

# Distances Between Wave Crests Obtained From Satellite Images

H. Rodríguez, *Member, IEEE*, R. Rodríguez, *Member, IEEE*, and A. González, *Member, IEEE*,

**Abstract**—The study of sea wavelengths and their variations is of vital importance for conservation project of coral reefs and coastal areas. However, to date this issue has never been treated from the point of view of image processing. In this work, we propose a simple strategy to calculate the distance between wave crests from satellite images, obtaining results that were compared with previous studies with more developed instruments on the calculation of wavelengths. In fact, our work goes a little further, because from the calculation of the wavelength we propose a strategy associated with the wave theory to estimate the kinetic energy dissipated when the wave fronts cross the coral reef. In addition, we use the wavelength to calculate the speed of the wave fronts. The well-known Gamma filter, Prewitt gradient and Gaussian binarization are used as processing techniques.

**Index Terms**—Waves, Image processing, Edge detection, Segmentation, Satellite image.

## I. INTRODUCCIÓN

LA incidencia de la radiación solar provoca un calentamiento desigual sobre la superficie terrestre, generando zonas de altas y bajas presiones en la atmósfera que provocan vientos de variada intensidad. La fricción de estos vientos con la superficie del agua de los océanos, produce un arrastre que da lugar a la formación de arrugas llamadas ondas u olas capilares de solo unos milímetros de altura. Cuando la superficie pierde su lisura, la fricción se intensifica y el efecto de esta hace que las rizaduras iniciales se conviertan en olas de gravedad.

La diferencia entre una cresta, que es la parte más alta de una ola, y el valle se denomina Altura ( $H$ ). De forma similar se denomina Longitud de onda ( $\lambda$ ) a la distancia entre dos crestas. La Amplitud ( $A$ ), por ser la distancia en que las partículas de agua se apartan de su posición media en una dirección perpendicular a la de propagación, se establece como la mitad de la altura ( $H$ ). [1] (ver Fig.1).

Se llama período ( $\tau$ ) al tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas por el mismo punto.

La velocidad de propagación de la onda se calcula dividiendo la longitud de onda por el período [2].

En la medida que transcurre el tiempo las olas van disipando su energía, por lo que una parte se convierte en corriente superficial con un desplazamiento de masa hasta una profundidad determinada, mientras que la otra parte se disipa por fricción con el aire, un proceso inverso al que puso precisamente en marcha a las olas. Parte de la energía se puede disipar de existir

Este trabajo fue realizado en el contexto de un proyecto conjunto entre el Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF) y el Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR).

H. Rodríguez, R. Rodríguez y A. González están afiliados al Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF) de Cuba.

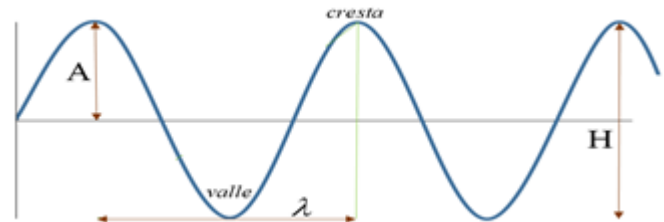


Fig. 1. Parámetros de las olas.

una velocidad excesiva del viento provocando la ruptura de las crestas. La energía restante se desvanece por interacción con la corteza sólida cuando el fondo es poco profundo o cuando terminan estrellándose en la costa [3]–[5].

El oleaje, como fenómeno estocástico, requiere una aproximación estadística o espectral de una serie temporal de medidas. Existen diversas técnicas para estimar el oleaje, pero todas requieren un cierto tiempo de medida y un buen modelo matemático. Las medidas más antiguas del oleaje se remontan a las observaciones visuales desde un barco en navegación o desde la costa. La recopilación, sistematización y compilación de esta información por el Almirantazgo Británico ha sido una de las principales fuentes de información sobre el oleaje que solo se ha visto superada por el relativamente reciente empleo de satélites artificiales para observar la tierra y el mar [6].

La tecnología más clásica -y referente habitual- es el sistema de boyas Datawell, que lleva más de 40 años en utilización y consiste en un sistema de boyas oceanográficas de medición de oleaje direccional (de sólo 40 cm) apta para medir olas cuyo período está en el rango de 1,6 a 100 segundos con una precisión de 1% en todas las direcciones [7], [8]. Este sistema es ideal para fondeos de oportunidad, obra marítima, boya de sustitución o incluso como boya de oleaje a la deriva. En los años 80 irrumpió la tecnología Doppler, utilizada primero para la medida de corrientes y más tarde para la medida de oleaje. Nortek fabrica el AWAC, un perfilador de corrientes único que permite obtener series temporales de la superficie del mar, de manera análoga a como lo hacen las boyas de oleaje Datawell [8]. También existen aproximaciones mediante radar, que consisten en lanzar una señal al mar, esperar a recibir el rebote y analizarlo convenientemente [9]. Esta tecnología permite medir la agitación de la superficie en un punto (dársena portuaria, por ejemplo) con señales lanzadas verticalmente (WaveGuide de Radac), en una zona alrededor de un radar de navegación de banda X (SeaDarQ de Nortek) o en todo un sector de la superficie hasta más allá del horizonte (WERA de Helzel), mediante señales lanzadas

horizontalmente. Este mecanismo difiere del anterior porque ofrece un panorama más global debido a que permite ver todo el océano.

