

LOS PROCESOS DE TRANSFORMACION DEL OLEAJE E INCREMENTOS DEL NIVEL DEL MAR EN CAYO LARGO DEL SUR, ARCHIPIELAGO DE LOS CANARREOS

Autor: MSc. Reynaldo Casals Taylor, Instituto de Meteorología

RESUMEN. Cayo Largo del Sur, ubicado en el Archipiélago de Los Canarreos, borde externo de la plataforma suroccidental de Cuba, fue escogido como localidad para estudiar los procesos de transformación del oleaje que se propaga desde las aguas profundas hacia aguas poco profundas de la costa sur, los incrementos del nivel del mar provocados por el oleaje y la acción del viento en ambas costas, además de las inundaciones que se pueden producir como consecuencia de dichos incrementos de nivel. El trabajo persigue el objetivo de determinar las zonas costeras de Cayo Largo del Sur donde pueden esperarse altas olas debido a la concentración de su energía, así como la determinación de las zonas del litoral donde pueden ser notables las inundaciones.

Las metodologías empleadas para calcular la refracción y el efecto “shoaling” tienen en cuenta las modificaciones de las velocidades de fase y de grupo de las olas, provocadas por el paso de las olas de aguas profundas a profundidades intermedias y reducidas, mientras que el cálculo del incremento del nivel del nivel del mar considera el empleo de dos técnicas diferentes cuando el fondo marino es de pendiente abrupta, y cuando la profundidad es reducida y la pendiente del fondo, suave.

Los resultados obtenidos muestran que los oleajes más peligrosos para la costa sur provienen de las direcciones sudeste, sursudeste y sur, ya que sobre las mismas el efecto “shoaling” provoca el incremento de las alturas de las olas en aguas de profundidad reducida, mientras que se pudo determinar los valores de los incrementos del nivel del mar debidos al “wave set up” y el “wind set up” para ambas costas, y se estimaron los alcances de las inundaciones derivadas de estos incrementos.

INTRODUCCION

No hay dudas de que los procesos de transformación de oleaje son de enorme importancia en las zonas costeras debido a su efecto modificador sobre la dinámica litoral. La composición física y granulometría del material del fondo marino y la línea costera, determinan su mayor o menor vulnerabilidad ante los procesos que ocurren en la zona de rompiente.

Los procesos de transformación de oleaje están determinados, en primer lugar, por la disminución de la profundidad, la cual a partir de un valor crítico convierte el movimiento ondulatorio de la superficie del mar en movimiento de traslación, provocando deformaciones y rompientes en las crestas de las olas, incrementos del nivel del mar y corrientes litorales inducidas por las olas.

En lechos marinos conformados por material arenoso, fangoso o mezclado, los fenómenos que ocurren en la zona de rompiente intervienen en los procesos de erosión litoral, transporte y acumulación de sedimentos, lo que puede modificar constantemente la batimetría de una localidad y el contorno de la

línea costera. El conocimiento de estos procesos sirve para apoyar tareas de recuperación de la dinámica costera en playas, la construcción de obras de protección y la ubicación de líneas de drenaje.

Dada la necesidad de conocer la ubicación de las zonas de rompientes y determinar los ascensos del nivel del mar inducidos por el oleaje con objetivos de caracterización, se realizaron tales estudios para Ciudad de La Habana por Mitrani et al (1983) y Juantorena (2001), en los grupos insulares de Cuba con vistas a su uso turístico (Colectivo de autores, 1991) y dentro de varios servicios técnicos hechos por especialistas del Departamento de Meteorología Marina.

El término transformación de oleaje se refiere a la modificación natural del movimiento de las olas al llegar a aguas poco profundas o generarse en ellas. Varios factores inciden en estas modificaciones, como son la poca profundidad, la refracción, las pérdidas de energía debidas a la fricción del fondo y la percolación a través de los intersticios en los fondos de material granular, difracción, reflexión y movimiento del fondo provocado por las olas (OMM No. 702, 1988).

Existen varios métodos para predecir gráficamente la altura de las olas combinando los efectos de la poca profundidad y la refracción. La mayoría de ellos se fundan en los trabajos de Johnson, O'Brien e Isaacs (1948); Arthur, Munk e Isaacs (1952) y Dorrestein (1960) (citados por OMM No. 702, 1988).

Otro efecto de la disminución de la profundidad sobre el oleaje es el incremento del nivel del mar o apilamiento del agua en la línea de costa, el cual se puede estimar empleando la metodología expuesta en CERC (1984), basada en la teoría de Longuet – Higgins y Stewart (1963) para determinar la depresión o caída de la ola en la zona de rompiente en combinación con la teoría de la onda solitaria.

Estos incrementos del nivel del mar también ocurren a expensas de la acción tangencial del viento sobre la superficie del agua en áreas extensas de poca profundidad, donde el oleaje alcanza poco desarrollo. Las metodologías más empleadas para solucionar este problema han sido las expuestas por Bretschneider (1966), SNIP (1976; 1983) y Shore Protection Manual (1984).

El presente trabajo tiene como objetivo calcular los efectos de la refracción y el “shoaling” sobre la altura, dirección y velocidad de propagación del oleaje proveniente de aguas profundas en la costa sur de Cayo Largo del Sur, así como determinar su influencia en el incremento del nivel del mar, dado el desarrollo que presenta la región como polo turístico. Los peligros reales de inundación costera en el cayo sugieren la necesidad de realizar estudios integrados para ubicar instalaciones recreativas o relocalizar instalaciones turísticas.

CARACTERISTICAS FISICAS Y CLIMATICAS DEL AREA DE ESTUDIO.

