

## **Evolución del oleaje: Transformación desde aguas profundas hasta la costa**

David Humberto Segura Quiroz, Cindy Casas Valencia y Karina Griselda Ocaña Espinosa de los Monteros

Investigadores de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte

[dsegura@imt.mx](mailto:dsegura@imt.mx); [ccasas@imt.mx](mailto:ccasas@imt.mx) [dservin@imt.mx](mailto:dservin@imt.mx); [kocana@imt.mx](mailto:kocana@imt.mx)

### **R e s u m e n**

"Evolución del oleaje: Transformación desde aguas profundas hasta la costa" expone cómo las olas, al desplazarse desde aguas profundas hacia la costa, experimentan una serie de fenómenos que alteran sus características físicas. Estos fenómenos incluyen el asomeramiento o shoaling, la refracción, la difracción, la reflexión y la rotura.

El shoaling se refiere a la disminución de la velocidad y la longitud de onda de las olas al entrar en aguas menos profundas, lo cual usualmente incrementa la altura de las olas. La refracción sucede cuando el frente de onda cambia de dirección debido a variaciones en la profundidad, resultando en la alineación de las ondas con las líneas batimétricas. La difracción permite que las ondas rodeen obstáculos y se propaguen en patrones circulares, distribuyendo su energía. La reflexión ocurre cuando las olas chocan con barreras que no absorben completamente su energía, resultando en la creación de ondas reflejadas. Finalmente, la rotura se manifiesta cerca de la costa, transformando el movimiento oscilatorio del agua en un desplazamiento significativo, lo que disipa la energía del oleaje.

Estos fenómenos no solo afectan la dinámica del oleaje, sino también la ingeniería y el manejo costero. Comprender estos procesos es esencial para diseñar infraestructuras marítimas y gestionar de manera sostenible las zonas costeras, considerando la relación entre el oleaje y la erosión, sedimentos y estructuras costeras.

El conocimiento en esta área se basa en una amplia literatura científica que abarca manuales y estudios de caso, incluyendo guías de pronóstico y análisis de oleaje, y proporciona una base para evaluar el impacto del oleaje en las costas y el diseño de intervenciones ingenieriles.



**Figura 1. Efectos causados por el oleaje.**

Fuente: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-63-Procesos-costeros-que-experimenta-el-oleaje-al-sentir-el-fondo-Adaptado-de\\_fig10\\_338372298](https://www.researchgate.net/figure/Figura-63-Procesos-costeros-que-experimenta-el-oleaje-al-sentir-el-fondo-Adaptado-de_fig10_338372298)

## Difracción

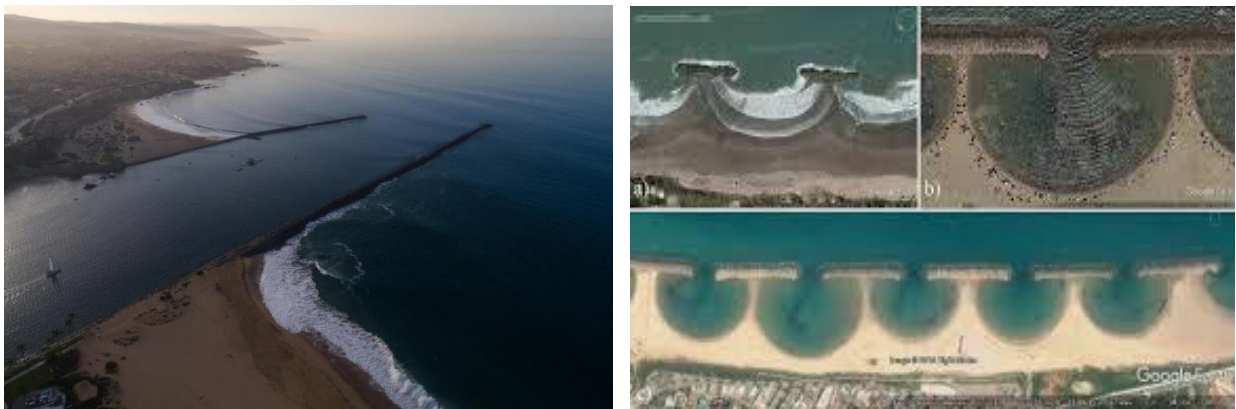
La difracción del oleaje es un fenómeno complejo y fundamental para entender la interacción entre las fuerzas oceánicas y las estructuras costeras. Este proceso se manifiesta cuando las ondas marinas se distribuyen y se expanden al encontrarse con límites geográficos o estructuras físicas que alteran su propagación natural. Análogamente a la refracción, que cambia la dirección de las olas a través de gradientes de profundidad, la difracción ocurre cuando las olas enfrentan obstáculos que cambian su recorrido original, permitiéndolas rodear las barreras y continuar su avance.