Numerosos estudios realizados aportan criterios que expresan las condiciones de rotura del oleaje en función de parámetros locales de la ola y características batimétricas (o pendiente del fondo) [10]. En función de la profundidad del mar y utilizando alguno de dichos criterios, es posible estimar la altura y la longitud de onda máxima que incidirá sobre las estructuras marítimas situadas en zonas de profundidad reducida [11]. Además, existen otras numerosas aplicaciones tales como modelos de evolución de la línea de costa, modelos de propagación de oleaje y energía disipada en las que se precisa utilizar un criterio de rotura para ondas monocromáticas (u ondas individuales) [12].

Según el objetivo que se persiga con las medidas, estas pueden ser de tipo científicas, tecnológicas, operacionales o jurídicas. La adecuada planificación de una campaña de medida del oleaje precisa de un conocimiento previo de la zona y de una detallada consideración de los objetivos de la medida para poder establecer adecuadamente tanto el tipo de instrumentación a emplear, como su ubicación, tiempo y metodología de proceso, todo ello en función de los niveles reales de precisión requeridos y en consideración a las limitaciones presupuestarias.

Los requerimientos antes mencionados impiden que muchas instituciones científicas puedan realizar estos estudios dado que no cuentan con un amplio presupuesto científico. Por tanto, el uso de imágenes costeras satelitales que se pueden obtener de manera gratuita en diversos sitios web como el USGS Earth Explorer, la ESA (Agencia Espacial Europea) o la NASA-Reverb ECHO, puede ser una estrategia certera para calcular las distancias entre crestas de olas y a su vez analizar la energía disipada por los frentes de olas cuando atraviesan los arrecifes coralinos.

Varios son los satélites que se pueden utilizar en los sitios antes mencionados, por ejemplo, el programa Landsat que cuenta ya con ocho lanzamientos, siendo el Landsat 8 el último de esta familia, iniciado el 11 de febrero del 2013 [13]. Las millones de imágenes captadas por los instrumentos de los satélites Landsat, archivadas en las estaciones de recepción alrededor del mundo, son un recurso sumamente importante para las investigaciones relacionadas con el cambio climático, la agricultura, planeamiento regional y la educación. Las características de los satélites de esta familia son variadas, como sucede con los datos capturados por el Landsat 7 que cuentan con ocho bandas espectrales y un rango de resolución espacial de 15 a 60 metros, además de una resolución temporal de 16 días.

El presente trabajo propone un flujo de procesamiento sobre imágenes RGB satelitales, que como parte de la metodología estas serán binarizadas para el cálculo de los parámetros necesarios, por tanto no se requiere transformar las imágenes a otro espacio de color. La estrategia que se propone permitirá calcular la longitud de onda de un grupo de frentes de olas, antes y después de atravesar el arrecife, con lo que se estima la fracción de energía disipada en el arrecife y la velocidad de los frentes de olas. El artículo continúa como sigue: en la sección

II se refleja lo relacionado con la estrategia de procesamiento, la sección III tiene que ver con la descripción del método propuesto para el cálculo de distancias, en la sección IV se describen las aplicaciones, en la sección V se presentan los resultados experimentales y una comparación de los mismos y por último en la sección VI se dan las conclusiones más importantes.

## II. ESTRATEGIA DE PROCESAMIENTO

Supóngase que se tiene una imagen donde se pueden apreciar las crestas de olas y el arrecife (ver Fig. 2)

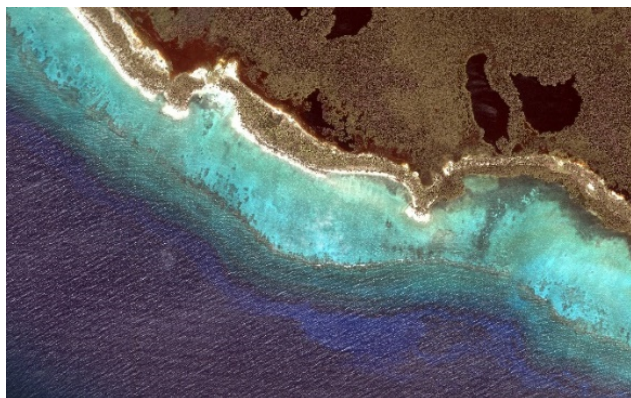


Fig. 2. Imagen costera satelital RGB.

En la Fig. 2, el primer paso es separar las zonas de interés; o sea, una sección de frentes de olas en aguas profundas antes de atravesar el arrecife, y otra en aguas superficiales después de atravesar el mismo (ver Fig. 3).

