Medición de Variables Oceanográficas y Meteorológicas en México

Segura Quiroz David Humberto, Toledano Vega Noe Fabricio, Ávila Arzani Dora Luz, Sánchez Blanco Edy Nelson, Casas Valencia Cindy

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

dsegura@imt.mx, ntoledano@imt.mx, davila@imt.mx, esanchez@imt.mx, ccasas@imt.mx

Resumen

En el litoral Nacional, los fenómenos que son el resultado de la interacción del océano y la atmósfera, como el viento, o bien, fenómenos que producen perturbaciones en la superficie libre del mar cuya fuerza generadora es la atracción gravitatoria de los astros de nuestro sistema solar, o los movimientos tectónicos, son de naturaleza aleatoria y, en consecuencia, las variables que lo caracterizan sólo pueden ser especificados en términos estadísticos. Dichos fenómenos son factores de los que depende directamente el comportamiento de la franja costera, y son los mecanismos más importantes tanto en la evolución física de las playas, en la respuesta hidrodinámica de cualquier estructura marítima, así como en la operación de un puerto.

Por lo anterior, resulta evidente la necesidad de contar con información del clima marítimo representativo de los Puertos Nacionales, información que es de vital importancia ya que tendrá múltiples aplicaciones, pero principalmente se orientará a la comunidad ingenieril que desarrolla trabajos relativos a las costas de México. El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) convencido de la importancia de contar con mediciones de variables oceanográficas y meteorológicas en las costas de México, desarrolló e implementó la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM). La RENEOM, de forma similar a otras redes internacionales tiene por objetivo instalar y operar equipos de medición especializada de forma permanente, con el fin de integrar una base de datos confiable.

La RENEOM es un proyecto que tiene como objetivo medir, acopiar, analizar, interpretar datos y difundir información océano meteorológica. Esta información es aplicable al diseño optimizado de la infraestructura marítimo-portuaria; a la mejora de la operatividad portuaria; a la seguridad de la navegación de las embarcaciones al arribar o salir de puerto, así como, en la gestión integral de las costas, incluyendo la preservación de puertos y refugios pesqueros, playas y aprovechamientos piscícolas. Esta información es utilizada por el Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, ya que este Instituto participa en representación de la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes. La RENEOM está conformada por una red de equipos de medición especializada instalados de forma permanente en el Litoral Nacional.

Medición de oleaje

El equipo utilizado para las mediciones del oleaje son boyas direccionales medidoras de oleaje, marca Datawell, modelo MK-III, con casco de acero inoxidable de 70 cm de diámetro, de origen holandés (figura 1). Estas boyas incluyendo baterías (15 baterías alcalinas de 200 Wh), antena y cadena tienen un peso de aproximadamente de 105 Kg con un diámetro de 70 cm. La duración del banco de baterías es de aproximadamente 12 meses.

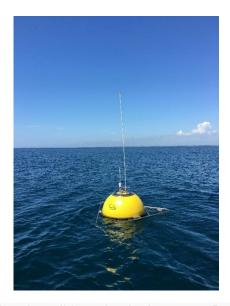


Figura 1. Boya direccional medidora de oleaje, marca Datawell, modelo MK-III.

Esta boya opera siguiendo el movimiento orbital de las ondas en la superficie del mar, mide las aceleraciones verticales y horizontales a que es sometida. La principal ventaja de este esquema de funcionamiento es la precisión para determinar la dirección del oleaje en cuanto a su altura, periodo y dirección, así como la temperatura superficial del agua.

A partir de las aceleraciones medidas, una doble integración permite obtener el desplazamiento del equipo en tres dimensiones. La boya direccional es capaz de registrar aceleraciones en el rango de frecuencia de 0.033 a 0.64 Hz, lo que equivale a periodos de ola entre 1.5 y 30 segundos.

El instrumento posee una antena GPS con la cual se localiza la posición de la boya. La latitud y la longitud se actualizan cada media hora y durante ese tiempo se transmite 8 veces la posición y tiene una precisión de 10 m.

Estos equipos tienen como propósito determinar las características del oleaje; altura, periodo y dirección con acelerómetros estabilizados que consisten en esferas rellenas de fluido (figura 1.2) y son capaces de medir oleaje con las características que se muestran en las Tablas 1.1 y 1.2, además de registrar la temperatura superficial del mar

ya que poseen un sensor situado en la parte inferior del casco de la boya, con un rango de -5°C a 46°C, resolución de 0.05°C y precisión de 0.2°C.

Tabla 1.1 Características de medición del oleaje.

Rango	-20 m a 20 m	
Resolución	1 cm	
Precisión	< 0.5 % del valor	
Precision	medido	
Rango de periodos	1.6 s a 30 s	

Tabla 1.2 Características de la dirección del oleaje.

Rango	0° a 360°	
Resolución 1.5°		
Referencia	Norte magnético	

Tanto para la seguridad en el mar como para la seguridad de la propia boya, esta posee una antena con luz LED destellante con un alcance geográfico de 6.9 millas náuticas y un alcance luminoso de 4 millas náuticas. El color y patrón de los destellos (5 destellos cada 20s) cumple con la normatividad de ODAS (Ocean Data Acquisition Systems) en la IALA (Internacional Association of Lighthouse Authorities). En la tabla 1.3 se pueden consultar las características de los destellos emitidos por la boya.

Tabla 1.3 Especificaciones de la luz de led.

Rango	4 Nm	
Patrón de destellos	5 flashes en 10 s, 20 s repetición	
Ángulos de luz	360° alrededor, +/- 45° del plan	
Umbral de funcionamiento	60 Lux	

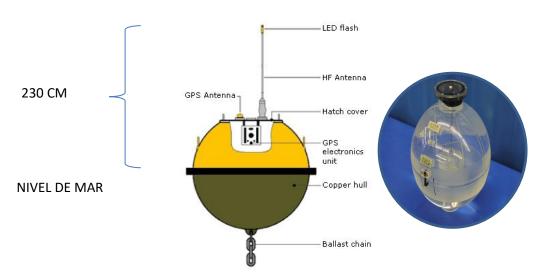


Figura 1.2 Esquema de las partes de la boya, exterior e interior.