El Archipiélago de los Canarreos constituye el límite sur del Golfo de Batabanó y se extiende desde Cayo Guano del Este hasta los Cayos San Felipe, al oeste de Isla de la Juventud. El Archipiélago está bordeado por un bajo de arrecifes coralino muy acantilado y presenta notables extensiones de playas

arenosas, incluyendo la costa sur de Isla de la Juventud, mientras que al norte el bajo costero es cenagoso y con pendientes muy suaves que se dirigen hacia la parte central del Golfo de Batabanó.

Las profundidades descienden de manera brusca al sur de los cayos, pudiéndose encontrar la isobata de 1000 metros muy cerca del borde de la plataforma insular, mientras que al norte se extiende el mar somero que caracteriza al Golfo de Batabanó, con un relieve aplacerado y poco profundo (ICH, 1989). Por su parte, el bajo a menos de 2 metros de profundidad en la costa norte se extiende hasta 6 millas náuticas en el Golfo de Batabanó. Las profundidades máximas en las aguas adyacentes a esta vertiente oscila entre 4 y 5 metros y su extensión es de unos 84 kilómetros en la dirección noroeste hasta la costa de Península de Zapata.

Cayo Largo del Sur es el mayor de los que forman el Archipiélago de Los Canarreos, su vertiente norte es la de menor pendiente, con áreas donde el agua se acumula de forma natural en lagunas saladas que pueden recibir la influencia directa del incremento del nivel del mar por causas meteorológicas.

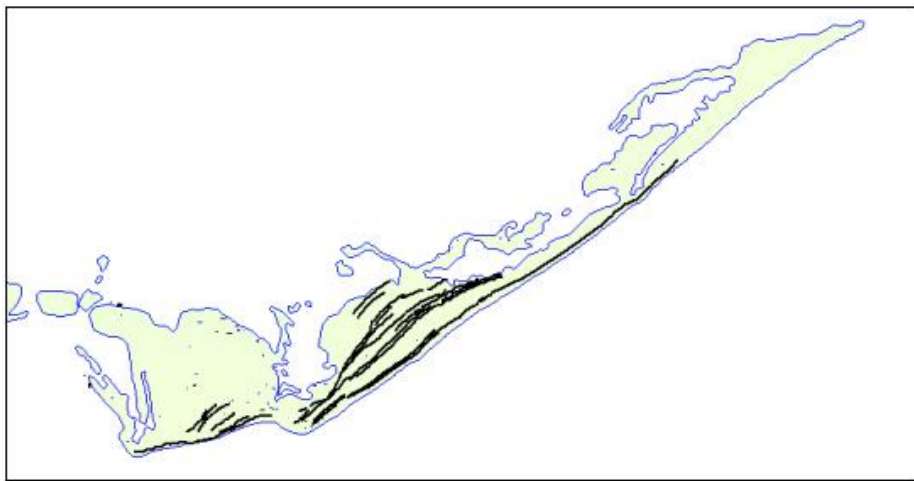


Figura 1. Distribución de los parteaguas en Cayo Largo del Sur, indicando las áreas más elevadas, como promedio.

Las afectaciones por oleajes extremos, eventos de incrementos del nivel del mar e inundaciones costeras en Cayo Largo del Sur están asociadas a la ocurrencia de vientos fuertes del sur o “sures” y al paso o afectación de ciclones tropicales.

Según los estudios cronológicos de los “sures” (Ballester, 2001), los meses de marzo y abril han presentado las mayores frecuencias como promedio anual en la región occidental de Cuba, con valores de 2.1 y 1.3, respectivamente. Bajo condiciones específicas de velocidad y persistencia, estos vientos son capaces de generar altas olas que pueden producir apilamiento del agua en el litoral costero e inundaciones por penetraciones del mar, así como procesos erosivos que afectan a la franja arenosa, además de las pérdidas que han provocado a la actividad económica fundamental en algunos casos.

Las afectaciones al cayo por ciclones tropicales son de gran importancia, dada su ubicación en la Región I de vientos máximos al oeste del meridiano 80° W (Vega et al. 1989), en la cual se han registrado las velocidades máximas y las mayores frecuencias anuales de paso de ciclones tropicales en Cuba. Las

trayectorias más peligrosas son de sur a norte y de suroeste a nordeste, recibiendo daños extensivos ambas costas alternativamente, mientras que un movimiento de este a oeste por el norte del cayo representaría daños a la costa norte. No obstante, ciclones distantes como el fuerte huracán Mitch, de noviembre 2001, con lento movimiento por tiempo prolongado pueden emitir trenes de mar de leva hacia la costa sur del cayo y provocar el acumulamiento del agua de mar por wave set up.

Pérez (1994) elaboró las rejillas bilogarítmicas para el régimen extremo del viento y el oleaje de aguas profundas en los tramos costeros de Cuba, en las cuales se muestran los períodos de retorno ($P \frac{caso}{años}$) de la velocidad del viento (W), la altura de la ola significativa (H_{sig}), la altura de la ola máxima (H_{max}) y la longitud de onda (λ). Los valores de cada elemento para aguas profundas de la costa sur de Cuba desde Cabo San Antonio hasta Bahía de Cochinos, excepto de H_{max} , se muestran en la Tabla 1. Los mismos pueden ser empleados como origen de los cálculos de los efectos de refracción y “shoaling” en la costa sur de Cayo Largo del Sur, así como de los incrementos de nivel del mar por los efectos de la rompiente de oleaje y el arrastre del viento.

Tabla 1. Régimen extremo del viento y los elementos de olas en los mares al sur de la región occidental de Cuba.