En la práctica, al enfrentar un obstáculo, los frentes de onda se dispersan dando lugar a patrones circulares tras el objeto, reflejando una propagación más amplia de energía que provoca una reducción en la altura de las olas. Esta dispersión de energía es crucial en la función de reducir la agitación en áreas portuarias, ya que ayuda a crear condiciones más calmadas para la maniobra y el atraque de embarcaciones. Sin embargo, mientras que es ventajoso en un contexto portuario, cuando se presentan en costas abiertas, estas características pueden resultar menos favorables. Las estructuras humanas, como los diques, a menudo replican en parte los efectos de la difracción, alterando potencialmente la ecología y geomorfología de las playas cercanas.

A medida que las olas se aproximan a regiones con menor profundidad y enfrentan barreras físicas, ocurre una redistribución lateral de energía conocida como difracción. Este fenómeno facilita la creación de subgrupos de olas en áreas que están resguardadas por estas barreras. Un claro ejemplo es el de las olas que pasan a través

de aperturas en rompeolas, que luego pueden diseminarse y cubrir toda la bahía ubicada detrás de dichas estructuras. Esto resalta con claridad cómo la difracción afecta la dinámica del entorno costero al modificar la forma en que la energía oceánica impacta las costas.

El estudio de la difracción es vital en la planificación y diseño de infraestructuras costeras, donde la gestión controlada de la energía del oleaje puede ser utilizada para mitigar el impacto erosivo sobre las costas, así como para garantizar la seguridad y operatividad de instalaciones humanas frente a las fuerzas del océano. Mediante el análisis detallado de este fenómeno, ingenieros y científicos pueden predecir mejor cómo una determinada estructura afectará las condiciones marinas locales y ajustar sus diseños en consecuencia para optimizar el balance ecológico y funcional de las zonas costeras.



**Figura 2. Ejemplo de difracción y refracción en un mismo lugar; Fenómeno de difracción en playa.**

Fuente: Jeremiah Klein. <https://www.surflife.com/surf-news/que-es-la-refraccion-y-la-difraccion/13066> y [https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-6-Difraccion-de-ondas-a-traves-de-una-abertura-a-Mar-del-Plata-Argentina\\_fig2\\_329845040](https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-6-Difraccion-de-ondas-a-traves-de-una-abertura-a-Mar-del-Plata-Argentina_fig2_329845040)

## Refracción

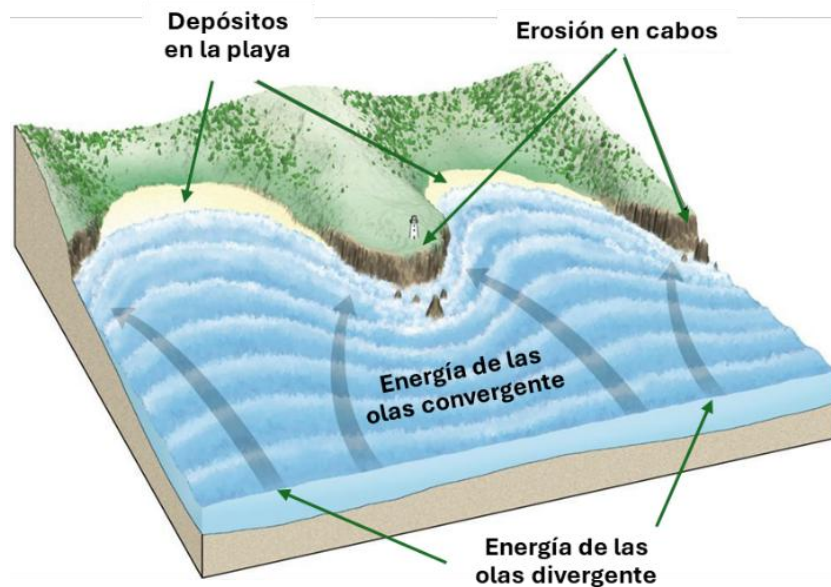
La propagación del oleaje, representada por la fórmula  $C \text{ (m/s)} = L \text{ (m)} / T \text{ (s)}$ , es profundamente influenciada por la profundidad del agua. Esta relación describe cómo, a medida que las olas se desplazan a través de columnas de agua más profundas, lo hacen a una velocidad más rápida si el período permanece constante. En situaciones donde un frente de onda atraviesa áreas de profundidad variable, se introduce una distorsión en el frente de onda. Esto es consecuencia de que los segmentos ubicados en aguas más profundas se desplacen a mayor velocidad en comparación con aquellos en aguas menos profundas, lo que ejemplifica el principio de la refracción del oleaje.