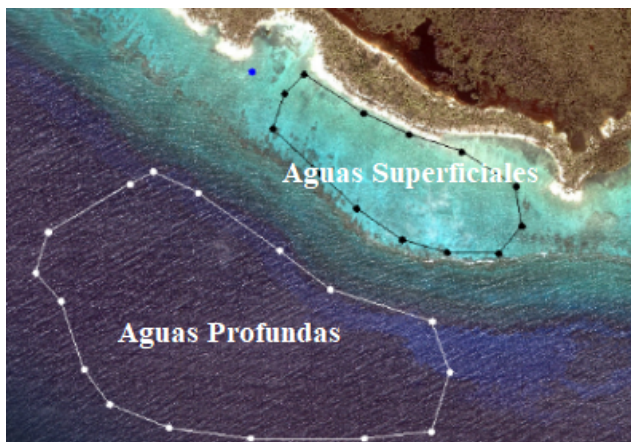


Fig. 3. Zonas de interés seleccionadas.

Posteriormente se representa el proceso de análisis de cada sección, las cuales son llevadas a cabo de forma independiente. Por ejemplo, véase el procesamiento de la región que contiene información en aguas profundas (ver Fig. 4). De igual manera se procede con la otra zona de interés.

Las imágenes costeras presentan una gran diversidad entre la iluminación de las crestas y los valles producida por los diferentes ángulos en que incide la luz del sol. Para corregir este fenómeno se aplicó el filtro Gamma con el fin de



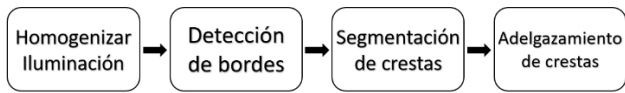


Fig. 4. Flujograma de procesamiento.

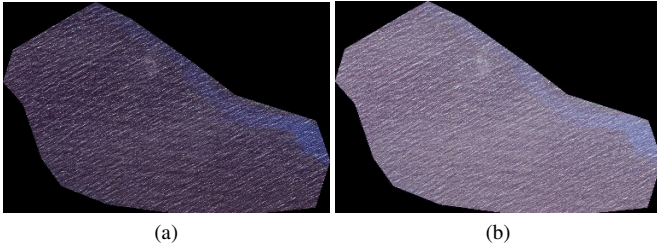


Fig. 5. (a) Sección antes de aplicar el filtro Gamma, (b) Sección después de aplicar el filtro Gamma con parámetro 2.

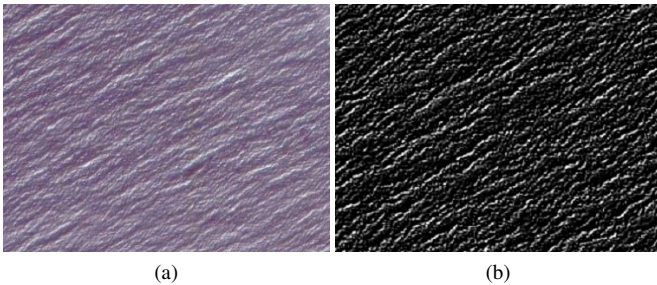


Fig. 6. (a) Sección sin bordes resaltados, (b) Bordes resaltados utilizando la máscara de Prewitt en dirección noroeste.

homogenizar la iluminación [14], de esta forma se reduce la pérdida de información en el momento de detectar los bordes de la imagen. El valor del parámetro gamma se seleccionó tras un estudio realizado en 100 imágenes, aplicando el filtro gamma con parámetros aleatorios en un rango entre 0.5 y 3, obteniéndose que para este tipo de imágenes la iluminación se homogeniza correctamente tomando cualquier valor en el rango entre 1.5 y 2.5 (ver Fig. 5).

Es de notar que dentro de la imagen las olas siguen ciertos patrones de forma, tono y dirección por causa de la influencia del viento. Teniendo en cuenta que entre las crestas de las olas y el fondo existe un contraste amplio, se aplicó un filtro paso alto para resaltar los bordes de la imagen [15] (las altas frecuencias espaciales). En particular se utilizó la máscara de Prewitt con un núcleo de dimensión 3 x 3. La dirección depende lógicamente del trayecto de las olas [16] (ver Fig. 6).

Nótese que los bodes resaltados son exactamente las fronteras entre las crestas de las olas y el fondo. Por tanto, al binarizar la imagen quedarán aisladas las crestas del resto [16]. Tomando en consideración la distribución de una sección de olas y observando que las crestas se aproximan geoméricamente a un segmento de recta, se utilizó un umbralado adaptativo con rejilla gaussiana [17], [18] (ver Fig. 7).

El paso final de la estrategia fue encontrar los centros de las crestas, que en definitiva se usó para medir las distancias entre olas. En tal sentido se empleó un algoritmo de reducción

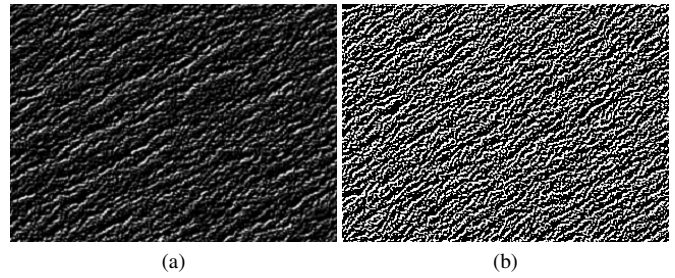


Fig. 7. (a) Sección de crestas no segmentadas (b) Sección de crestas segmentadas mediante una binarización Gaussiana.