$P \frac{caso}{años}$	W (m/s)	H_{sig} (m)	λ (m)
1	13	2.9	47
0.2	20	4.6	90
0.1	25	5.5	112
0.05	36	6.8	150
0.02	50	10.1	180
0.01	68	11.7	220
0.005	80	13.0	260

METODOLOGIA EMPLEADA

Para realizar el estudio del comportamiento de la transformación del oleaje proveniente de mar abierto, en aguas poco profundas es necesario conocer las modificaciones que sufren las velocidades de fase y de grupo de las olas en su desplazamiento hacia la costa, ya que las alturas resultantes de las olas están estrechamente vinculadas a las relaciones entre estos parámetros en aguas profundas y poco profundas.

En aguas profundas, la velocidad de fase depende de la relación $\frac{h}{\lambda}$, y por lo tanto, en función de ésta se determina el límite de aguas profundas para diferentes alturas de olas. El criterio empleado para definir los límites de las aguas profundas y las profundidades de transición, fue tomado de OMM (1988), que plantea:

a. Cuando $\frac{h}{\lambda} > 0.25$ la ola se propaga por aguas profundas ya que las velocidades de fase (c) y de grupo (c_g) dependen solo de la longitud de onda.

b. Cuando $0.04 < \frac{h}{\lambda} \leq 0.25$, las aguas se consideran de profundidades intermedias ya que c depende de $\tanh(2\pi h/\lambda)$ y c_g depende del número de onda (k)

c. Cuando $\frac{h}{\lambda} \leq 0.04$, las aguas se consideran poco profundas y la velocidad de fase sólo depende de la profundidad y se iguala a la velocidad de grupo.

Por tanto, la transformación del oleaje en aguas poco profundas es el resultado de las influencias de la fricción con el fondo marino y los cambios de profundidad. Además, cuando la ola siente la influencia del fondo marino, disminuye su velocidad y consiguientemente su longitud de onda de modo proporcional.

A continuación se describirán los dos fenómenos más importantes que determinan la altura del oleaje en áreas de profundidades intermedias y reducidas, de acuerdo con el criterio explicado anteriormente.

Efecto “shoaling”

El efecto “shoaling” o de poca profundidad describe la influencia del fondo sobre la velocidad de grupo de las olas que se desplazan en aguas poco profundas sin cambios en la dirección. De esto resulta que las olas aumentan su altura al sufrir una disminución en su velocidad de grupo, lo que se demuestra mejor cuando las crestas son paralelas a las isobatas.

Esta altura se puede determinar a partir de esta conservación del transporte de energía, asumiendo que no hay disipación, aplicando:

$$H = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} H_0 \quad (1)$$

donde H_0 y c_{g0} son las condiciones iniciales de la altura de la ola significativa y la velocidad de grupo, y

$\sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}}$ es el coeficiente de “shoaling” (K_s).

Refracción

Si las armónicas de crestas largas se acercan a la costa formando un ángulo con las isolíneas de profundidad (isobatas), se producirán diferencias de velocidad a lo largo de una misma cresta, pues la parte de la ola que permanece en aguas más profundas será más veloz que aquella que se mueve sobre aguas más someras, el resultado es que las crestas tenderán a situarse en sentido paralelo a las

isobatas, produciéndose el fenómeno de la refracción. El cambio de la dirección de desplazamiento de la cresta es entendido también como cambio en la dirección del flujo de energía de las olas, el cual está indicado por los rayos de olas, los cuales son ortogonales a las crestas en ausencia de corrientes.

Este fenómeno también afecta la altura de la ola, ya que el cambio de dirección de las líneas ortogonales puede significar tanto la separación como la concentración de las mismas sobre la costa. Se puede conocer la altura de la ola y determinar el cambio en la dirección de propagación en cada uno de los

puntos de cálculo en aguas donde $\frac{h}{\lambda} \leq 0.25$, si son conocidos la profundidad, así como la altura de la

ola, el período y la dirección de propagación en aguas profundas (CERC, 1984) mediante la aplicación de la Ley de Snell, ya que se puede asumir que las isobatas son relativamente rectas. Entonces, luego de calcular el cambio de dirección, el coeficiente de refracción se calcula mediante la fórmula:

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_o}{\cos \theta}} = \sqrt{\frac{b_o}{b}} \quad (2)$$

siendo b_o y b la separación entre las ortogonales en los puntos considerados.

Se obtiene entonces que la altura de la ola transformada por los procesos de disminución de la velocidad de grupo y el cambio de dirección de la ola en su propagación hacia la costa sobre aguas someras es:

$$H = H_o K_s K_r \quad (3)$$

donde H_o es la altura de la ola significativa en aguas profundas.

Hay que destacar que ambos procesos se presentan frecuentemente de forma simultánea, pero en el caso de que los rayos de olas tengan una orientación normal a la costa, las crestas serán paralelas a las isobatas y no existirá refracción ($K_r = 1$), por lo que el cambio de la altura de la ola se deberá enteramente al cambio de la velocidad de grupo de las olas, representado en el "shoaling".

Cálculo del wave set up

De acuerdo con CERC (1984), cuando las olas se acercan a la costa, el nivel medio del agua decrece hasta un punto mínimo d_b donde las olas rompen. La diferencia en elevación entre este punto y el nivel del agua tranquila es la caída de la ola S_b . Más allá del punto d_b , el nivel medio del agua se eleva hasta que intercepta la costa. El ascenso total ΔS entre estos puntos es el wave set up entre la zona de rompiente y la costa. La diferencia entre el ascenso total y la caída de la ola es el wave set up neto S_w , lo que se puede obtener mediante:

$$S_w = 0.15d_b - \frac{g^{0.5}(H_o')^2 T}{64\pi d_b^{1.5}} \quad (4)$$

Cálculo del wind set up

La metodología utilizada fue la empleada por Mitrani et al (2000) para calcular el incremento del nivel del mar por arrastre del viento en la costa sur de La Habana, según lo propuesto por Bretschneider (1966), SNIP (1976; 1983) y Shore Protection Manual(1984).

