

AVANCES TECNOLÓGICOS EN LA MEDICIÓN Y MONITOREO DEL OLAJE

David Humberto Segura Quiroz, Cindy Casas Valencia y José Angel Hernandez Peña

dsegura@imt.mx, ccasas@imt.mx, Angel.Pena@imt.mx

INTRODUCCIÓN

En una era donde los océanos juegan un papel crucial en la economía global, la tecnología de medición y monitoreo del oleaje se ha convertido en una herramienta fundamental para garantizar la seguridad y la sostenibilidad en nuestras aguas. Desde la navegación segura de embarcaciones hasta la protección de comunidades costeras frente a desastres naturales, el monitoreo continuo del oleaje ofrece datos imprescindibles para la toma de decisiones. Las innovaciones tecnológicas que nos permiten medir con precisión el oleaje, tales como las boyas avanzadas y los satélites de última generación, y destaca la importancia vital de un monitoreo constante para la seguridad marítima y la planificación costera.

En la actualidad, el monitoreo del oleaje es fundamental para la gestión segura y sostenible de nuestros océanos. Las boyas oceánicas avanzadas, equipadas con sofisticados sensores y tecnologías de comunicación, flotan en la superficie del mar recopilando y transmitiendo datos en tiempo real sobre la altura, dirección y periodo de las olas. Este monitoreo en tiempo real es vital para la toma de decisiones rápidas durante situaciones de emergencia, como tormentas y tsunamis, mejorando así la seguridad marítima.

Por otro lado, los satélites de última generación, con tecnología de radar altímetro, han revolucionado la observación del oleaje, proporcionando una perspectiva global incluso en áreas remotas. El monitoreo del oleaje no solo garantiza la seguridad inmediata, sino que también juega un papel vital en la planificación a largo plazo frente a los desafíos del cambio climático.

INNOVACIONES EN TECNOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DEL OLEAJE

BOYAS DE ALTA TECNOLOGÍA

Las boyas han evolucionado enormemente desde sus inicios como simples dispositivos de flotación. Hoy en día, son sofisticadas estaciones de monitoreo que recopilan una amplia gama de datos. Las boyas modernas están equipadas con sensores multiespectrales que pueden medir la altura de las olas, el período y la dirección del oleaje, así como parámetros atmosféricos, incluidos la velocidad y dirección del viento, la temperatura del agua, y la salinidad.

Existen diferentes tipos de boyas, como las boyas de dirección de ondas y boyas a la deriva. Las primeras están ancladas al fondo marino y se utilizan principalmente para medir la dirección de las olas, mientras que las boyas a la deriva recopilan datos a medida que flotan con las corrientes oceánicas, proporcionando una visión más amplia de los patrones del oleaje en una región.

Estas boyas están equipadas con una variedad de sensores para medir múltiples parámetros simultáneamente. Son esenciales para la investigación científica y la recopilación de datos ambientales precisos.

Utilizan tecnología para analizar el espectro completo de las olas, permitiendo una comprensión más detallada de las frecuencias y energías de las olas. Son especialmente utilizadas en estudios de impacto costero.

Equipadas con ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers), estas boyas pueden medir perfiles de corriente en diferentes capas de profundidad del océano, complementando la información sobre el comportamiento del oleaje.



Figura 1. Boya de alta tecnología.

Fuente: Fraunhofer IWES



Figura 2. Boya de alta tecnología.

Fuente: <https://www.panamainforma.com/index.php/ciencia/538-chile-utiliza-boyas-de-alta-tecnologia-para-proteger-a-las-ballenas-migratorias.html>

CAPACIDADES DE COMUNICACIÓN

Gracias a la tecnología satelital, las boyas pueden transmitir sus datos en tiempo real a centros de procesamiento en tierra. El sistema Iridium es uno de los métodos más populares para esta transmisión, permitiendo una comunicación global y con baja latencia que es crítica para el análisis inmediato.

Las boyas modernas están integradas con redes de IoT (Internet de las Cosas), lo que permite una gestión de datos incluso más eficiente y la capacidad de interacción con otras infraestructuras marinas.

Están equipadas con paneles solares y sistemas de generación de energía cinética (a partir del movimiento de las olas), las boyas pueden operar de forma autónoma durante largos períodos.

