

Capítulo 1

Métodos de pronósticos meteorológicos y de
modelación del campo de olas y
de las inundaciones costeras

CAPITULO 1

METODOS DE PRONOSTICOS METEOROLOGICOS Y DE MODELACION DEL CAMPO DE OLAS Y DE LAS INUNDACIONES COSTERAS. SU APLICACION

1.1 Desarrollo de un modelo de pronóstico para determinar la elevación del nivel del mar por la acción de un ciclón tropical

1.1.1 Reseña bibliográfica sobre la surgencia y su modelación

Generalidades

Entre los efectos adversos del tiempo asociados a los ciclones tropicales se destacan: los vientos con fuerza de huracán, las inundaciones debido a las lluvias intensas, las marejadas y la surgencia.

No obstante, la surgencia es para muchos especialistas (según lo manifestado en el Primer Taller Internacional sobre Ciclones Tropicales, Bangkok 1985, (IWTC-I), el efecto más destructivo, causante, como promedio, del 90 % de las pérdidas materiales y de nueve de cada diez víctimas.

Definiéndola en su forma más simple, la surgencia es una elevación anormal y temporal del nivel del mar, sobre la marea astronómica pronosticada, causada por la tensión provocada por los fuertes vientos y (en menor grado) por la caída de la presión atmosférica, debido al paso de una tormenta. La surgencia es una onda gravitacional larga con una longitud escalar similar al tamaño del ciclón tropical que la genera y duración de algunas horas, dependiendo, entre otras cuestiones del tamaño y la velocidad de traslación del ciclón y afecta como promedio de 100 a 200 km de costa, durante unas seis horas. Por lo tanto, es de una escala similar a la marea astronómica y no debe confundirse con las ondas gravitacionales cortas producidas por el viento, las que poseen una longitud de onda del orden de metros y periodo de segundos.

La respuesta del océano a la presencia de un ciclón tropical es diferente en aguas profundas y en aguas poco profundas. En el primer caso, lejos de la costa, la tensión del viento sobre la superficie oceánica crea un amontonamiento rotatorio de agua (un vórtice). La elevación del nivel del agua es pequeña, aproximadamente la elevación hidrostática en respuesta al centro de bajas presiones, (efecto de barómetro invertido) y en menor escala al efecto del término de Coriolis.

Los efectos dinámicos se vuelven predominantes a medida que el ciclón se acerca a la costa y la conservación de la vorticidad potencial del vórtice requiere del desarrollo de una marcada divergencia. Los canales y la reflexión de la costa también contribuyen sustancialmente a amplificar la surgencia (Jelesnianski, 1993).

En aguas profundas, como una primera aproximación, la elevación del nivel del mar será de 1 cm por cada hPa que descienda la presión, por debajo de la presión normal de 1013 hPa, por lo tanto, para un huracán de gran intensidad como el Gilbert (1988), que alcanzó una presión central de 888 hPa (Ortiz y García, 1989), el ascenso del nivel del mar será de aproximadamente 125 cm.

Por lo expuesto en los dos párrafos anteriores la surgencia es considerada usualmente como un fenómeno costero, que presenta el máximo absoluto sobre la costa, a la derecha del punto de llegada del ciclón tropical a tierra y muy próximo al radio de vientos máximos.

Una acción muy severa se produce cuando las olas producidas por el viento corren sobre la surgencia, rompiendo éstas muy próximas a la costa.

Registros históricos

De acuerdo con los registros disponibles, las mayores elevaciones del nivel del mar en el mundo, debido al efecto combinado de la surgencia con la marea astronómica, ocurrieron en Bengala Occidental (1737) y Bangladesh (1876) con 12 m sobre el nivel del mar, (Mandal, 1991), en fecha más reciente, noviembre de 1970, también en Bangladesh, se estimaron 9 m de elevación y la pérdida de 500 000 vidas humanas y en abril de 1991 el número de víctimas fue de 140 000. En el hemisferio occidental aunque las pérdidas humanas no han sido tan espectaculares son impresionantes las surgencias asociadas con el huracán Camille (1969) con 7,4 m en las proximidades de Pass. Christian, Mississippi, la producida por Hugo (1989) en Carolina del Sur con 6 m y la ocurrida en septiembre de 1900 en Galveston, Texas con 4,5 m de elevación del nivel del mar y alrededor de 6 000 muertos.