Debajo de la boya se coloca una cadena estabilizadora con dos ánodos de sacrificio (zinc). Todas las partes metálicas están fabricadas en acero inoxidable AISI 316.

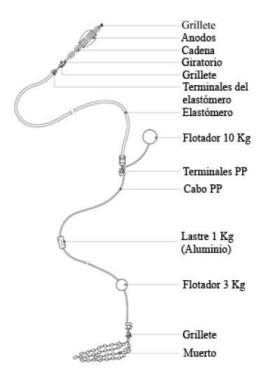


Figura 1.3 Diagrama de sistema de amarre para boya medidora de oleaje marca Datawell.

En la figura 1.3 se presentan las partes de un sistema de amarre y su nomenclatura. El fondeo incluye un peso muerto de al menos 300 kg el cual puede ser de concreto o cadena, seguido de un cabo de polipropileno (PP) trenzado de 12 mm el cual no presenta problemas por torsiones y que tiene una fuerza de rotura de 2000 kg. El cabo de polipropileno luego se une con un elastómero de 27 mm de diámetro y 30 m de largo.

El equipo cuenta adicionalmente con un triángulo anti-giros que evita las rotaciones en caso de que pase un barco cerca.

El sensor de la boya genera datos de desplazamientos Norte, Oeste y Vertical, a una frecuencia de 1.28 Hz cada 200 s tomando 256 muestras de la superficie del mar. Los datos registrados son enviados vía radio a través de su antena flash en HF con las características que se muestran en la tabla 1.4

Tabla 1.4 Características de transmisión.

Potencia de salida	75 Mw	
Frecuencia de transmisión	29.78 MHz	
Alcance	50 km sobre el mar	
Velocidad	81.92 raud	
Modulación FSK		
Corrección de error	BCH (63,51)	

Durante el 2022, se pusieron en operación 9 boyas en los principales puertos de México los cuales se enlistan en la siguiente tabla, siendo importante comentar qué, para los puertos de Ensenada en el estado de Baja California y Guaymas en Sonora en los que se tenía contemplado la instalación, no fue posible debido a que la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante (SEMAR), indicó que no era posible brindar apoyo en ese momento al instituto para el cumplimiento de esos trabajos, por lo que solo se asistió al puerto para retirar las boyas que ahí se encontraban.

Tabla 1.5 Boyas instaladas.

Boyas instaladas durante 2022			
ID	CLAVE	PUERTO	ESTADO
1	IMTOL15	Mazatlán	OPERANDO
2	IMTOL16	Puerto Vallarta	OPERANDO
3	IMTOL17	Manzanillo	OPERANDO
4	IMTOL18	Lázaro Cárdenas	OPERANDO
5	IMTOL20	Acapulco	OPERANDO
6	IMTOL23	Salina Cruz	OPERANDO
7	IMTOL28	Tuxpan	OPERANDO
8	IMTOL30	Veracruz	OPERANDO
9	IMTOL30B	Veracruz	OPERANDO

Para la instalación de las boyas medidoras de oleaje, el personal del Laboratorio de Calibración de Equipos Oceanográficos contó con el apoyo Institucional de las Capitanías de Puerto y/o de las Administraciones Portuarias correspondientes. El apoyo que se le brindó al Instituto constó de la fabricación de muertos de concreto, servicio de embarcación y en ocasiones también se dispuso de personal de apoyo.

Control de calidad

Las series de tiempo que fueron generadas con las boyas, fueron sometidas a un proceso de control de calidad que se basa en la detección de datos de dudosa calidad utilizando varios métodos que verifican la continuidad de las mediciones, identificando picos en la señal que representan cambios súbitos los cuales físicamente no representan el comportamiento de las olas. Además, se aplicaron métodos que detectan mediciones que no siguen un patrón típico de comportamiento del oleaje y también se revisa la continuidad en el dominio del tiempo,

Al final de este proceso, se separaron las mediciones que no cumplieron con los criterios establecidos para cada método descrito en el párrafo anterior, dejando las señales listas para su análisis estadístico.

Análisis estadístico del oleaje

Las señales medidas con las boyas y que cumplieron con el proceso de control de calidad, se analizaron estadísticamente para obtener indicadores para cada uno de los puertos en los que operó una boya. Para analizar estas señales de oleaje, en este trabajo se utilizaron dos modelos para tratar series de tiempo aplicado al caso de boyas direccionales medidora de oleaje. El primero de los métodos se basa en una caracterización del oleaje de tipo altura-periodo de ola significante, conocido como análisis temporal; y también se aplicó el método conocido como análisis espectro digital del oleaje el cual basa la caracterización del oleaje de acuerdo a la descripción de la distribución de energía del espectro de la señal de oleaje en el dominio de la frecuencia.

Antes del análisis estadístico, y debido a que los registros del oleaje contienen la influencia de ondas largas, mareas, por ejemplo, que en algunos casos llega a ser muy importante su influencia sobre el nivel medio del registro, es necesario realizar la corrección de dicho nivel y evitar una distorsión en el análisis estadístico.

En el dominio del tiempo, existen tres formas muy utilizadas para llevar a cabo la corrección del nivel medio. El procedimiento aplicado es el siguiente: se calcula el valor medio que puede ser de orden cero o promedio aritmético, de primer orden (como una recta) o de segundo orden (como una parábola). En los dos últimos casos, los coeficientes de la recta o parábola se pueden obtener aplicando la técnica de mínimos cuadrados.