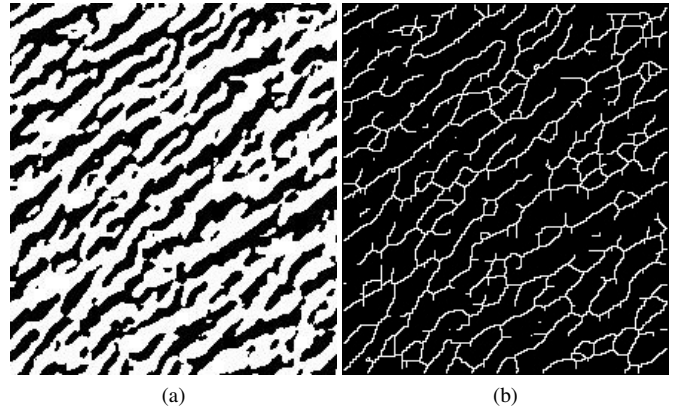


Fig. 8. (a) Sección de crestas de olas antes de la esqueletización, (b) Sección de crestas después de la esqueletización.

de contornos de objetos o de adelgazamiento para obtener el llamado esqueleto de la región [16]. Este proceso también se denomina esqueletización y se basa en la eliminación iterativa de los puntos de una región que están sujetos a un conjunto de restricciones que los convierten en contornos de objetos segmentados. En nuestro caso se presupone que los objetos serían las crestas de las olas compuestas por píxeles blancos. (Ver Fig. 8)

### III. CÁLCULO DE DISTANCIAS

El cálculo de las distancias entre crestas de olas está basado en una idea sencilla pero efectiva. Entendamos que la distancia entre una ola y otra sería la menor distancia entre un punto del centro de una cresta (esqueleto) y el centro de la cresta siguiente en dirección del oleaje. Si se adopta el hecho de que el esqueleto de la cresta de una ola se extiende a lo largo de esta aproximadamente como un segmento de recta, se pudiera tratar la imagen como un conjunto de líneas blancas sobre un fondo negro. Luego solo se tendría que medir la distancia entre crestas de olas recorriendo la imagen por perfiles paralelos en dirección del oleaje. Esta consideración es una aproximación de la realidad, pero a continuación se analizará las ventajas de la misma.

#### A. Ventajas y Descripción de los Perfiles Paralelos

La imagen de la sección de olas proviene de un entorno natural, por lo que está compuesta de elementos complejos



Fig. 9. Algunas características de las crestas que aportan errores.

en cuanto a su estructura y color. Este hecho junto con el error numérico adquirido durante el proceso de digitalización de una imagen, y a su vez de discretización de un espacio continuo, dificulta la exactitud de los resultados de un algoritmo numérico. Específicamente el cálculo de distancias entre olas está sujeto a errores, producto de la distribución natural de las crestas de olas. Si se observa la imagen derecha de la Fig. 8, que representa el esqueleto de una sección de crestas de olas, se observa que hay crestas que se tocan en un punto y sin embargo no son la misma cresta. Existen objetos que conectan dos crestas diferentes, lo que complicaría el hecho de separar crestas mediante un algoritmo de detección de objetos conectados. Se pueden ver también rupturas y bifurcaciones en la formación de cada cresta (ver Fig. 9).

Sin embargo, las problemáticas que se presentan en la Fig. 9 pueden ser suavizadas. Imagínese que se segmentan una cierta cantidad de crestas utilizando un algoritmo de detección de puntos conectados que dependa de la dirección del oleaje, o sea, que se segmenten objetos aproximados a pedazos de rectas. Por ejemplo, en la imagen de la Fig.9 la dirección del oleaje es aproximadamente noroeste, por lo que recorriendo la imagen de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, una vez detectado un píxel blanco, se buscan sus vecinos blancos conectados, pero solo píxeles blancos en el vecino de la izquierda, abajo y esquina inferior izquierda. Se marcan los píxeles vecinos que cumplen las condiciones y se repite el proceso de búsqueda en cada uno de ellos (ver Fig. 10).

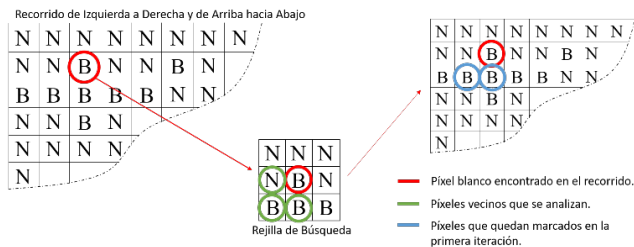


Fig. 10. Proceso de selección de vecinos.