Ejemplos de notables inundaciones del mar asociadas a este fenómeno en la Cuenca del Caribe, se han reportado entre otros: en la zona de Savannah de la Mar y Jamaica donde el mar en dos ocasiones ha penetrado hasta 10 km pereciendo más de 1 000 personas.

El archipiélago cubano ha sido afectado en muchas ocasiones por huracanes que han traído aparejadas grandes surgencias. Así se tiene que la asociada al huracán de noviembre de 1932 produjo la mayor catástrofe natural ocurrida en Cuba, arrasó completamente el pueblo de Santa Cruz del Sur, ocasionando más de 2 500 muertes y el nivel del mar ascendió más de 6 m (Linares, 1976). En octubre de 1944 en Guanímar y el Cajío, costa Sur de la Provincia de La Habana, el mar penetró 12 y 6 km respectivamente, (Ortiz, 1976). Otras surgencias significativas ocurrieron en octubre de 1926, septiembre de 1933 y más reciente, durante el paso del huracán Kate (noviembre de 1985) cuando se reportaron profundas invasiones del mar en zonas de la costa norte, principalmente en Caibarién, Isabela de Sagua y Cárdenas. (Ortiz y García, 1990).

Otros aspectos a señalar

La altura que alcanza la surgencia puede verse incrementada por la marea astronómica, en dependencia de la coincidencia de la pleamar con la incidencia del huracán. En ocasiones una surgencia puede ser catastrófica o no, en dependencia del estado en que se encuentre la marea astronómica al llegar a tierra la tormenta. Zhang et. al. (1993) describen algunos casos sobre este efecto ocurridos en China.

A través del tiempo se ha observado que la necesaria interrelación entre los términos surgencia, (en inglés storm surge) y marea astronómica (astronomical tide) ha llevado a la definición de otro término, marea de tormenta (storm tide), originándose cierta confusión. Por tal motivo se señala que **surgencia** es la elevación del agua generada por un ciclón tropical, sobre o por debajo de la marea astronómica pronosticada. La marea de tormenta por otra parte, es la elevación total (incluyendo la marea astronómica) sobre o por debajo de un nivel standard base:

$$\text{Marea de tormenta} = \text{surgencia} + \text{marea astronómica}$$

La surgencia puede ser calculada mediante modelos dinámicos o estadísticos pero el cálculo de la marea de tormenta es aún más difícil, debido a la incertidumbre existente al realizar la superposición entre la surgencia y la marea astronómica.

Los modelos dinámicos pueden correr considerando la interacción no lineal existente entre la surgencia y la marea astronómica, (Zenghao, 1993). Sin embargo, muchos investigadores consideran que los errores que presentan en la actualidad los pronósticos de trayectoria (Elsberry, 1995) e intensidad (Frank, 1993), particularmente el error medio de seis horas en los pronósticos de trayectoria (válidos para 24 horas) para la llegada a tierra de un ciclón tropical, en

una primera aproximación coincide con la diferencia de tiempo que existe entre la pleamar y la baja mar. Por tal motivo, la mayoría de los pronosticadores de surgencia consideran inapropiado incluir directamente en un modelo operacional de surgencia la marea astronómica. En su lugar usan estimaciones subjetivas de la llegada a tierra del ciclón tropical de acuerdo con la calidad del pronóstico de trayectoria para superponer la marea astronómica a la surgencia calculada.

En la altura que alcanza la surgencia y en la extensión de las inundaciones tierra adentro, desempeñan un papel fundamental: el tamaño, velocidad de traslación, tiempo sobre la plataforma, ángulo de incidencia entre el ciclón y la costa, viento máximo y su radio, y la presión central del ciclón, además de factores físico-geográficos como la batimetría, la topografía del terreno, la elevación y la configuración de la costa, construcciones y edificaciones en el litoral, vegetación existente, etc.

Análisis crítico de los modelos de surgencia

Debido al alto potencial destructivo de la surgencia desde finales de la década del 50 se han desarrollado distintos métodos para pronosticar este evento, los que se pueden agrupar en dos ramas: modelos estadísticos y modelos dinámicos. Estas dos ramas no son completamente independientes, muchos de los modelos dinámicos contienen términos análogos a los de tensión de Reynolds los cuales deben ser evaluados empíricamente. Por otra parte, algún grado de razonamiento físico y dinámico es usualmente empleado en la selección de los posibles predictores en los métodos estadísticos.