Normalmente la muestra que se utiliza para realizar la descripción estadística temporal de un estado de mar tiene un aspecto similar al de la figura 1.1.2.1, en la que se muestran las variables fundamentales que definen al oleaje, los cuales son la altura de ola H, y su periodo asociado T.

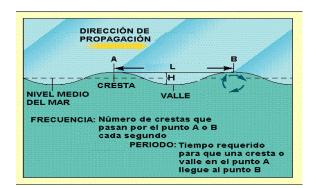


Figura. 1.4 Variables fundamentales que definen al oleaje.

Con la información anterior, se caracterizó la señal, esto es, se calcularon las alturas de ola y los periodos de ola individuales para posteriormente estimar los parámetros estadísticos se indican a continuación:

Número de sucesos

Ν

Media

$$\overline{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_i$$

Media cuadrática

$$X_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2$$

Casos particulares

$$X_{1/3}, X_{1/10}$$

Valor máximo de la muestra

$$X_{max}$$

Donde X representa altura de ola, y los subíndices i: número de evento, y promedios correspondientes.

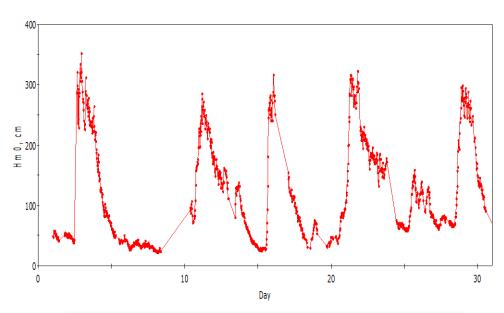
Debido al comportamiento aleatorio de las señales medidas, también es necesario analizar las señales en el dominio de la frecuencia para conocer el espectro del oleaje. Para ello, y de la misma forma que en el análisis temporal, en este análisis se debe llevar a cabo una corrección del nivel medio. Si no existe influencia de ondas largas, en principio la corrección se puede hacer con las mismas consideraciones del análisis temporal.

Sin embargo, cuando se tiene efecto de marea importante en el sitio, es necesario implementar una corrección espectral de nivel medio, es decir, eliminar o filtrar la energía contenida en las frecuencias propias de la marea o en su caso de ondas largas, normalmente menores de 0.02 Hz. Para realizar el filtrado de ondas largas se acepta que el oleaje está formado por una suma de ondas sinusoidales, de manera que la superficie libre puede ser representada en función de los coeficientes de Fourier, asumiendo valida la aplicación de la teoría lineal de Ayri (1845).

Para calcular los valores del espectro de energía se utilizan las series de Fourier, y a fin de simplificar este procedimiento se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés), la cual reduce en gran medida el número de operaciones necesarias para su obtención; este algoritmo tiene como base la propiedad de la transformada discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés) que permite calcular la FFT de una sucesión a través de la DFT de sub-sucesiones más cortas.

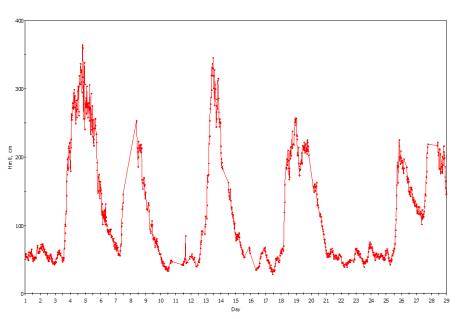
Mediciones de estaciones oceanográficas

Boya_Veracruz, 2022-01

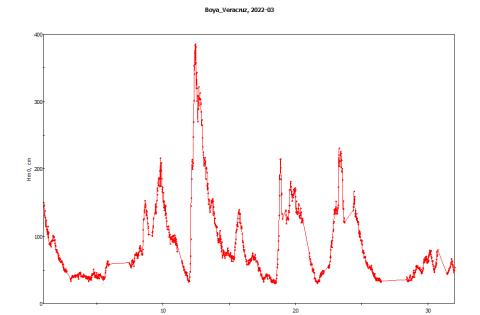


Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes enero 2022.

Boya_Veracruz, 2022-02

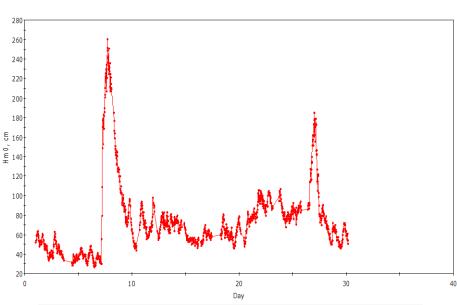


Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes febrero 2022.



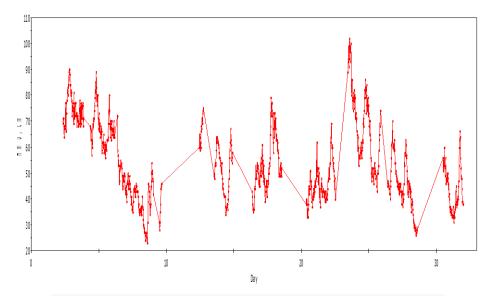
Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes marzo 2022.

Boya_Veracruz, 2022-04



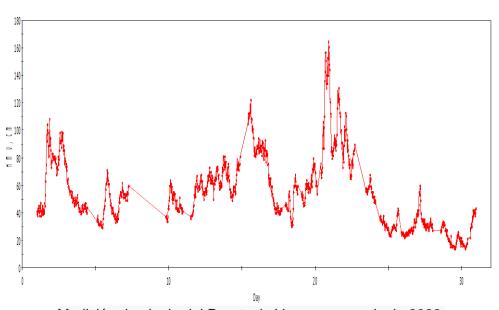
Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes abril 2022.