Para su uso práctico, la formulación final en diferencias finitas quedará de la siguiente forma:

$$\Delta z = \frac{\Delta x \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right) C_d U_{10}^2 \cos \theta}{g(h + \Delta z_p)} \quad (5)$$

donde Δz es la sobreelevación del nivel del mar en la costa dada en metros, Δx es la distancia recorrida por el viento sobre la superficie marina dada en metros y h es la profundidad media del acuífero dada en metros.

Obtención de las franjas de inundación

Se empleó la carta náutica de Cayo Largo del Sur de escala 1:150 000, edición de 1976 del Instituto Cubano de Hidrografía. De aquí se tomaron varios sectores de playa en los que se calcularon las pendientes del fondo, necesarias para la estimación de la elevación del nivel del mar por efecto del oleaje.

En la carta náutica se pudo observar que el fondo tiene una topografía submarina no muy accidentada, o sea, las isobatas son bastante regulares y casi paralelas a todo lo largo de la zona de estudio, aunque se observa una separación de las mismas a medida que se dirigen hacia el extremo nordeste del cayo.

Se consideró como base para este cálculo la profundidad de 10 metros, ya que el valor máximo de la profundidad de rompiente es de alrededor de 15 metros, y esta diferencia se puede despreciar pues no representa un incremento importante en la distancia hasta la costa. Finalmente la fórmula de trabajo que queda después de un análisis trigonométrico es la siguiente:

$$A = \frac{d_h}{m} \quad (7)$$

donde m es la pendiente de la playa y d_h es la distancia hasta la profundidad de cálculo.

OBTENCION DE LOS VALORES DE INCREMENTO DEL NIVEL DEL MAR Y LA ALTURA DE LAS OLAS EN LAS COSTAS DE CAYO LARGO DEL SUR

Determinación de los ascensos del nivel del mar

Resulta de importancia considerar las alteraciones que sufre la profundidad en la zona de rompientes, pues para oleajes extremos incidiendo en la costa sur del cayo, el nivel del mar se incrementa por los aportes de las olas y el viento, por lo que los efectos de la refracción y el “shoaling” ocurrirán con niveles del mar superiores al del agua tranquila.

Se partió de conocer la pendiente del fondo en tres puntos a lo largo de la costa sur del cayo, obteniéndose un promedio de 0.00404, lo que indica que la pendiente es uniforme y bastante suave desde la profundidad de 10 metros. La aplicación de la metodología propuesta mostró que la diferencia máxima en los resultados es de solo 6 centímetros. En la tabla 2 se muestran los valores de sobreelevación del nivel del mar por rompiente de oleaje que pueden considerarse válidos para la costa sur de Cayo Largo del Sur, donde H_{sig} es la altura de la ola significativa, λ es la longitud de onda, T es el período de la ola, H_b es la altura de la ola rompiente, d_b es la profundidad de rompiente y S_w es el “wave set up” calculado.

Tabla 2. Valores de sobreelevación del nivel del mar por efecto del oleaje

$P \frac{caso}{años}$	H_{sig} (m)	λ (m)	T (m)	H_b (m)	d_b (m)	S_w (m)
1	2.9	47	5	2.53	3.25	0.3
0.2	4.6	90	7	4.17	5.34	0.6
0.1	5.5	112	8	5.02	6.43	0.7
0.05	6.8	150	10	6.31	8.06	0.9
0.02	10.1	180	11	8.98	11.49	1.2
0.01	11.7	220	12	10.52	13.46	1.5
0.005	13	260	13	11.83	15.13	1.6

Por otra parte, también fue valorado el efecto del viento sobre la superficie del mar como componente que altera el nivel del agua en la costa sur. En las siguientes tablas se presentan los resultados para los dos extremos del cayo, atendiendo a la amplitud de la zona sumergida con respecto a la isobata de 20 metros, en las cuales se observa que los valores de incremento del nivel del mar son mayores donde el ancho de la zona sumergida alcanza los 7 kilómetros. Se debe plantear que para velocidades del viento superiores a 40 metros por segundo los valores de incremento son comparables a las surgencias de

huracanes. En las tablas $P \frac{caso}{años}$ es la probabilidad de ocurrencia del valor, W es la velocidad del viento

y S_v es el valor de la sobreelevación por efecto del viento.

Tabla 3. Probabilidades de los ascensos del nivel del mar calculados en la zona de profundidades reducidas en el extremo nordeste del Cayo (ancho 7.0 km)

$P \frac{\text{caso}}{\text{años}}$	W (m/s)	S_v (m)
1	13	0.1
0.1	24	0.3
0.05	33	0.8
0.02	40	1.3
0.01	50	2.4
0.005	60	3.9

Tabla 4. Probabilidades de los ascensos del nivel del mar calculados en la zona de profundidades reducidas en el extremo suroeste del Cayo (ancho de 1.0 km)

$P \frac{\text{caso}}{\text{años}}$	W (m/s)	S_v (m)
1	13	0.03
0.1	24	0.1
0.05	33	0.3
0.02	40	0.6
0.01	50	1.0
0.005	60	1.7

De este modo, en cada uno de los extremos del cayo se aplicará a las profundidades de cálculo los incrementos de nivel del mar correspondientes.

Por su parte, en la costa norte de Cayo Largo del Sur se producirán inundaciones costeras por penetraciones del mar dadas exclusivamente por la acción de vientos fuertes y persistentes sobre aguas poco profundas, los cuales están asociadas al paso de ciclones tropicales, principalmente. Las trayectorias de los ciclones tropicales deberán ser tales que los vientos fuertes sean de dirección noroeste o norte.