Una vez que se tenga una cierta cantidad de crestas segmentadas según el criterio anterior (Ver Fig. 11 (b)), se calcula -mediante regresión lineal- la pendiente de la recta que mejor aproxima a cada cresta segmentada y se promedia las pendientes obtenidas para cada cresta. Esta pendiente promediada describirá la recta que mejor aproxima a todas las crestas de la imagen, o sea, que será la recta que mejor se aproxima a la

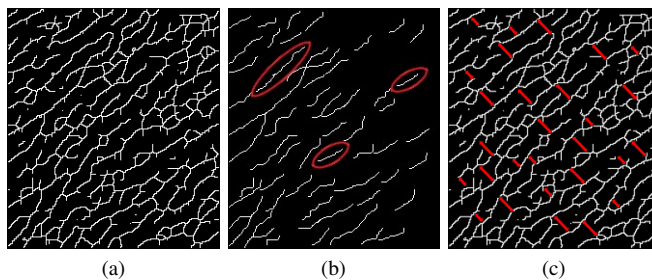


Fig. 11. (a) Sección de crestas esqueletizadas, (b) Proceso de selección de crestas, (c) Cálculo de distancias mediante perfiles paralelos.

dirección del oleaje. Finalmente recorriendo la imagen sobre segmentos perpendiculares a la pendiente promedio, se podrán contabilizar las distancias entre crestas de olas (ver Fig. 11 (c)). Este procedimiento es la estrategia que se propone para este tipo de aplicación.

#### IV. APLICACIONES

##### A. Estimación de Energía Cinética Disipada

Algunas de las crestas de olas de menor intensidad, desaparecen durante su paso por el arrecife producto de la interacción con el mismo, pero se puede suponer que la gran mayoría de las olas que entran en el arrecife salen de este para luego terminar su recorrido al estrellarse en la costa. Considérese la superficie  $S_1$  como el momento en que las crestas de olas entran en el arrecife coralino, y la superficie  $S_2$  el momento en que los frentes de olas salen del arrecife (ver Fig. 12). El periodo ( $\tau$ ) de una ola es inalterable e independiente de la profundidad del océano [19], por tal motivo, se puede establecer una ecuación de continuidad entre la frecuencia en la superficie  $S_1$  y la frecuencia en la superficie  $S_2$ .

Sean  $v_1$  y  $v_2$  las velocidades de las crestas de olas en cada una de las superficies. Si se denota por  $f_1$  y  $f_2$  las frecuencias en ambas superficies, entonces

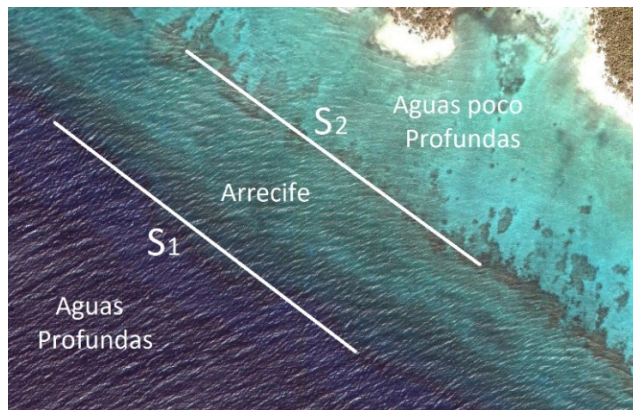


Fig. 12. Superficies  $S_1$  y  $S_2$ .

$$f_1 = \frac{v_1}{\lambda_1} \quad y \quad f_2 = \frac{v_2}{\lambda_2}, \quad (1)$$



donde  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son las longitudes de ondas promedio en cada una de las superficies, o sea, las distancias promedio entre crestas de olas. Entonces se tiene que,

$$f_1 \approx f_2 \Rightarrow \frac{v_1}{\lambda_1} \approx \frac{v_2}{\lambda_2}. \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que la energía cinética  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ , se obtiene que,

$$\frac{v_1}{\lambda_1} \approx \frac{v_2}{\lambda_2} \Rightarrow \frac{E_{c1}}{\lambda_1^2} \approx \frac{E_{c2}}{\lambda_2^2}, \quad (3)$$

donde  $E_{c1}$  y  $E_{c2}$  son la energía cinética de las olas en cada una de las superficies. Finalmente,

$$\frac{E_{c1}}{E_{c2}} \approx \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^2. \quad (4)$$

Nótese que la última expresión nos dice que la proporción que existe entre la energía cinética en ambas superficies es aproximadamente igual a la proporción entre los cuadrados de las longitudes de ondas. Es decir, una vez calculadas las distancias entre crestas de olas en zonas de aguas profundas y aguas poco profundas, se podrá estimar que porcentaje de la energía cinética se disipó durante el paso de los frentes de olas por el arrecife.

### B. Cálculo de Velocidades

La velocidad, así como la mayoría de las características de las olas, depende de la relación entre la longitud de onda y la profundidad del océano [20], [21]. En particular, la longitud de onda determina el tamaño de las órbitas de las moléculas de agua dentro de una ola, mientras que la profundidad del océano determina la forma de la órbita. Cuando la profundidad es mayor que la mitad de la longitud de onda, decimos que las olas se mueven sobre aguas profundas. En este caso las órbitas tienen forma circular y podemos calcular la velocidad de las olas mediante la siguiente relación:

$$v \approx \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}, \quad (5)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\lambda$  la longitud de onda. Pero como  $g$  y  $\pi$  son constantes,

$$v \approx 1.251\sqrt{\pi}. \quad (6)$$

Cuando las olas entran en aguas poco profundas (la profundidad es menor que la mitad de la longitud de onda), las orbitas se achatan formando elipses, debido a la proximidad del fondo marino [22]. Aplicando las ecuaciones de Boussinesq [1], [2] se tiene que  $v \approx \sqrt{gd} \approx 3.1\sqrt{d}$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $d$  es la profundidad del agua. Pero es conocido que la profundidad en aguas poco profundas es aproximadamente igual a la veintava parte de la longitud de onda original de la ola [19]. O sea, en aguas poco profundas se tiene que,

$$v \approx 3.1\sqrt{\frac{\lambda_0}{20}} \approx 0.69\sqrt{\lambda_0}, \quad (7)$$

donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda inicial de la ola cuando todavía se encontraba en aguas profundas.

