil in waves*. *Ocean Engineering*, 38, 849–859.
12. Verruijt, A. (1969). *Elastic storage of aquifers*. En *Flow Through Porous Media*. Academic Press.
13. Yamamoto, T. H., Sellmeijer, H., & Hijum, E. V. (1978). *On the response of a poro-elastic bed to water waves*. *Journal of Fluid Mechanics*, 87, 193–206.
14. Zienkiewicz, O. C., Chang, C., & Bettess. (1980). *Drained, undrained, consolidating and dynamic behavior assumptions in soil*. *Géotechnique*, 30, 385–395.