El incremento del nivel del mar por efecto del viento fue calculado para diferentes períodos de retorno de las velocidades del viento, obtenidos de Pérez (1994). Los resultados se muestran en la siguiente tabla donde S_v es el incremento del nivel del mar dado en metros

Tabla 5. Incremento del nivel del mar por arrastre del viento en la costa norte de Cayo Largo del Sur.

$P \frac{\text{caso}}{\text{años}}$	W (m/s)	S_v (m)
1/1	13	0.6
1/10	24	1.5
1/20	33	2.9
1/50	40	4.1
1/100	50	6.2

Cálculos de los coeficientes de transformación del oleaje

Los cálculos de los coeficientes de refracción se realizaron para olas provenientes de las direcciones ESE, SE, SSE, S y SSW, sobre las cuales se esperan las mayores alturas. Las alturas escogidas para trabajar fueron las de 2.9 y 6.8 metros con longitudes de onda de 47 y 150 metros, respectivamente, correspondientes a las probabilidades de 1 y 0.05, ya que a nuestro entender proporcionan una adecuada comprensión de las transformaciones del oleaje.

Primeramente, se determinaron los límites de profundidad de la zona de rompientes, de acuerdo con la relación $\frac{h}{\lambda}$, para los cuales se determinan las velocidades de fase y de grupo de las olas.

Para realizar los cálculos de los coeficientes de transformación del oleaje en la costa sur de Cayo Largo del Sur, se preparó un esquema que se ejecutó en hojas de cálculo de Microsoft® Excel 97 que facilitaron el proceso de obtener los coeficientes de refracción y “shoaling” en cada profundidad. La metodología se aplicó a una amplia gama de ángulos de incidencia desde 10° hasta 80°, en correspondencia con la variedad de orientaciones de las isobatas con respecto a los rayos de olas u ortogonales.

Para propósitos prácticos, en este trabajo se ha considerado ausencia de refracción cuando el coeficiente ha tenido valores de 0.99 y 1, en tanto que el efecto “shoaling” se puede considerar en su valor máximo, lo que puede establecerse para ángulos de ataque de las olas hasta 10°, mientras que para los ángulos mayores sólo se aplica el coeficiente de refracción a la altura de la ola significativa.

Los resultados de las olas transformadas por efectos del “shoaling” y la refracción, así como el cambio de dirección de las ortogonales, se representaron sobre esquemas batimétricos de Cayo Largo del Sur.

La determinación de los cambios de dirección de las ortogonales se realizó mediante un procedimiento gráfico que considera como ángulo de partida el que se forma entre la tangente a la isobata local y la cresta de la ola proveniente de mar abierto, la cual es perpendicular a la ortogonal analizada. De acuerdo a la profundidad sobre la que transitará el elemento de cresta se selecciona el ángulo de desviación correspondiente en la hoja de cálculo donde se está trabajando, de lo cual resulta la modificación de la dirección de la ortogonal hasta la costa, tal como lo indica la figura 4.

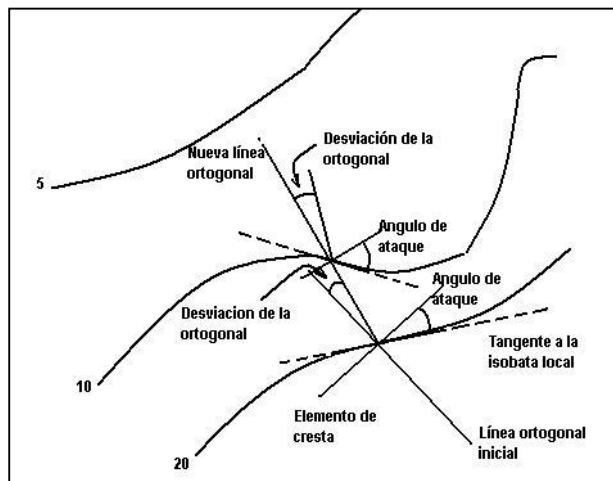


Figura 4. Esquema de la determinación del cambio de dirección de la línea ortogonal en isobatas sucesivas.

La reiteración del procedimiento sobre cada rayo, teniendo en cuenta la orientación que tendrá la isobata próxima para emplear la hoja de cálculo requerida en cada caso, resultará en una distribución de líneas ortogonales que en dependencia de las características del fondo marino podrán indicar las zonas donde se concentra o se dispersa la energía de las olas.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Campos de las olas transformadas en la costa sur

Las siguientes figuras las modificaciones de las alturas de las olas de mar abierto al propagarse sobre la zona de rompientes de Cayo Largo del Sur, solo para el caso de las olas de 6.8 metros con longitud de 150 metros, ya que se ha comprobado que para olas de 2.9 metros las alteraciones en los campos de olas y líneas ortogonales son mínimas. Es necesario indicar que como resultado final se obtienen incrementos de la altura de las olas debido al efecto "shoaling" para las direcciones del oleaje en dirección perpendicular a la costa, ya que no se han incluido los efectos de disipación de la energía por fricción y percolación.

Olas de dirección este-sudeste

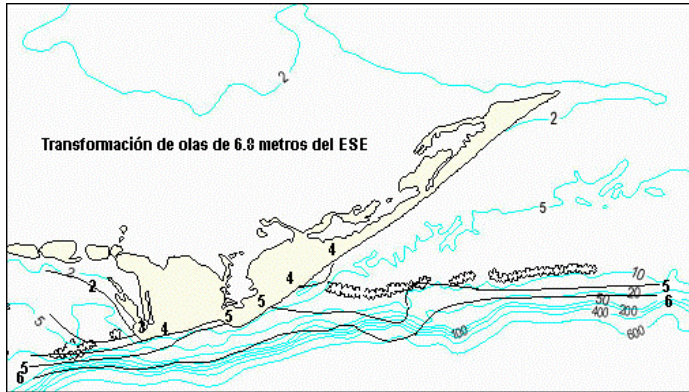


Figura 5. Campos de líneas ortogonales y alturas transformadas correspondientes a olas en mar abierto de dirección este-sudeste.