Modelos estadísticos

Estos modelos se basan en el análisis de los datos históricos de las surgencias ocurridas y se utilizan los registros de las alturas alcanzadas por el agua y la marea en el área de interés. Es necesario la disponibilidad de una larga base de esos registros para que los mismos puedan ser considerados como representativos de las condiciones a esperar en el futuro y entonces desarrollar mediante técnicas de regresión u otro tipo un modelo de pronóstico. En algunos casos los registros de otras localidades similares pudieran ser usados.

Los primeros intentos en la predicción de la surgencia estuvieron dirigidos a correlacionar las variaciones en el nivel del mar con la presión atmosférica, la intensidad y dirección del viento predominante, tratando de sintetizar en un método de pronóstico los rasgos de gran escala más importantes causantes de la surgencia y minimizar los efectos locales.

Modelos dinámicos

En el pasado los modelos numéricos ofrecieron una solución alternativa al problema del cálculo de la surgencia, con el desarrollo y la renovación de las computadoras personales, la amplia aplicación de nuevas tecnologías en el monitoreo y comunicación de datos relacionados con las tormentas y el desarrollo de distintos estudios ha llevado a que los mismos sean actualmente la vía más utilizada para calcular la surgencia, jugando un importante papel en la prevención y mitigación de desastres.

En un número considerable de modelos dinámicos las ecuaciones de la hidrodinámica utilizadas son la de continuidad y las de movimiento, integradas verticalmente desde el fondo hasta la superficie del mar y expresadas en términos de la velocidad media de la corriente horizontal y del transporte de masa, además se asume: el fluido homogéneo, se ignora la curvatura de la tierra y el efecto de las olas, el fondo impermeable y las aceleraciones verticales despreciables.

El conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el movimiento del fluido y la altura de la surgencia es representado en forma de diferencia finita y aplicado a una rejilla que cubre el área de pronóstico. Estas ecuaciones en diferencia finita se resuelven hacia adelante en el tiempo en pequeños pasos partiendo de un conjunto de condiciones iniciales del nivel de las aguas. Al ser usado un dominio finito para cubrir el área de pronóstico, es necesario la imposición de valores de frontera a lo largo de los márgenes del dominio. También se necesita especificar el conjunto de *fuerzas conductoras* para representar la tensión superficial del viento (tan importante como el propio modelo) y la fuerza debida al gradiente de presión.

Al hacerse un modelo dinámico de surgencia, el modelador tiene que preguntarse :

- ¿ Qué esquema en diferencia finita usará ?
- ¿ Qué procesos físicos serán eliminados de la ecuación de movimiento ?
- ¿ Cómo incorporar algunos rasgos de escala subrejilla ?
- ¿ Cómo incorporar un modelo de viento para suministrar las *fuerzas conductoras* ?
- ¿ Cómo presentar el pronóstico, sin olvidar el uso que se le dará al modelo y la potencia de la computadora que utilizará ?

Antecedentes sobre el pronóstico de la surgencia en Cuba

El archipiélago cubano se encuentra situado en una zona geográfica propensa a la afectación de organismos tropicales, los cuales en algunos casos han producido grandes y devastadoras surgencias. Sin embargo no es hasta la década de los años 70 en que se comienzan a realizar diferentes investigaciones sobre esta temática. Pérez Parrado (1974) confeccionó un método estadístico para determinar la altura máxima que puede alcanzar una surgencia en las costas.

Otros pasos importantes fueron la determinación de los tramos de costas con mayores riesgos para la ocurrencia de surgencias (Moreno y Salas, 1976) y la creación de otro modelo estadístico Pérez Parrado (1981). Posteriormente Lezcano et. al. (1993) elaboraron mapas de peligro por penetraciones del mar para las costas de Cuba, una versión más acabada que contempla los mapas de riesgo por surgencia ha sido elaborada por Salas et. al. (1995).