La refracción se caracteriza por la capacidad de los frentes de onda para alinearse paralelamente a las batimétricas. Es decir, las ondas tienden a concentrar su energía en prominencias costeras, como cabos, y disminuyen su intensidad en áreas protegidas, como golfos o bahías. Este fenómeno puede manifestarse incluso bajo una batimetría paralela, siempre y cuando el frente de onda impacte con las líneas batimétricas en un ángulo específico. El asomeramiento "puro" ocurre cuando no hay refracción, normalmente si los frentes de onda y las batimétricas están perfectamente coincidentes.

El análisis de la refracción del oleaje es de vital importancia para el diseño y la ubicación de infraestructuras marítimas como puertos y rompeolas. Este estudio permite evaluar con precisión la agitación que el oleaje podría causar en las instalaciones portuarias, planificar de manera óptima las operaciones de dragado, y desarrollar medidas de protección costera adecuadas para mitigar la erosión de forma efectiva.

A nivel detallado, estudiar la refracción proporciona información crítica sobre la ubicación y altura de las olas en puntos específicos cuando el frente de onda pasa por profundidades variables. También ayuda a predecir cambios críticos en la dirección de propagación del oleaje, que resultan en la convergencia o divergencia de energía a medida que las olas se aproximan a la costa.

La comprensión de estos fenómenos no solo es crucial desde una perspectiva de ingeniería y geofísica, sino que también desempeña un papel fundamental en la dinámica costera, afectando el transporte de sedimentos y, en última instancia, la configuración del paisaje litoral. Las estrategias de diseño y gestión costera dependen del entendimiento de la refracción para asegurar un manejo sostenible de los recursos y ecosistemas costeros. Fundamentar estas prácticas en una sólida comprensión científica asegura que las medidas de intervención sean eficientes y ecológicamente responsables.



**Figura 3. Ejemplos de refracción en playa.**

Fuente: <https://magazine.todosurf.com/magazine/surf/la-refraccion-del-oleaje-y-su-efecto-en-el-surf/> y <https://view.genially.com/65c68f37ef2a890015197d5a/interactive-content-ciclo-de-vidas-de-las-olas>

## **Rotura**

Los eventos de rotura de oleaje son fenómenos frecuentemente observados en las proximidades de la línea costera. Su dinámica es crucial, pues transforman el movimiento oscilatorio del agua, característico de las olas en alta mar, en un desplazamiento más lineal y significativo al llegar a la costa. Durante este proceso, cuando las olas impactan la costa o encuentran obstáculos, se produce una completa disipación de la energía que transportan, lo cual puede dar lugar a importantes cambios en la morfología litoral y afectar las estructuras costeras.