La inclinación de las líneas ortogonales con respecto a las isobatas provoca una fuerte disipación de la energía de las olas. La altura de la ola se modifica principalmente por el efecto de la refracción, mientras que el efecto “shoaling” es mínimo, ya que predomina la componente longitudinal (en el eje y), provocando una corriente litoral hacia el suroeste.

La altura de la ola significativa será máxima en la localidad de Cocodrilo, en cuyas inmediaciones se levantan Villa Capricho, Villa Iguana, Villa Costa Sur y Villa Coral.

Olas de dirección sudeste

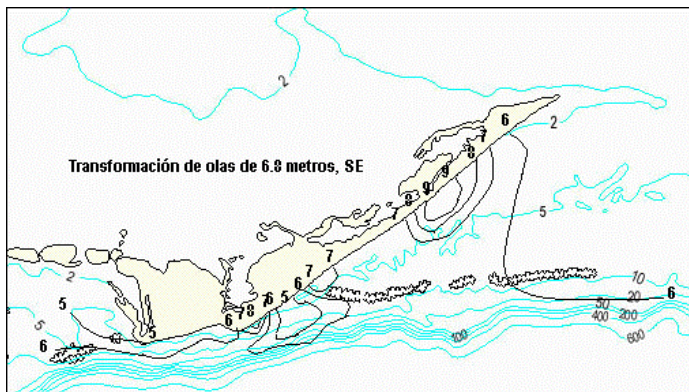


Figura 6. Campos de líneas ortogonales y alturas transformadas correspondientes a olas en mar abierto de dirección sudeste.

La orientación de las líneas ortogonales se acercan a la perpendicularidad con respecto a las isobatas, lo que hace que el coeficiente de refracción tenga valores cercanos a 1 y comience a predominar la componente transversal (en el eje x) del efecto “shoaling”, por lo que se producen incrementos en la altura de la ola significativa que afectan básicamente la localidad de Cocodrilo y Playa Los Cocos.

Olas de dirección sursudeste

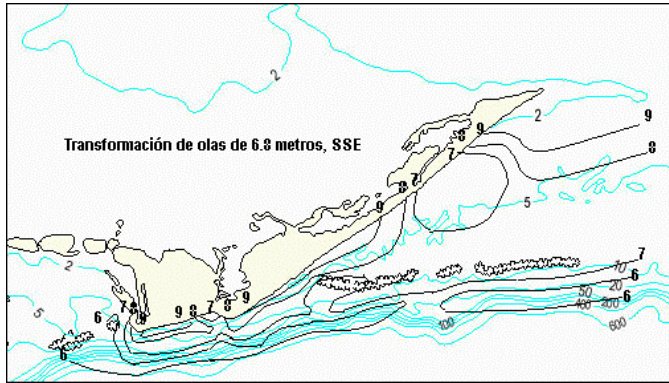


Figura 7. Campos de líneas ortogonales y alturas transformadas correspondientes a olas en mar abierto de dirección sursudeste.

Las líneas ortogonales son perpendiculares a las isobatas, por lo tanto, la refracción es igual a 1 y el efecto “shoaling” favorece el incremento de la altura de la ola en la costa. De tal manera, se pueden encontrar valores máximos de la altura de la ola significativa a lo largo de todo el litoral sur.

Olas de dirección sur

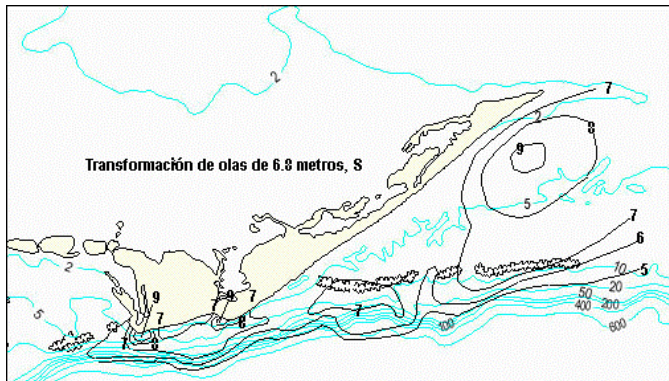


Figura 8. Campos de líneas ortogonales y alturas transformadas correspondientes a olas en mar abierto de dirección sur.

Las líneas ortogonales mantienen su perpendicularidad con las isobatas, principalmente desde la localidad de Cocodrilo hacia el oeste, donde se esperan incrementos de la altura de las olas debido al “shoaling”, en el resto de la costa comenzará a predominar la componente longitudinal del “shoaling”.

Olas de dirección sursuroeste

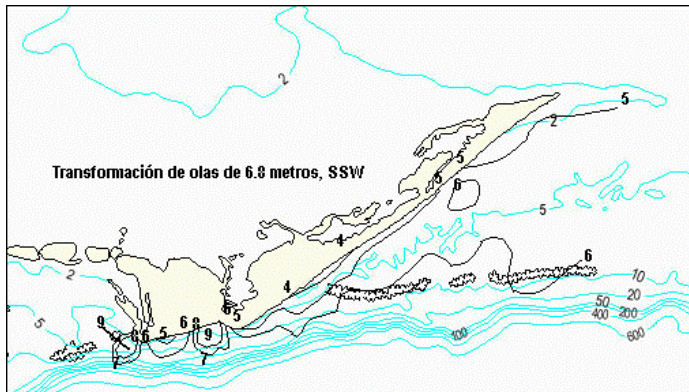


Figura 9. Campos de líneas ortogonales y alturas transformadas correspondientes a olas en mar abierto de dirección sursuroeste.