Boya_Veracruz, 2022-05

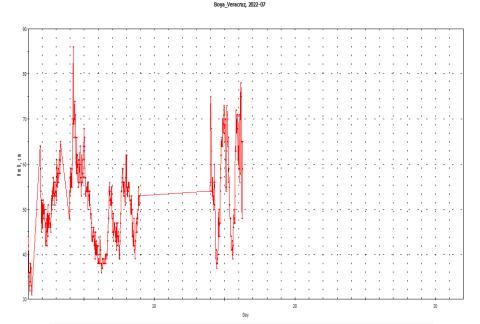


Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes mayo 2022.

Boya_Veracruz, 2022-06

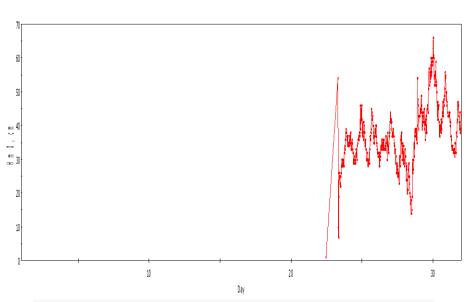


Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes junio 2022.



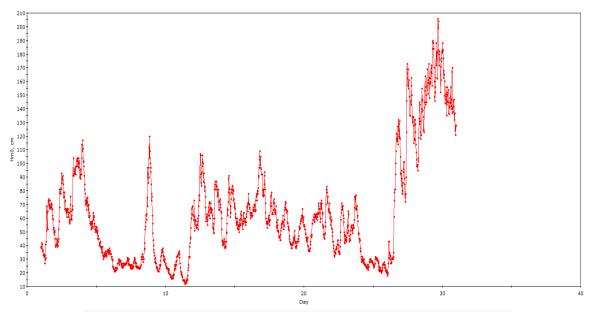
Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes julio 2022.

Boya_Veracruz, 2022-08

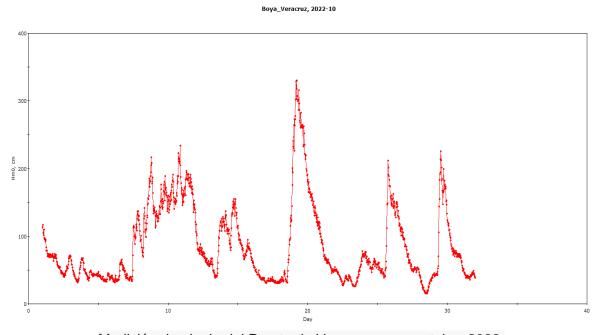


Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes agosto 2022.



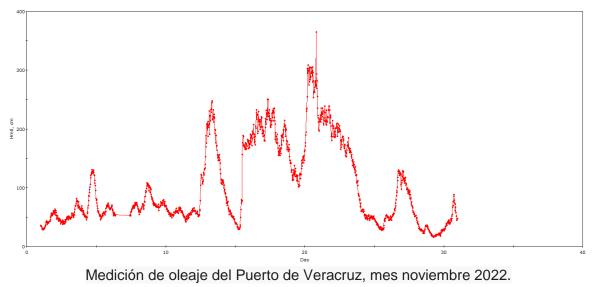


Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes septiembre 2022.

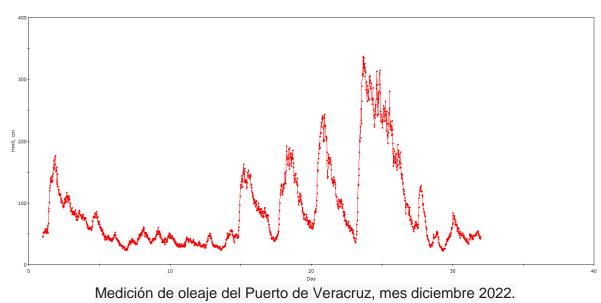


Medición de oleaje del Puerto de Veracruz, mes octubre 2022.









Medición de variables meteorológicas

Para la medición de variables atmosféricos el IMT eligió las estaciones meteorológicas modelo AWS2700 marca Aanderaa Instruments, de procedencia Noruega. Estas estaciones poseen componentes que están protegidos con poliuretano de baja densidad y con resina epóxica, la estructura de la estación está construida de aluminio anonizado.

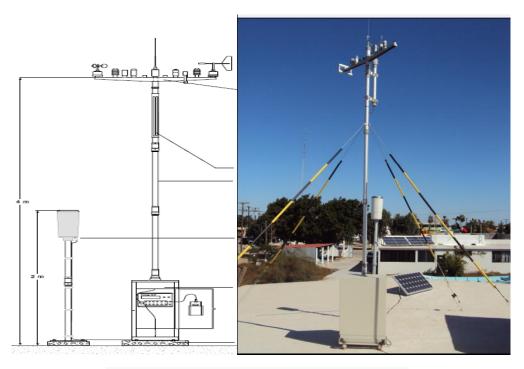


Figura 1.5 Estación meteorológica automática.

El mástil en conjunto con la caja que resguarda a la electrónica de la estación alcanza una altura de 4m hasta la cruceta de sensores. Cada estación cuenta con una unidad de almacenamiento de datos. El sistema de alimentación está compuesto por un panel solar, un regulador/controlador de voltaje y una batería de ciclo profundo de 85 A/hr.

Cada estación es capaz de medir visibilidad (en metros), temperatura ambiente (en grados Celsius), la humedad relativa (en %), la presión barométrica (en milibares), la radiación solar (en watts por metro cuadrado), la dirección del viento (en grados), la magnitud del viento (en metros por segundo) y la precipitación pluvial (en milímetros). En la siguiente tabla se muestran las características de los 8 sensores con que cuentan las estaciones.

Tabla 1.7 Características de los sensores de medición.