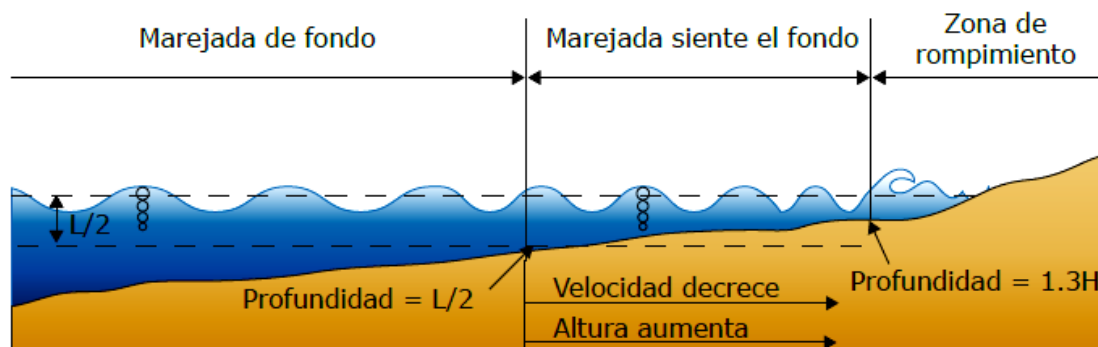
En un entorno natural, la línea de rotura es el punto preciso a lo largo de la costa donde un oleaje determinado rompe. Esta línea se define mediante parámetros específicos propios del oleaje en cuestión, tales como altura de ola ( $H$ ), período ( $T$ ), dirección de

propagación (D), y longitud de onda (L). Debido a la dinámica particular de cada evento de oleaje, esta línea es exclusiva para cada situación. La región comprendida entre la línea de rotura y la costa, donde el agua interactúa con la tierra, es conocida como la "zona de rompientes" o "Surf-Zone", y es aquí donde las fuerzas del oleaje impactan directamente sobre los sedimentos y las estructuras costeras.

Los rompeolas, estructuras diseñadas para enfrentar directamente las olas entrantes, juegan un papel crucial en la gestión costera. Mediante el control de las roturas y la disipación de energía, estas construcciones crean áreas de aguas tranquilas detrás de ellas, permitiendo realizar operaciones portuarias de manera más segura. El diseño y ubicación de rompeolas requieren un análisis meticuloso de las condiciones locales de oleaje para asegurar que las roturas ocurran de manera controlada y anticipada.

Para predecir la profundidad exacta donde ocurrirá la rotura de un oleaje, existen una variedad de fórmulas y métodos analíticos. Aunque este fenómeno está influenciado por múltiples variables, incluyendo la pendiente del fondo marino y la variabilidad del oleaje, las investigaciones y los modelos numéricos suelen enfocarse en un conjunto reducido pero esencial de parámetros que permiten caracterizarlo con suficiente precisión. Estos parámetros suelen incluir factores como la altura y el periodo del oleaje, así como la profundidad del agua y la pendiente del fondo en el área de estudio.

- d: profundidad en el punto de rotura,
- H: altura de la ola en el punto de rotura (denominada también  $H_b$ ),
- T: periodo del oleaje al momento de la rotura,
- L: longitud de onda al momento de la rotura, vinculada con H y T según las fórmulas pertinentes,
- m: pendiente del fondo en la zona de rotura.



**Figura 4. Ejemplo de fenómeno de rotura.**

Fuente: Calero et al. 2004.

Tal comprensión del fenómeno de rotura del oleaje no solo es importante para el diseño de infraestructura marítima y la planificación urbanística costera, sino también para la protección de los ecosistemas litorales, ya que influye directamente en la sedimentación y erosión costera. La investigación continúa en nueva tecnología y enfoques para modelizar estos procesos con una precisión aún mayor, lo que contribuirá a mejorar la resiliencia de la infraestructura costera frente a los desafíos planteados por el cambio climático y el aumento del nivel del mar.

Un ejemplo destacado es la formación de barras de arena en Outer Banks, Carolina del Norte, donde la rotura de las olas facilita el transporte de sedimentos, generando barras dinámicas que influyen en la navegación local.



**Figura 5. Fenómeno de rotura en playa**

Fuente: [https://weather.com/es-US/espanol/travel/news/nueva\\_isla\\_north\\_carolina](https://weather.com/es-US/espanol/travel/news/nueva_isla_north_carolina)

### **Asomeramiento o shoaling**

El fenómeno del asomeramiento, conocido en inglés como shoaling, es un proceso crítico en la dinámica del oleaje que ocurre a medida que las ondas generadas en aguas profundas se desplazan hacia la costa. Durante su viaje desde su punto de origen, estas ondas experimentan una atenuación y alteraciones significativas en sus características físicas. Al encontrarse con un gradiente cada vez menor de profundidad al acercarse a la costa, el lecho marino comienza a influir más intensamente en el comportamiento del oleaje.