SATÉLITES Y TELEDETECCIÓN

Los satélites han revolucionado el campo de la oceanografía mediante la teledetección. La tecnología de radar altimétrico, utilizada por satélites como el Jason-3 y el Sentinel-3, mide la altura del oleaje y el nivel del mar con una precisión milimétrica. Los satélites sentinel son parte del programa Copernicus, estos satélites proporcionan datos cruciales para el mapeo oceánico, utilizando tanto imágenes ópticas como radar para una mejor inferencia del oleaje.

La tecnología SAR (Synthetic Aperture Radar), es utilizada para medir la estructura de la superficie marina bajo diferentes condiciones climáticas, esencial para el monitoreo de olas grandes y formulaciones de radar oceánico.

Los satélites ofrecen una cobertura incomparable, alcanzando incluso las regiones oceánicas más remotas y de difícil acceso. Esto es esencial para la elaboración de mapas mundiales del oleaje y para el monitoreo de fenómenos climáticos extremos.

La tecnología GNSS-R (Reflectometría de señales GNSS) está siendo cada vez más utilizada para mejorar la resolución de las mediciones de la superficie del mar, permitiendo un análisis más detallado y preciso de las condiciones marinas.

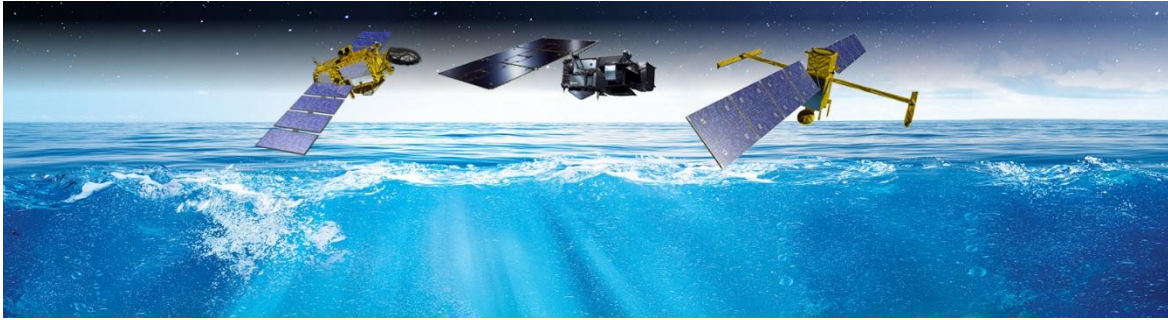


Figura 3. Satélites observando el océano.

Fuente: <https://www.thalesgroup.com/es/el-mundo/space/news/los-oceanos-vista-satelite>