TABLA I  
LONGITUDES DE ONDAS EN DOS SECCIONES

	Distancia Media	Mayor Distancia	Menor Distancia
AP	20.01m	32.83m	14.07m
AS	10.45m	18.72m	6.24m

### V. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN

La imagen que se utilizará en este experimento fue proporcionada por el Instituto de Ciencias del Mar de Cuba (ICIMAR) y se representa en la Fig. 13. La región que se muestra en la imagen pertenece a una zona de la costa norte de la provincia de Holguín, Cuba. La imagen cuenta con información en forma de metadato sobre la geolocalización de cada pixel. Se realizará el estudio en dos regiones de la imagen. En lo adelante diferenciaremos ambas regiones por las siglas *AP* y *AS* respectivamente.

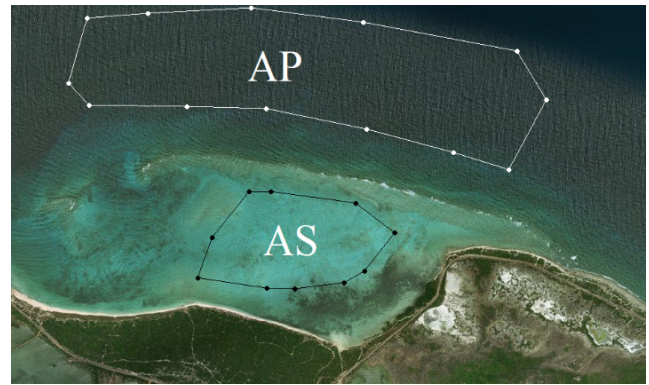


Fig. 13. Región de la costa norte de Holguín, Cuba. Aguas profundas (AP), aguas superficiales (AS).

Nótese que la región *AP* representa una zona de aguas profundas y la región *AS* una zona de aguas superficiales. Una vez procesadas ambas regiones utilizando la estrategia de procesamiento propuesta en la Sección II, se calculan las distancias mediante los perfiles paralelos, tal y como se explica en la Sección III, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla I.

Por tanto, teniendo en cuenta las longitudes de ondas medias y siguiendo lo explicado en la subsección A de la Sección IV, se puede estimar que la energía disipada cuando los frentes de olas atraviesan los arrecifes es de un 72.73%. También, siguiendo la subsección B de la Sección IV, se puede decir que las velocidades de los frentes de olas en *AP* y *AS* fueron de 5.59m/s y 3.08m/s respectivamente.

Para comparar nuestros resultados se utilizarán los servicios web gratuitos Planetcalc Online Calculator [23] y Swellbeat Wave Calculator [24]. Ambos servicios requieren del conocimiento del período de las ondas del oleaje y de la profundidad del mar. Estos parámetros se pueden obtener también de manera gratuita utilizando para el período el servicio Oceanweather Inc [25] y para la profundidad del mar los Bathymetric Maps de la National Centers for Environmental Information (NOAA) [26].

Según los Bathymetric Maps de la NOAA, en la costa norte de Holguín, Cuba, se pueden encontrar zonas de aguas profundas de aproximadamente once metros, y las regiones de aguas superficiales o poco profundas, oscilan alrededor de los dos metros. Por otro lado, las observaciones marinas de la Oceanweather Inc válidas para el 25 de noviembre del 2018, arrojan valores para el período de 3.9 segundos en aguas profundas y 2.89 segundos para aguas superficiales.

Teniendo esta información se estudiaron las longitudes de ondas y las velocidades a través de la Planetcalc Online Calculator y la Swellbeat Wave Calculator. Los resultados se mostrarán en sendas tablas comparativas, la Tabla II relacionada con las longitudes de ondas y la Tabla III relacionada con las velocidades.