Este cambio en la interacción entre las ondas y el lecho marino resulta en una reducción de la velocidad de propagación de las ondas y una acortación de su longitud de onda. Una de las consecuencias más destacadas de este proceso es el aumento en la altura de las olas a medida que ganan empinamiento. Este efecto es lo que se conoce como

asomeramiento. Las olas, al tener que desplazarse por un medio más somero, concentran su energía verticalmente, lo que, en muchos casos, contribuye a un incremento en su altura que puede tener implicaciones significativas para las regiones costeras.

Aunque el shoaling es un proceso continuo que afecta a gran parte del oleaje que llega a las costas, los tsunamis representan un ejemplo extremo de este fenómeno. Los tsunamis se generan por eventos sísmicos bajo el agua y, en mar abierto, pueden tener una altura muy baja, haciéndolos difícilmente perceptibles. Sin embargo, a medida que estas ondas de larga longitud se aproximan a la costa, el drástico cambio en la profundidad da lugar a un asomeramiento agudo. Como resultado, la altura de la ola puede incrementarse de forma espectacular al llegar a tierra, aumentando el potencial de devastación en las zonas costeras.

Comprender el asomeramiento es esencial para anticipar los impactos del oleaje en las costas y desarrollar estrategias efectivas de mitigación, ya sea para la construcción de infraestructuras resistentes al oleaje o en la elaboración de planes de emergencia y evacuación frente a eventos de tsunami. La capacidad de modelar y predecir cómo las olas de diferentes períodos y energías experimentarán shoaling proporciona datos relevantes para la gestión costera sostenible, así como para minimizar los daños asociados con eventos de alta energía en los ecosistemas y comunidades litorales.



**Figura 6. Fenómeno de asomeramiento o shoaling.**

Fuente: Imágenes de Google.

## **Reflexión**

La reflexión del oleaje es un fenómeno crucial tanto para la comprensión de la dinámica costera como para el campo de la ingeniería marítima. Este proceso ocurre cuando las olas chocan contra estructuras o características geográficas como rompeolas, acantilados u otras construcciones costeras que no pueden absorber completamente la energía del oleaje incidente. En estas circunstancias, parte de la energía del oleaje, en lugar de dispersarse o dejarse atrás, se refleja creando un nuevo conjunto de olas. Este

tren de ondas reflejadas se propaga en una dirección que contradice la del oleaje original, introduciendo complejidades adicionales en la dinámica local del agua y el flujo de sedimentos.

Este fenómeno de reflexión puede tener efectos tanto beneficiosos como perjudiciales sobre las estructuras y costas afectadas. Mientras que, por ejemplo, los rompeolas están diseñados para proteger puertos creando ondas reflejadas que ayuden a calmar las aguas en sus cercanías, la reflexión incontrolada también puede acarrear problemas. Estas condiciones pueden exacerbar la erosión costera y aumentar la tensión sobre estructuras construidas, incrementando la necesidad de mantenimiento y reparación.

Un caso icónico que ilustra la potencia de la reflexión del oleaje es el Malecón de La Habana, en Cuba. Este famoso paseo marítimo se enfrenta al Mar Caribe y, durante las tempestades, las olas reflejadas pueden alcanzar alturas impresionantes, agravando su influencia sobre el malecón mismo. Este impacto sostenido ha resultado en daños perceptibles que requieren reparaciones constantes, sirviendo como un potente recordatorio de la energía inherente al oleaje y la necesidad de considerar cuidadosamente la reflexión en el diseño y mantenimiento de infraestructuras costeras.

El estudio y modelado de la reflexión del oleaje es esencial para el diseño informado de infraestructuras costeras capaces de soportar eventos costeros extremos mientras minimizan impactos negativos como la erosión o daños estructurales. Abordar estos fenómenos con una comprensión precisa permite a ingenieros y tomadores de decisiones establecer medidas de mitigación adecuadas, garantizando la resiliencia de estructuras e infraestructuras en la zona costera.



**Figura 6. Fenómeno de reflexión.**

Fuente: <https://depositphotos.com/mx/photo/waves-of-the-malecon-in-havana-cuba-192535328.html>

## **Conclusiones**

El comportamiento del oleaje al interactuar con la costa y varios tipos de obstáculos naturales y artificiales está gobernado por una serie de fenómenos complejos que son fundamentales tanto para la ciencia como para la ingeniería marítima. Estos fenómenos críticos, que incluyen el asomeramiento o shoaling, la refracción, la reflexión, la difracción y la rotura, modifican las características del oleaje de manera única, influyendo en cómo impactan las estructuras costeras y moldean los litorales.