PARÁMETRO	RANGO	EXACTTITUD
VISIBILIDAD	0-3000 m	± 0,1 m
TEMPERATURA	-30° C – 60°C	± 0,1 °C
HUMEDAD RELATIVA	0% - 100%	± 2,0 %
PRESIÓN ATMOSFÉRICA	920 mb – 1080 mb	± 0,2 mb
RADIACIÓN SOLAR	0,0 watts/m ² –2000 watts/ m ²	± 1,0 watts/ m ²
DIRECCIÓN DEL VIENTO	0,0° -306,0 °	± 1,0 °
MAGNITUD DEL VIENTO	0,0 m/s – 65,0 m/s	± 0,1 m/s
PRECIPITACIÓN PLUVIAL	Hasta 200 mm/h	± 2,0 %



Figura 1.6. Sensores de medición.

Las estaciones almacenan datos cada 10 minutos tanto en el datalogger como en la unidad de almacenamiento de datos y al mismo tiempo son enviados vía radio hacía la antena receptora.

En el año 2022, debido a la falta de recursos para adquisición de refacciones y para contratar servicios de mantenimiento, se vio afectada la posibilidad de practicar mantenimiento preventivo a las estaciones que hemos mantenido en operación (ver tabla 8) y darles mantenimiento correctivo a las estaciones meteorológicas fuera de operación. Por lo anterior y con la intención de evitar daño al erario federal, se desmontaron las estaciones meteorológicas fuera de operación en diversos puertos del Pacífico Mexicano, las cuales fueron trasladadas a las instalaciones del IMT en Querétaro.

Tabla 1.8 Estaciones meteorológicas en operación

ID	CLAVE	PUERTO	ESTADO
1	IMTME22	Huatulco	OPERANDO
2	IMTME23	Salina Cruz	OPERANDO
3	IMTME26	Altamira	OPERANDO
4	IMTME39	Chetumal	OPERANDO

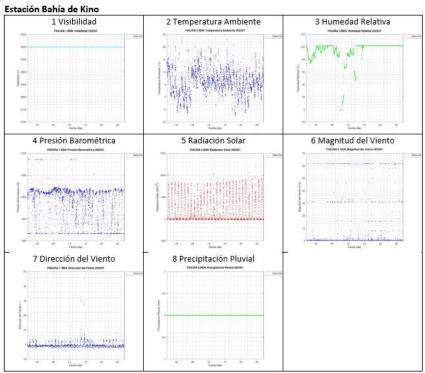
Control de calidad

Como parte de los trabajos del análisis de cada base de datos de las estaciones meteorológicas mencionadas, se revisó la calidad de las mediciones y para ello se preparó un archivo con todas las mediciones para posteriormente analizarlos mediante una rutina de un programa de cómputo, con el que se revisó el orden cronológico de los registros y descartar lecturas repetidas. Y de la misma forma que para el caso del oleaje, se revisó que los datos cumplieran con el principio e continuidad, aplicando un filtro de media móvil para quitar el ruido en la información y n desviaciones estándar para eliminar los picos, descartando para el análisis, registros que presentaron cambios súbitos, que no describieran el comportamiento típico de la variable que se mide, valores fuera del rango de operación del sensor y valores constantes.

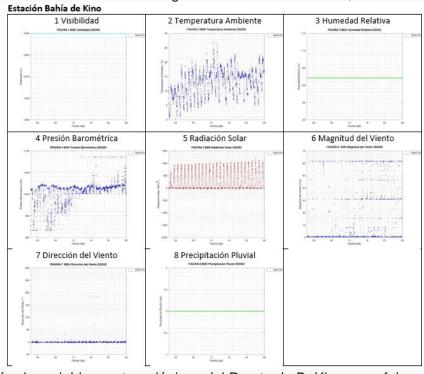
Análisis estadístico de las mediciones meteorológicas

Ya con los datos que cumplieron con el proceso de control de calidad, se trabajó en el procesamiento y en el análisis de los datos de velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar, visibilidad y presión atmosférica. Una vez con los datos suavizados, se procedió a calcular los valores máximos, mínimos y promedios mensuales por año para cada variable. Las series de tiempo se graficaron y se guardó una base de datos validados.

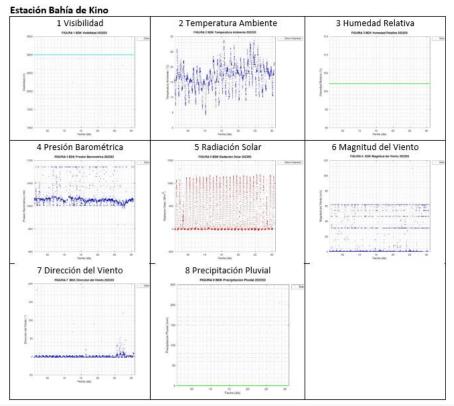
Medición de estaciones meteorológicas



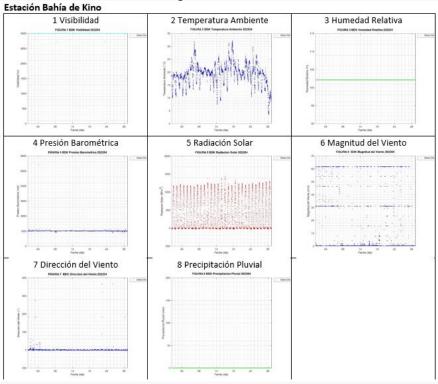
Medición de variables meteorológicas del Puerto de B. Kino, mes enero 2022.



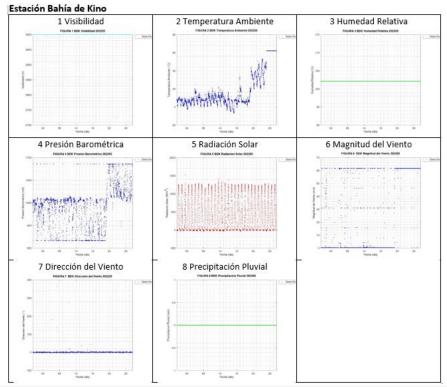
Medición de variables meteorológicas del Puerto de B. Kino, mes febrero 2022.