Con el objetivo de estudiar la efectividad de la estrategia propuesta en el cálculo de la longitud de onda promedio de un frente de olas, se obtuvieron un conjunto de 14 imágenes de zonas costeras a lo largo del archipiélago cubano, similares a la imagen utilizada en el procedimiento anterior (ver Fig. 13). Todas las imágenes fueron extraídas de la USGS Earth Explorer, específicamente de los datos capturados por el satélite Landsat-7 el 26 de octubre del 2018. Las imágenes fueron procesadas y se calculó la distancia promedio o longitud entre crestas de olas. Posteriormente se estudiaron datos proporcionados por el Instituto de Meteorología de Cuba acerca de las características del oleaje en distintas zonas de las costas Cubanas en fechas cercanas a la captura de las imágenes. Finalmente se realizó un estudio comparativo entre nuestros datos y los datos del Instituto de Meteorología (ver Tabla IV) mediante el análisis del error cuadrático medio, utilizando la fórmula 8,

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (L_i - l_i)^2, \quad (8)$$

donde  $L_i$  representa las longitudes de ondas obtenidas de los datos del Instituto de Meteorología,  $l_i$  son los datos obtenidos mediante el procedimiento de cálculo sobre las imágenes y  $M$  es la cantidad de imágenes procesadas, obteniéndose un error cuadrático medio de 0.263 aproximadamente.

Los resultados evidencian que la estrategia de procesamiento propuesta, junto con el método de medición mediante perfiles paralelos, posibilita la obtención de valores muy aproximados a los adquiridos en los servicios web antes mencionados. Además, la comparación que se realizó con los datos proporcionados por el Instituto de Meteorología de Cuba para el cálculo de la longitud de onda, reflejó un error cuadrático medio menor que un 2%. Nótese que a diferencia de la metodología utilizada en los servicios web, la estrategia propuesta no requiere del uso de magnitudes tales como la profundidad del mar y el período del oleaje, y por supuesto no se requiere de ningún instrumento de medición en el terreno, lo que facilita la obtención de la longitud de onda y la velocidad mediante el uso de una imagen satelital. Además, el método propuesto permite estimar la energía disipada en los arrecifes mediante un análisis sencillo, siendo esta su aplicación fundamental.

TABLA II  
COMPARATIVA DE LAS LONGITUDES DE ONDAS

	Perfiles Paralelos	Planetcalc Online Calc.	Swellbeat Wave Calc.
AP	20.01m	20.27m	19.88m
AS	10.45m	10.51m	10.26m

TABLA III  
COMPARATIVA DE LAS VELOCIDADES

	Perfiles Paralelos	Planetcalc Online Calc.	Swellbeat Wave Calc.
AP	5.59m/s	5.62m/s	5.53m/s
AS	3.08m/s	3.12m/s	3.07m/s

TABLA IV  
COMPARATIVA DE LAS LONGITUDES DE ONDA

	Longitudes de Ondas Inst. Meteorología	Longitudes de Ondas Procesamiento
Img.1	19.34m	19.12m
Img.2	17.45m	17.51m
Img.3	20.67m	21.2m
Img.4	22.1m	20.89m
Img.5	18.14m	19.01m
Img.6	24.53m	23.92m
Img.7	23.61m	23.12m
Img.8	12.27m	12.64m
Img.9	21.36m	21.08m
Img.10	11.12m	10.95m
Img.11	19.72m	19.64m
Img.12	18.32m	18.54m
Img.13	24.7m	24.26m
Img.14	15.82m	15.93m

## VI. CONCLUSIONES

En el trabajo se presentó una estrategia de procesamiento de imágenes costeras para calcular las distancias entre crestas de olas en diferentes regiones de la imagen.

Esta herramienta permite la estimación de la energía cinética que se disipa cuando los frentes de olas atraviesan los arrecifes coralinos. Además, se proporciona una vía de cálculo de las velocidades de los frentes de olas en diferentes posiciones de la imagen. Una de las principales ventajas de nuestra estrategia, es que puede ser utilizada para la detección automática de cualquier variación en la influencia de los arrecifes sobre la disipación de la energía del oleaje producto de un deterioro de su estructura.

La estrategia puede verse limitada si las imágenes no tienen una buena resolución, al punto de no poderse definir las crestas de olas. Otro problema viene dado por la existencia de objetos en la imagen, producto de algún error de captación, que pueden ocasionar pérdida de información a la hora de procesar las imágenes. A veces, algunas zonas de la imagen están cubiertas por nubes, lo que impide la extracción de información pues no se detectan las crestas de olas.

Como paso siguiente en la investigación, se buscarán estrategias que permitan realizar análisis de batimetría oceánica a partir de imágenes hiperspectrales satelitales. Además se estudiarán las relaciones que se pueden establecer entre la profundidad, la longitud de onda y la velocidad, a partir de la extracción de características de este tipo de imágenes.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Claudia Bolívar Rodríguez y Yudelsy Carrillo Betancourt del Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR, La Habana), así como a Tony Castillo Martín, Omar Ochoa Rodríguez, Yoandys León Batista y Nigreisy Montalvo del instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF, La Habana) por la colaboración en las diferentes etapas del trabajo. El trabajo recibió el apoyo financiero del Programa Nacional de Ciencias Básicas de la República de Cuba y del ICIMAR.