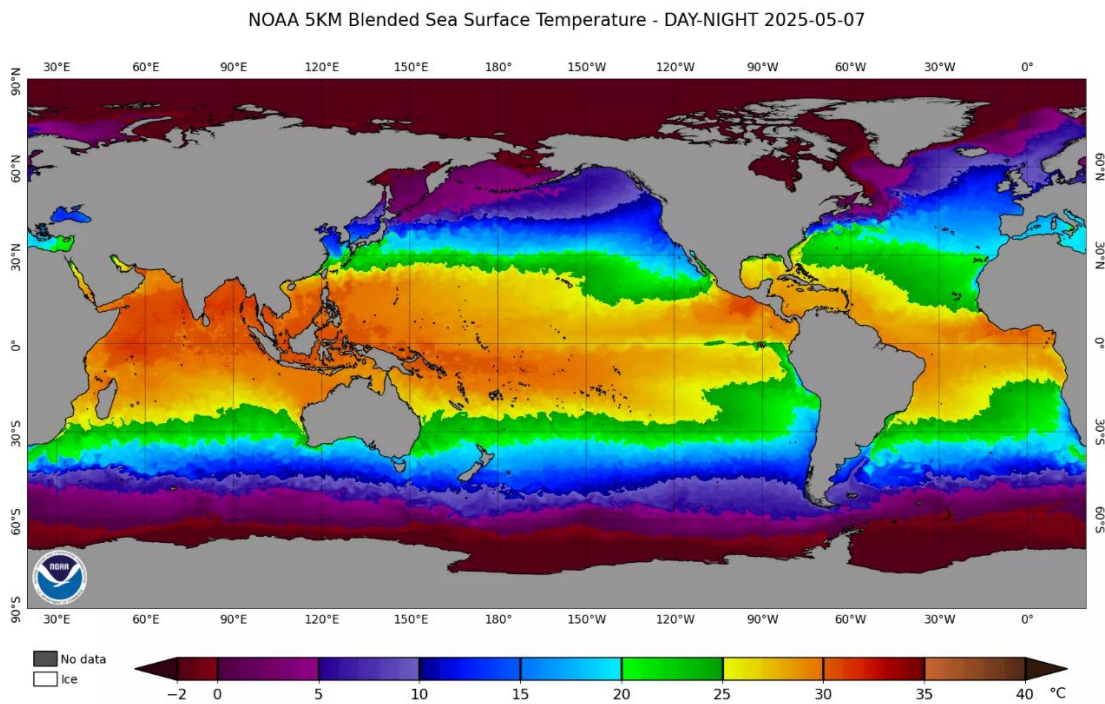


Figura 4. Análisis combinado de la temperatura de la superficie del mar obtenido por satélite geopolar del 7 de mayo de 2025.

Fuente: <https://www.nesdis.noaa.gov/news/noaa-satellites-have-you-covered-hurricane-season>

LIDAR MARINO Y DRONES

La tecnología LiDAR, adaptada para aplicaciones marinas, utiliza pulsos láser para escanear y mapear la estructura de las olas y el fondo marino. Esta tecnología ayuda a detectar olas en movimiento con láser fue un reto resuelto mediante sistemas de filtro avanzada que eliminan las reflexiones no deseadas y mejoran la precisión de los datos.

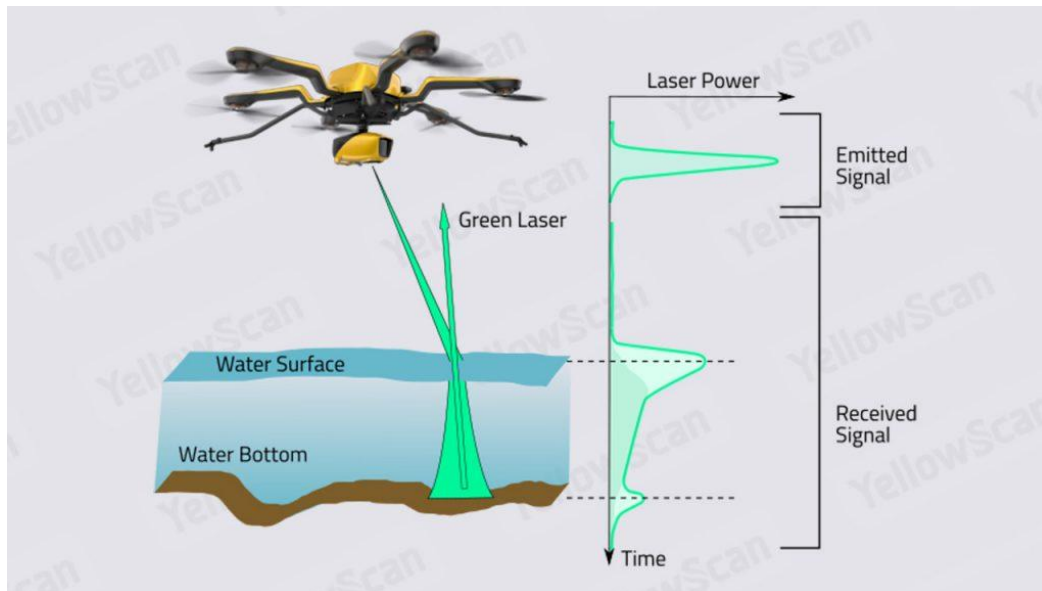


Figura 5. Escaneo láser bajo el agua.

Fuente: <https://www.yellowscan.com/es/knowledge/does-lidar-work-underwater/>

FUNCIONAMIENTO DEL LIDAR MARINO

1. Emisión del Pulso Láser:

Un sistema de LiDAR marino, generalmente montado en una plataforma aérea como un avión o dron, emite pulsos de luz láser verdes (aproximadamente 532 nanómetros). Estos pulsos se emiten a alta frecuencia, variando entre 5,000 y 500,000 pulsos por segundo, según el modelo y aplicación.

2. Interacción con el Agua:

Una vez que el pulso láser alcanza la superficie del océano, una parte de la luz se refleja de inmediato, mientras que otra parte penetra la columna de agua. Al penetrar el agua,

la trayectoria de la luz se refracta, cambiando de ángulo debido a la diferencia de densidad entre el aire y el agua.