El shoaling es un fenómeno en el que las olas, al moverse hacia aguas menos profundas, sufren cambios en su velocidad y altura. Esta alteración es consecuencia del creciente efecto del lecho marino en las propiedades dinámicas del oleaje. Este proceso es crucial para comprender cómo las olas se transforman al acercarse a la orilla, especialmente en relación con su capacidad para causar erosión, inundaciones y otros efectos costeros. El shoaling también puede intensificar olas en determinadas condiciones, presentando riesgos y oportunidades para actividades humanas, desde el surf hasta la gestión portuaria.

Por otro lado, la refracción se manifiesta cuando el frente de onda se distorsiona debido a las variaciones en la profundidad del agua, orientando las olas para que se alineen con las líneas batimétricas. Este realineamiento puede concentrar la energía de las olas en ciertas áreas, como cabos, mientras reduce su impacto en otras como bahías y golfos. La refracción es un factor crítico a considerar en el diseño y ubicación de infraestructuras, ayudando a anticipar áreas de riesgo y necesidad de protección.

La difracción involucra la capacidad del oleaje para circunnavegar obstáculos, permitiendo que el frente de onda continúe propagándose más allá de dichas barreras en direcciones novedosas. Es particularmente relevante cerca de estructuras construidas como rompeolas, donde el entendimiento de la difracción puede ayudar a diseñar eficientemente para maximizar la protección de áreas portuarias.

El fenómeno de rotura, que ocurre cuando la energía del oleaje se disipa al encontrarse con la orilla, es fundamental para la transferencia de energía a la zona costera, lo que afecta significativamente el transporte de sedimentos. Este proceso no solo es responsable de la formación de la típica espuma blanca de las olas rompientes, sino que también juega un rol crucial en la erosión costera y el relleno de playas.

Finalmente, la reflexión es un proceso que se desata cuando las olas se encuentran con barreras que no absorben toda su energía. Las ondas reflejadas que se generan durante esta interacción no solo afectan el comportamiento del oleaje aguas arriba, sino que también modelan la dinámica del frente de onda, complicando la predicción del impacto del oleaje en estructuras y litorales.

El dominio y comprensión detallada de estos procesos son absolutamente indispensables para la gestión efectiva de las costas y la ingeniería marítima moderna. Analizar estas interacciones permite a los ingenieros y gestores costeros evaluar el potencial impacto del oleaje sobre costas y estructuras, facilitando la planificación y diseño de medidas de protección costera robustas y adaptativas. Al basar estrategias en un conocimiento profundo de estos fenómenos, se puede fortalecer la seguridad de infraestructuras críticas, mejorar la resiliencia costera, y prevenir la acelerada erosión de litorales, asegurando la sostenibilidad de los ecosistemas y comunidades costeras.

### ***Referencias Bibliográficas***

- Brown, E., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D., & Wright, J. (2005). *\*Waves, tides and shallow-water processes\** (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Coastal Engineering Manual (CEM) (Change 2). (2008). U.S. Army Corps of Engineers.
- Datawell BV. (n.d.). *\*Datawell Waverider: Manual de usuario DWR-7-MkIII 0.7 m\**. Laboratory for Instrumentation.
- EurOtop. (2018). *\*Manual on wave overtopping of sea defences and related structures\** (2nd ed.).
- Goda, Y. (2010). *\*Random seas and design of maritime structures\** (3rd ed.). Advanced Series on Ocean Engineering, 33.
- Medina, J. R. (2007). *\*Apuntes asignatura de Puertos y Costas\**. Universidad Politécnica de Valencia.
- Secretariat of the World Meteorological Organization. (1998). *\*Guide to wave analysis and forecasting\**. Geneva, Switzerland.
- Silva Casarín, R. (2005). *\*Análisis y descripción estadística del oleaje\**. Serie de docencia, Instituto de Ingeniería UNAM.
- Tucker, M. J., & Pitt, E. G. (2001). *\*Waves in ocean engineering\**. Elsevier Ocean Engineering Book Series, Vol. 5.