#### REFERENCIAS

- [1] L. H. Holthuijsen (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge. Chapter 3 and Chapter 7, pp 240-242. ISBN-13 978-0-511-27021-5.
- [2] I. R. Young (1999). *Wind generated ocean waves*. Elsevier. Chapter 2 and Chapter 8, pp. 207. ISBN 0-08-043317-0.
- [3] O. M. Phillips (1957), *On the generation of waves by turbulent wind*, Journal of Fluid Mechanics 2(5): pp 417-445.
- [4] J. W. Miles (1957), *On the generation of surface waves by shear flows*, Journal of Fluid Mechanics 3(2): pp 185-204, Bibcode: 1957JFM.....3..185M.
- [5] Richard C. Murphy (2002). *Coral Reefs: Cities Under The Seas*. The Darwin Press, Inc. ISBN 0-87850-138-X.
- [6] M. del Carmen Monzón y J.L. Almazán Gárate (2000). *Descripción, Medida y Análisis del Oleaje*. Universidad Politécnica de Madrid, pp 38-44. ISBN 84-7493-289-0.
- [7] R. Torres (2006). *Sistemas de pronósticos oceánicos y atmosféricos a escala local*. DIMAR-CIOH.
- [8] Article: *INNOVA Oceanografía Litoral* (<http://www.oceanografialitoral.com/category/tags/oleaje/boyas>).
- [9] M. L. Heron, B. Willis, A. Prytz, P. Cetina-Heredia and Y. Mao. *HF Ocean Surface Radar Monitoring for Coral Bleaching in the Great Barrier Reef*. IEEE OCEANS 2006. ISSN 0197-7385. 2007.
- [10] A. Sánchez-Arcilla and C.M. Lemos (1990). *Surf Zone Hydrodynamics*. Ed. CIMNE, pp 310.
- [11] C. J. Galvin (1969). *Breaker travel and choice of design wave height*. Journal of Waterways, Harbor and Coastal Eng. Div, ASCE, WW2, pp. 175-200.
- [12] J. A. Battjes and J.P.F.M. Janssen (1978). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. 16th Conf. on Coastal Eng. ASCE, pp. 569-587.
- [13] USGS Numbered Series (2015). *Landsat-Earth Observation Satellites*. U.S. Geological Survey. ISSN 2327-6932.
- [14] A. N. Evans (2002). *A Gamma Filter for Multi-Look Synthetic Aperture Radar Images*. International Symposium on Signal Processing and its Applications, IEEE, ISBN 0-7803-4114-7.
- [15] D. H. Ballard and C. M. Brown (1982). *Computer Vision*. Prentice-Hall, pp. 65-85. ISBN 0-13-165316-4.
- [16] R. R. Morales and J. H. Azuela (2011). *Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes*. Ra-Ma, pp. 186-189, 270-289. ISBN 978-84-9964-077-8.
- [17] R. C. Gonzales and R. E. Woods (2002). *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, pp. 175-178. ISBN 0-201-18075-8.
- [18] J. Minichino and J. Howse (2015). *Learning OpenCV 3 Computer Vision with Python*. Packt Publishing, Second Edition. ISBN 978-1-78528-384-0.
- [19] Tom Garrison (2009). *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. 7th Edition. Yolanda Cossio. ISBN 978-0495391937.
- [20] O. M. Phillips (1957). *On the generation of waves by turbulent wind*. Journal of Fluid Mechanics. 2(5): 417-445.
- [21] J. W. Miles (1957). *On the generation of surface waves by shear flows*. Journal of Fluid Mechanics. 3(2): 185-204.
- [22] H. Lamb (1994). *Hydrodynamics* (6th ed.) Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-45868-9.
- [23] Planetcalc Online Calculator, available: <http://www.planetcalc.com>
- [24] Swellbeat Wave Calculator, available: <http://www.swellbeat.com/wave-calculator/>
- [25] Oceanweather Inc, available: <http://www.oceanweather.com/data/>
- [26] National Centers for Environmental Information, available: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/maps/>



**Hanzel Rodríguez López** received his diploma in Mathematics from University of Havana, Cuba, in 2016, and is a M.Sc. student in numerical mathematics in the same institute. He has been working for the Institute of Cybernetics, Mathematics and Physics (ICIMAF), in the Image Processing Group as a researcher since 2016. He was awarded in the category "Relevant Work" in the Forum of Science, Innovation and Technology of Havana, Cuba. His current research interest includes Digital Image Processing, Numerical Mathematics and Programming.



**Roberto Rodríguez Morales** received his diploma in Physics from the Physics Faculty, Havana University in 1978 and the PhD. Degree from Technical University of Havana, in 1995. Since 2015, he is the Director of Institute of Cybernetics, Mathematics and Physics (ICIMAF), and since 1998 the Head of the Digital Signal Processing Group. Dr. Ss. Thesis from February 2017. His research interests include Segmentation, Restoration, Mathematical Morphology, Visual pattern recognition, Analysis and Interpretation of images, and Mean shift iterative algorithm. He has published two books, four chapters of book, and more than 140 articles in international journals and in many international conferences. He has received more of ten prizes national e international.



**Augusto González García** received his diploma in Physics from University of Havana, Cuba in 1980, the PhD in Theoretical Physics from the P.N. Lebedev Physical Institute in Moscow, Russia in 1990, and the Dr in Sciences degree from the Institute of Cybernetics, Mathematics and Physics (ICIMAF), Havana, Cuba in 2005. He is a Member of the Cuban Academy of Sciences since 2006 and recipient of the Cuban National Award in Physics in 2014. His current research interests are related to modeling biological processes, in particular mutations.