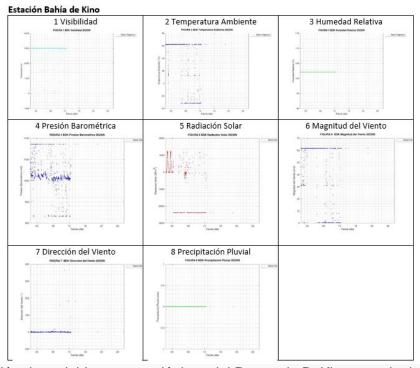
Medición de variables meteorológicas del Puerto de B. Kino, mes marzo 2022.



Medición de variables meteorológicas del Puerto de B. Kino, mes abril 2022.



Medición de variables meteorológicas del Puerto de B. Kino, mes mayo 2022.



Medición de variables meteorológicas del Puerto de B. Kino, mes junio 2022.

Medición del nivel del mar

Las estaciones mareográficas instaladas para la RENEOM permiten hacer mediciones del nivel del mar de manera permanente y continua. El equipo adquirido por el IMT es de marca Vaisala, empresa Finlandesa. Estos equipos monitorean el nivel del mar y están integrados por los componentes que se muestran en la siguiente figura y que se describen a continuación.



Figura 1.7 Estaciones mareográficas.

La estación mareográfica está compuesta por tres sistemas de medición: medición de nivel del mar por medio de radares, flotador y codificador angular; y la medición del nivel del mar con dos tipos de sensores de presión sumergibles.



Figura 1.8 Sensores de medición

Estos sensores están conectados a un datalogger el cual está alojado en una caja Nema para su protección. El sistema de alimentación está formado por un panel solar, una batería de ciclo profundo de 12 Volts y 85 A/hr, y un regulador-controlador de voltaje.

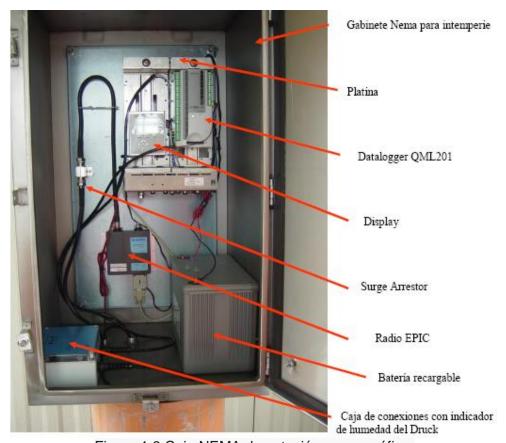


Figura 1.9 Caja NEMA de estación mareográfica.

Durante el 2022, se mantuvieron en operación 6 estaciones mareográficas en los sitios del litoral nacional que se indican en la tabla 9, que principalmente se ubican en la zona del pacífico occidental mexicano, lugar con alta probabilidad de ocurrencia de tsunamis locales por la constante actividad sísmica.

Estas estaciones se mantuvieron en operación a pesar de que el mantenimiento fue realizado en el año 2020.

Las mediciones generadas fueron conducidas a través del sistema satelital GOES lo que permitió su transmisión ininterrumpida hacia el Centro de Alerta de Tsunamis, del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, cumpliendo así con el compromiso de proveer información en tiempo real a dicho sistema de alerta temprana.

Tabla 1.9 Estaciones mareográficas en operación.

ID	PUERTO	ESTADO
1	Cuyutlán	OPERANDO
2	Ixtapa	OPERANDO
3	Puerto Escondido	OPERANDO
4	Huatulco	OPERANDO
5	Salina Cruz	OPERANDO
6	Chiapas	OPERANDO

Control de calidad

Para determinar la calidad de datos del nivel del mar, tenemos que ser capaces de identificar los criterios que se establecerán para determinarlo, considerando en él, todo un procedimiento fundamentado matemáticamente a fin de lograr el objetivo y así tener un buen control de calidad.

El proceso de control inicia revisando el formato de la información contenida en cada uno de los archivos, detectando tramas de datos incompletas y formatos de la etiqueta tiempo distintos, a fin de homogeneizar la población de datos que será sometido posteriormente al proceso de control de calidad.

Para iniciar el análisis de calidad del dato se consideran criterios de congruencia de la etiqueta tiempo del dato y de continuidad de la señal para posteriormente revisar si los datos se encuentran en el rango de valores aceptables por ser consistentes con los patrones de marea o si, durante un cierto tiempo los datos permanecen constantes.

En el primer proceso de filtrado se eliminan valores que no cumplieron con el control de calidad y se separan de la serie para iniciar al segundo ciclo en el que los datos son filtrados considerando como criterio el patrón del comportamiento típico de las mareas utilizando como referencia una predicción de marea que se obtiene del mejor periodo de mediciones continuas dentro del mismo conjunto de datos.

De este segundo ciclo se obtiene una serie de tiempo de residuales que representa la diferencia entre la medición y la predicción para cada paso de tiempo de la serie en análisis. El objetivo de este ciclo fue generar una herramienta que permita identificar datos que no cumplan con principios de continuidad, siendo el experto en el análisis de señales de marea quien determinó los rangos de confianza para el control de la calidad.

Con la distribución de los residuales, se define el rango dentro del cual cada dato será calificado en los procesos de un tercer ciclo de filtrado con el que se dejó lista la serie de tiempo de las mediciones del nivel del mar en condiciones aceptables para su análisis e interpretación.

Análisis estadístico de las mediciones meteorológicas

Mediante la aplicación de procedimientos científicos que utilizan la recolección, análisis y la descripción de un conjunto de datos numéricos, en este trabajo, se determinaron los valores con los que se pueden definen los planos de referencia de las mareas de un puerto a partir de las mediciones de los niveles del mar de la RENEOM.