Las líneas ortogonales vuelven a apartarse de la perpendicularidad con respecto a las isobatas, influyendo la refracción en la disminución de la altura de la ola, principalmente hacia el extremo nordeste del cay, donde las isobatas aumentan su separación. Los incrementos en la altura significativa de las olas afectarán al extremo suroeste del cay y una pequeña ensenada al oeste de la localidad de Cocodrilo.

El análisis indica que las direcciones más peligrosas del oleaje que afectan a la mayor parte del cay son sudeste, sursudeste y sur, ya que los incrementos de nivel del mar que se producen en la costa tienen posibilidades de afectar las instalaciones turísticas que se ubican en las inmediaciones de Cocodrilo. Conocer esto da la posibilidad de aplicar técnicas de manejo que ayuden a mitigar los daños provocados por inundaciones costeras.

Análisis de las inundaciones costeras de acuerdo a los incrementos del nivel del mar esperados.

Los resultados que se presentan parten de cálculos anteriores que toman en consideración la distancia desde la costa sur de Cayo Largo hasta la isobata de 20 metros, que es de 1 kilómetro en el extremo suroeste del cay y se incrementa hasta 7 kilómetros hacia su extremo nordeste.

Los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 se encuentran en el sector donde la isobata de 20 metros se localiza a 1 kilómetro de la costa, mientras que los puntos 6, 7 y 8 se ubican donde esta isobata de referencia se aleja paulatinamente hasta una distancia aproximada de 7 kilómetros, lo que incrementa el área de la zona de aguas poco profundas. Según los cálculos ya mencionados, los valores de incremento del nivel del mar son superiores en el sector donde es mayor el área de la zona de aguas poco profundas.

En la siguiente tabla se muestran los estimados del alcance de las inundaciones en cada punto considerando los incrementos del nivel del mar (INM) calculados, los cuales incluyen los aportes del wave set up y el wind set up. Los períodos de retorno corresponden a las características del oleaje y el viento determinados por Pérez (1994).

Tabla 7. Cálculo del alcance de las inundaciones en la costa sur de Cayo Largo del Sur.

Punto	Pendiente	$P \frac{\text{caso}}{\text{años}}$	INM (m)	Alcance (m)
1	0.026	1	0.3	12
		0.1	0.8	31
		0.05	1.2	46
		0.02	1.8	69
		0.01	2.5	96
		0.005	3.3	127
2	0.0714	1	0.3	4
		0.1	0.8	11
		0.05	1.2	17
		0.02	1.8	25
		0.01	2.5	35
		0.005	3.3	46
3	0.0625	1	0.3	5
		0.1	0.8	13
		0.05	1.2	19
		0.02	1.8	29
		0.01	2.5	40
		0.005	3.3	53
4	0.0214	1	0.3	14
		0.1	0.8	37
		0.05	1.2	56
		0.02	1.8	84
		0.01	2.5	117
		0.005	3.3	154
5	0.0454	1	0.3	7
		0.1	0.8	18
		0.05	1.2	26
		0.02	1.8	40
		0.01	2.5	55
		0.005	3.3	73
6	0.0366	1	0.4	11
		0.1	1	27
		0.05	1.7	46
		0.02	2.5	68
		0.01	3.9	107
		0.005	5.5	150
7	0.03	1	0.4	13
		0.1	1	33
		0.05	1.7	57
		0.02	2.5	83
		0.01	3.9	130
		0.005	5.5	183
8	0.03	1	0.4	13
		0.1	1	33
		0.05	1.7	57
		0.02	2.5	83
		0.01	3.9	130
		0.005	5.5	183

Los puntos más vulnerables son 1, 4, 6, 7 y 8, donde la pendiente es suave (la altitud máxima del terreno en estos puntos es aproximadamente de unos 3 metros), por lo que puede esperarse que el agua de mar pueda alcanzar sobre territorio emergido las distancias calculadas.

Por su parte, las inundaciones costeras que se producen en el norte de Cayo Largo del Sur son favorecidas por la poca profundidad de la cuenca y débil pendiente de la playa, por lo que los incrementos del nivel del mar por arrastre superficial del viento o wind set up puede avanzar muy fácilmente por el territorio.

Por lo tanto, se puede afirmar que al presentarse este fenómeno serán grandemente afectadas las áreas aledañas a las lagunas saladas de la costa norte para incrementos del nivel del mar de 0.6 y 1.5 metro. En casos muy extremos de la intensidad del viento que generen ascensos de 2.9 metros y superiores, también podrán verse afectadas áreas de la zona central del Cayo, que tiene mayor área. Como ejemplos se pueden citar los casos de ascensos del nivel del mar ocurridos durante el paso de los huracanes Michelle (noviembre de 2001) y Lili (octubre de 2001), ambos con trayectorias de suroeste a nordeste al oeste del Cayo. En el caso de Michelle, se reportaron inundaciones que en la zona del aeropuerto alcanzaron el nivel de 1 metro (INSMET, 2002), mientras al paso de Lili el ascenso del nivel se estimó en 1.4 metros. Vale destacar que el aeropuerto está aledaño a una de estas lagunas, en la zona occidental del cayo, mientras que en ambas ocasiones Villa Capricho y Villa Iguana dejaron de brindar servicios (189 habitaciones) y la faja de sol aledaña a estos centros tuvo pérdidas por erosión (DMPF – IPF, 2003).