3. Reflexión desde el Fondo Oceánico:

La parte del pulso que penetra más allá de la superficie continuará hasta llegar al fondo oceánico, donde se refleja hacia arriba. La eficiencia de esta reflexión depende del tipo de sustrato del fondo. Superficies como la arena reflejan más luz, mientras que sedimentos oscuros como el barro tienden a absorberla.

4. Detección del Pulso de Retorno:

El sistema LiDAR detecta tanto el pulso reflejado desde la superficie del agua como el que regresa del fondo oceánico. El tiempo entre la emisión del pulso y su regreso es calculado para determinar las distancias: la corta duración del tiempo de retorno desde la superficie y la mayor duración desde el fondo proporcionan datos clave para mapear ambos.

5. Procesamiento de Datos y Generación de Mapas:

Los datos de retorno se registran en forma de señales digitales. Los fotones reflejados se convierten en un flujo de datos que el sistema LiDAR analiza. La diferencia temporal entre las señales de superficie y fondo permite calcular la profundidad del agua. Esta información se procesa para crear representaciones tridimensionales detalladas del fondo oceánico y su topografía.

6. Aplicaciones y Resultados:

Los mapas generados son fundamentales para la cartografía marina, el estudio de hábitats acuáticos, el monitoreo ambiental, y para planificar proyectos de infraestructura marítima. Además de profundidades, las densidades de algas, las estructuras de arrecifes de coral, y otras formaciones subacuáticas también son identificables con gran detalle.

Los drones acuáticos están equipados con cámaras y sensores que permiten realizar mediciones detalladas y operar en condiciones climáticas adversas donde sería peligroso para las embarcaciones tripuladas. Estos vehículos autónomos ofrecen una gran flexibilidad para estudiar entornos marinos complicados, llevan sensores especializados para medir corrientes, presión y temperatura, complementando la información sobre el oleaje.



Figura 6. Dron marino.

Fuente: <https://www.aoml.noaa.gov/es/noaa-deploys-drone-in-ocean-and-atmosphere-to-advance-hurricane-forecasting/>



Figura 7. Mapeo de fondo marino.

Fuente: <https://metaversos.agency/blog/mapeo-de-fondos-marinos-con-ia-y-drones-exploracion-conservacion-y-oportunidades/>

IMPORTANCIA DEL MONITOREO CONTINUO DEL OLEAJE

El monitoreo del oleaje es fundamental para varias facetas de la actividad humana y la protección ambiental. La información sobre el oleaje es vital para garantizar rutas marítimas seguras. Los datos precisos permiten optimizar el consumo de combustible y minimizar el riesgo de accidentes al permitir a los capitanes tomar decisiones informadas sobre la trayectoria de sus embarcaciones.

En áreas propensas a tsunamis y tormentas, el monitoreo continuo del oleaje es esencial para emitir alertas tempranas. Estos sistemas de alerta proporcionan valioso tiempo extra para movilizar recursos y evacuar áreas en riesgo, protegiendo vidas humanas y reduciendo daños materiales. Los datos del oleaje son esenciales para entender las dinámicas costeras y para diseñar infraestructuras resilientes. Los planificadores urbanos y ambientalistas se benefician de esta información para implementar medidas de protección que preserven tanto a las comunidades humanas como a los ecosistemas marinos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cavaleri, L., Alves, J. H., & Ardhuin, F. (2012). *Wave modeling – The state of the art*. Progress in Oceanography, 105, 1-43.
2. Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific.
3. Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
4. ITSCHNER, A. M., et al. (2020). *The Future of Wave Observations*. Frontiers in Marine Science, 7, 123.
5. Janssen, P. A. E. M. (2004). *The Interaction of Ocean Waves and Wind*. Cambridge University Press.
6. Thompson, D. R., & Reinking, J. L. (2012). *Recent Advances in Remote Sensing of Ocean Waves and Currents*. Marine Technology Society Journal, 46(6), 3-10.
7. Valenzuela, G. R. (2001). *The Impact of Technology on Ocean Wave Monitoring*. Journal of Ocean Engineering, 28(12), 1599–1620.
8. Young, I. R. (1999). *Wind Generated Ocean Waves*. Elsevier Science.