De las series de tiempo de las variaciones del nivel del mar cuyos valores cumplieron satisfactoriamente con el proceso de control de calidad, se determinó la elevación de las mareas tomando como referencia para su cálculo una elevación base, nivel o plano de referencia de mareas, que cada país adopta según las características de cada costa. Los planos de referencia de mareas varían según el lugar y se definen en términos de cierta fase de la marea. Los niveles de referencia se dan con respecto a puntos que se han medido y marcado sobre tierra firme mediante bancos de nivel fijos. Debido a la gran variación de las mareas, todos los planos de referencia de mareas son locales y no se deben extender a grandes distancias.

Tomando en cuenta la información antes mencionada, en la siguiente figura se muestra gráficamente la representación de los diferentes planos de mareas.



Figura 1.10 Planos de marea en México.

Ejemplos de mediciones durante el 2022



Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera

19/01/2022

RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS RENEOM

Tsunami generado por la erupción del volcan Hunga Tonga-Hunga Ha´apai.

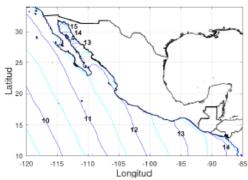


Fig. 1. Tiempo estimado de arribo del tsuanmi a las costas de México. (IMT 2022)

De acuerdo a las mediciones generadas con las estaciones mareográficas de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas RENEOM, el sábado 15 de enero, se registraron variaciones extraordinarias en el nivel del mar de las costas del pacífico mexicano debido al arribo del tsunami que se generó por la erupción del volcán submarino Hunga Tonga-Hunga Ha´apai.

El tsunami no generó inundaciones pero sí fuertes corrientes, siendo el puerto de Manzanillo, donde se registraron las máximas variaciones del nivel del mar (1.998 m en 20 minutos), según los registros de la RENEOM. Las oscilaciones del nivel del mar han disiminuido pero aun persisten en la costas de México.

Km 12 Carretera Estatal Nº 431, El Colorado-Galindo, San Fandila. Pedro Escobedo Periférico Sur, Nº 1990, Nivel PH Col. Tlacopac, Alcaldia Álvaro Obregón C.P. 01049, Ciudad de México

Registro 1. Variaciones del nivel del mar, generadas por Tsunami Tonga, en el puerto de Manzanillo.







Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera

25/10/2022

RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS RENEOM

Perspectiva del comportamiento de lo niveles del mar en el puerto de Manzanillo, Colima, ante los efectos provocados por el tsunami generado por el sismo del 19 de septiembre del 2022.

De acuerdo a las mediciones generadas con las estaciones mareográficas de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas RENEOM, operada por el Instituto Mexicano del Transporte, el lunes 19 de seoptiembre, se registraron variaciones del nivel del mar extraordinarias en las costas del pacífico mexicano debido al tsunami que se generó por el sismo de magnitud 7.7 que tuvo epicentro en las cercanías de Coalcomán Michoacan.

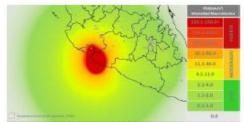


Fig. 1. Epicentro del sismo. Mapa de intensidades elaborado por el Instituto de Ingenieria, UNAM.

El sismo se presentó el lunes 19 de septiembre de 2022 a las 13:05 horas del centro de México, y por la ubicación de su epicentro, el movimeinto de las placas téctonicas se transmitió a la masa de agua dando origen al tsunami que se propagó por las aguas del Océano Pacifico.

Para las costas de México, las ondas del tsunami no generaron inundaciones de consideración, pero sí fuertes corrientes marinas en la franja costera, siendo el puerto de Manzanillo en el estado de Colima por su configuración topo batimétrica, donde se percibieron mayormente los efectos del tsunami. La condición más desfavorable en la zona se presentó 20 minutos despues del sismo aproximadamente, cuando el nivel del mar comenzó a oscilar incrementando su nivel alrededor de 1 m ariba del nivel del mar normal para ese momento, elevación que provocó fuertes corrientes.

Ion. 12 Cametera Estatel N° 431, El Colorado-Galindo, San Fancilla, Pedro Escobedo. C.P. 76703, Questiano, México. Tel Mail 216 97 77 Periferico Sur, 1/* 1890, Nivel PH, Col. Tiacopec, Alcaldia Alvaro Obregó C.P. 01049, Ciudad de México

Tel: (55) 5723-9300

Registro 2. Comportamiento de los niveles del mar en el puerto de Manzanillo, generadas por el tsunami provocado por el sismo del 19 de septiembre de 2022.



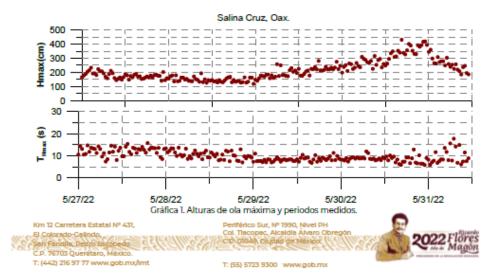
Instituto Mexicano del Transporte Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas

Perspectiva del comportamiento del oleaje en el puerto de Salina Cruz, Oaxaca ante los efectos del huracán Agatha.

Estación: IMTOL23 Salina Cruz, Oax. Ubicación: 16.1330°N, -95.233083°O Equipo de medición: Boya direccional medidora de oleaje modelo MKIII.



De acuerdo con la información generada por la boya instalada en el puerto de Salina Cruz, Oaxaca, el día 30 de mayo del 2022, el paso del huracán Agatha provocó que el oleaje se intensificará gradualmente, hasta alcanzar eventos máximos cuando la perturbación meteorológica tocó tierra, generando alturas de ola máximas (Hmax) que alcanzaron los 4 metros. En la gráfica l se muestra la serie de tiempo de las alturas de ola máximas y sus periodos asociados medidos con la boya, siendo importante de observar, que los periodos Thimas asociados a esos eventos de alturas máximas, estuvieron contenidos en el rango de 5 a 10 s durante el pico del evento meteorológico y en las horas previas. Esta información se obtuvo analizando en el dominio del tiempo los desplazamientos de la superficie libre del mar registrados con la boya.