En los momentos actuales no se ha establecido una clasificación de intensidades de las inundaciones costeras para Cayo Largo del Sur, no obstante, los datos que se ofrecen del ascenso del nivel del mar pueden ser empleados en el diseño constructivo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede afirmar que se han obtenido las conclusiones siguientes:

1. El incremento del nivel del mar en la costa sur de Cayo Largo del Sur se debe tanto a “wave set up” como a “wind set up”. El “wind set up” alcanza magnitudes mayores en el extremo nordeste del cayo, mientras que en el extremo suroeste el aporte mayor es por “wave set up”.
2. El incremento del nivel de mar en la costa norte de Cayo Largo del Sur se produce sólo por “wind set up”, el cual se asocia a vientos huracanados del noroeste y norte.
3. Se puede afirmar, como buena aproximación para propósitos prácticos, que el efecto “shoaling” se puede considerar máximo y factor de incremento de la altura de la ola, cuando el valor del coeficiente de refracción es mayor de 0.99, lo que ocurre para ángulos de ataque del oleaje entre 0° y 10°.
4. Las direcciones más peligrosas del oleaje son sudeste, sursudeste y sur, pues en las mismas se produce el incremento de la altura de la ola en aguas poco profundas debido al efecto “shoaling”.

5. Los puntos más vulnerables del cayo al avance de las inundaciones costeras por penetraciones del mar son los tramos donde el terreno tiene menor pendiente. Esto se ajusta a toda la costa norte, el extremo suroeste y algunas zonas de Playa Los Cocos.

En la sección de Análisis de Resultados se ha mencionado la generación de corrientes litorales cuando la refracción de la ola es fuerte. Se considera que este es un factor importante en la dinámica costera, y por tanto, en los cambios morfológicos de Cayo Largo del Sur, por lo que se recomienda que se estudien y apliquen las metodologías adecuadas para calcular las corrientes inducidas por el oleaje.

Por otra parte, otros procesos que contribuyen a la transformación del oleaje como la fricción del fondo, la percolación, la reflexión, la difracción y la rompiente de oleaje también requieren ser tenidos en cuenta para lograr una simulación lo más cercana posible a la realidad, por lo que se recomienda la aplicación de modelos que tengan en consideración estos parámetros.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Ballester, M. (2001). Base de datos de la cronología de los “sures” en Informe de resultado científico “Sistemas de bajas presiones invernales y su influencia en la región occidental”. Proyecto de Investigación 21012.

Ballester, M. y J. Rubiera (2002). Temporada ciclónica de 2001 en el Atlántico Norte. Instituto de Meteorología. <http://insmet/temporada01.asp>

Bretschneider C. L. (1966) "Engineering aspects of storm surges" Estuary and coastal line hydrodynamics, ed. by A.T. Ippen, New York, cap.2, 67:91

CERC (Coastal Engineering Research Center, 1984). Shore Protection Manual. Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers.

DMPF – IPF (2003). Síntesis del Plan de Ordenamiento Territorial del Polo Turístico Cayo Largo. Biblioteca IPF, La Habana, 16 pp, Anexos, 2 mapas.

ICH (1989). Derrotero de las costas de Cuba. Región Marítima del Sur. Tomo II. Editorial Científico - Técnica. La Habana. 120 pp.

Juantorena, Y. (2001). Desarrollo de un método de cálculo de los elementos de olas en los mares adyacentes y costas de Cuba mediante técnicas espectrales. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas, UDICT – INSMET, La Habana, 166 pp. Anexos.

Mitrani, I., M. Fontova, L. Díaz, J. González (1983). Determinación del régimen de ola y viento en la costa norte de La Habana. Centro de Documentación y Divulgación de las BTJ, Cod. D-5625. Mit.D, 15 pp. (Folio 211.6).

Mitrani, I., I. Salas, M. Ballester, Y. Juantorena (2000). Penetraciones del mar en la zona costera del Golfo de Batabanó por afectación de “sures”, con escenarios actual y previsto por posible

incremento del nivel medio del mar. Boletín Virtual SOMETCUBA. Vol. 6, No. 1, <http://www.met.inf.cu>.

- OMM – No. 702 (1988).** Guía para el análisis y pronósticos de las olas. Ginebra, Suiza, 170 pp. Anexos.
- OMM – 702 (1997).** Guide to wave analysis and forecasting (Provisional). Geneva, Switzerland, 162 pp. Anexos.
- Pérez, P.J. (1994).** Estudio del régimen de vientos y olas en diferentes zonas marinas de interés socioeconómico para Cuba. (inédito). Departamento de Meteorología Marina, INSMET.
- Proyecto CUBA/94/003 (1998).** Desarrollo de las técnicas de predicción de las inundaciones costeras, prevención y reducción de su acción destructiva. Informe Técnico. PNUD. La Habana, Cuba, 230 pp.
- SNIP (1976).** Carga y efecto sobre las construcciones hidrotécnicas. (En ruso), SNIP-II-57-75. Stroizdat, Moscú, 60 pp
- SNIP (1983).** Carga y efecto sobre las construcciones hidrotécnicas. (En ruso), SNIP-2.06.04-82, Stroizdat, Moscú, 37 pp.
- Vega et al. (1989).** Análisis estadístico – climatológico del régimen de la velocidad máxima del viento en Cuba. Informe Científico – Técnico (final). INSMET, ACC, 67 pp.

REFERENCIAS CITADAS

- Arthur, R.S., W.H. Munk, J.D. Isaacs (1952).** The direct construction of wave rays. Trans. Amer. Geophys. Union, 33 (6), 855 – 865.
- Dorrestein, R. (1960).** Simplified method of determining refraction coefficients for sea waves. Jour. Geophys. Res., 65, 637 – 642.
- Johnson, J.W., M.P. O'Brien, J.D. Isaacs (1948).** Graphical construction of wave refraction diagrams. Hydrographic Office Publication, 605, TR – 2, US Naval Oceanographic Office, Washington, DC.
- Phillips, O.M. (1977).** The dynamics of the upper ocean. Second edition, Cambridge University Press, London, 336 pp.