Registro 3. Mediciones registradas en el puerto de Salina Cruz, Oax., por el huracán Agatha 2022.

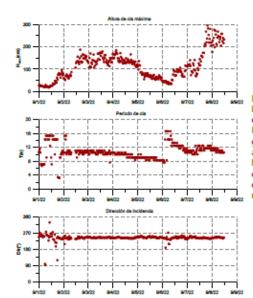


Instituto Mexicano del Transporte Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas

Perspectiva del comportamiento del oleaje en Puerto Vallarta, Jalisco ante los efectos del sistema tropical Kay.

Estación: IMTOL16 Puerto Vallarta, Jal. Ubicación: Frente marino de la zona del aeropuerto de Puerto Vallarta Equipo de medición: Boya MKIII.





De acuerdo con la información generada por la boya instalada en la zona exterior del puerto de Puerto Vallarta, Jalisco, el paso del huracán Kay provocó que el oleaje se intensificará gradualmente hasta alcanzar eventos con alturas de ola máximas (Hmax) que alcanzaron los 3 metros con dirección de incidencia del oeste. Durante el evento se observó presencia de oleaje de tormenta, con componentes de mar de fondo.





Registro 4. Mediciones registradas en el puerto de Puerto Vallarta, Jal., por el sistema tropical Kay 2022.

Conclusiones

Con la ejecución de este proyecto, se dio mantenimiento a 9 boyas medidoras de oleaje y se mantuvieron en operación 5 estaciones mareográficas y 2 estaciones meteorológicas. Con la operación de estos equipos de medición fue posible monitorear el clima marino y se obtuvo información en tiempo real sobre el comportamiento del oleaje, de las variaciones del nivel del mar y del comportamiento de variables meteorológicas.

Se realizó la validación de las mediciones realizadas con las estaciones de la RENEOM que operaron durante el 2022, obteniendo con ello series de tiempo filtradas en las que se descartaron valores que no cumplieron satisfactoriamente con el proceso de control de calidad, mismos que fueron integrados a la base de datos. Este proceso permitió contar con elementos de juicio acerca del comportamiento de las variables océano meteorológicas que se utilizan en la ingeniería portuaria. Las mediciones del nivel del mar realizadas con las estaciones mareográficas, fueron transmitidas en tiempo real a través del sistema satelital GOES, y se pusieron a disposición del Centro de Alerta de Tsunamis (CAT) del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, cumpliendo así, con el compromiso de generar mediciones del nivel del mar para este sistema de alerta temprana.

Con la operación de estas estaciones mareográficas, se envió en tiempo real al CAT, el registró del arribo de dos tsunamis a las costas de nuestro país. El primero un tsunami distante que fue provocado por la erupción del volcán submarino Hunga Tonga-Hunga Ha´apai, el cual no generó inundaciones en nuestras costas, pero sí fuertes corrientes marinas, siendo el puerto de Manzanillo en el estado de Colima, donde se registraron las máximas variaciones del nivel del mar, según los registros de la RENEOM (Registro 1).

El segundo evento registrado y cuyas mediciones también fueron transmitidas al CAT oportunamente, fue el tsunami local generado por el sismo del 19 de septiembre de 2022, de magnitud 7.7 con epicentro en las cercanías de Coalcomán Michoacán (Registro 2), cuyos efectos no generaron inundaciones, pero si fuertes corrientes marinas, siendo una vez más el puerto de Manzanillo, donde los efectos fueron percibidos mayormente. En lo que respecta a las mediciones de las características del oleaje, las boyas registraron diversos eventos extraordinarios en ambas costas de nuestro litoral, de los cuales, es de resaltar el caso del huracán Agatha en el sur del pacífico mexicano, ya que, al analizar la serie de tiempo generada con la boya instalada en el puerto de Salina Cruz, se observó que en al puerto arribó oleaje generado por el Huracán Agatha y al mismo tiempo oleaje conocido como mar de fondo (Registro 3).

Debido al papel que juegan las mediciones en la operación portuaria, la información generada con los equipos de la RENEOM fue solicitada y utilizada por la Administración del Sistema Portuario Nacional de Manzanillo S. A. de C. V. debido a incidentes ocurridos

por las corrientes marinas que se presentaron en el puerto y que fueron ocasionadas por el tsunami del 19 de septiembre del 2022.

De la misma forma, para el caso del sistema tropical Kay, la Capitanía Regional de Puerto de Puerto Vallarta, Jalisco, solicitó la interpretación de las mediciones generadas con la boya instalada en el puerto, a fin de contar con elementos de juicio ante incidentes que se presentaron en el puerto por los efectos del sistema tropical. (Registro 4).

Referencias Bibliográficas

- Aanderaa Data Instrumentes. 2008: Manual del usuario AWS 2700. Noruega.
- Datawell BV Oceanographic Instruments. 2011: Datawell Waverider Manual del usuario. Netherlands.
- Dirección General de Programación Organización y Presupuesto. 2022: Catálogo de Tarifas Autorizado para el Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de hacienda y Crédito Público. México.
- Ejecutivo Federal. Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. Gobierno de México. 2019.
- Instituto Mexicano del Transporte. Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas RENEOM. México.
- Intergoverment Oceanographic Commission. 2006: Manual on Sea Level Mesurement and Interpretation. Unesco. Switzerland.
- Silva, R. (2005): Análisis y descripción estadística del oleaje. UNAM. México.
- Sistema de Gestión de la Calidad del Instituto Mexicano del Transporte Procedimiento General, Gestión de Riesgos, No. RS-010.
- Vaisala, 2007: Manual del usuario MAWS110, Finlandia.
- World Meteorological Organization UNESCO. 1998: Guide to Wave Analysis and Forecasting. Switzerland.