En el primer taller internacional sobre ciclones tropicales (IWTC-I) celebrado en Bangkok, 1985, Jelesnianski (citado por WMO 1993) resumió los problemas relacionados con el monitoreo de los eventos de surgencia de la siguiente manera:

- (a) Las observaciones son deficientes, casuales y sujetas a cambios
- (b) Los mareógrafos son pocos y situados muy lejos uno de otro y frecuentemente no funcionan bien. Un problema reconocido en la calibración y verificación de los modelos numéricos de surgencia es la falta de archivos de datos de este evento

En Cuba esta situación se refleja de una forma crítica ya que son muy aisladas las informaciones que se tienen sobre esos eventos. Las pocas observaciones están relacionadas con las marcas dejadas por el nivel de las aguas y las líneas dejadas por los restos de desperdicios, método ampliamente usado, pero que en nuestro caso no se conoce ni tan siquiera cómo y cuando fueron realizadas, siendo lo más probable que no se siguiera una metodología adecuada (WMO, 1978).

1.1.2 Diseño del modelo dinámico de surgencia para las costas de Cuba y características del mismo

Con el inicio de esta investigación se enfrenta por primera vez en Cuba, la modelación de la surgencia mediante un esquema dinámico - numérico, dada la complejidad e importancia del tema se decide desarrollarlo en diferentes pasos o versiones, para poder contar lo antes posible con un modelo que pueda resolver en parte las necesidades del Servicio Meteorológico Nacional y de otras instituciones del país, donde el desarrollo de la industria turística y de otras actividades en zonas costeras se vuelve necesario y primordial para lograr un incremento económico.

Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Primera versión (MONSAC I)

Sistema de ecuaciones

Para la realización de este modelo matemático se utilizó una forma linearizada de las ecuaciones de transporte, planteada por Harris y Jelesnianski (1964) y Jelesnianski (1966) y que se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{\delta u}{\delta t} = & -gD_{(x,y)} \frac{\delta h}{\delta x} + f_v + \frac{D_{(x,y)}}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} \\ & + \frac{\mathcal{A}_S^{(x)}(x,y,t)}{\rho} + \frac{\mathcal{A}_F^{(x)}(x,y,t)}{\rho} \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta v}{\delta t} = & -gD_{(x,y)} \frac{\delta h}{\delta y} - f_u + \frac{D_{(x,y)}}{\rho} \frac{\delta p}{\delta y} \\ & + \frac{\mathcal{A}_S^{(y)}(x,y,t)}{\rho} + \frac{\mathcal{A}_F^{(y)}(x,y,t)}{\rho} \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

$$\frac{\delta h}{\delta t} = -\frac{\delta u}{\delta x} - \frac{\delta v}{\delta y} \quad (1.1.3)$$

Donde:

u, v	transporte en las direcciones x, y respectivamente
g	aceleración de la gravedad
$D(x,y)$	profundidad del fluido no perturbado
h	altura de la surgencia (en metros), por encima del nivel medio del mar
f	parámetro de Coriolis
ρ	densidad del agua de mar
P	presión atmosférica
$\tau_a^{(x)} \tau_a^{(y)}$	componentes de la tensión de superficie
$\tau_F^{(x)} \tau_F^{(y)}$	componentes de la tensión de fondo

Cálculos de las tensiones de superficie y de fondo

Siguiendo la tendencia general utilizada en los diferentes modelos dinámicos de surgencia, las componentes de la tensión superficial se formulan a través del viento en superficie, mediante una función cuadrática de su velocidad, (Jelesnianski, 1966), siendo:

$$\tau_s^{(x)} = K \rho_a |V| u \quad (1.1.4)$$

$$\tau_s^{(y)} = K \rho_a |V| v \quad (1.1.5)$$

Donde:

ρ_a es la densidad del aire

u, v componentes de la velocidad del viento en superficie

k constante del modelo

Como el modelo de surgencia requiere conocer los valores de la tensión superficial producida por el viento en diferentes puntos e instantes, se utilizó un modelo teórico para conocer el campo de viento producido por un ciclón circular en movimiento, asimétrico en el viento y con un ángulo constante de entrada del viento, este modelo de viento se inicializa de forma rápida y con parámetros meteorológicos simples.

Considerando lo planteado por González y Pérez Parrado (1990), las componentes de la velocidad del viento en el sector derecho del ciclón tropical se pueden expresar por:

$$u = V_I \cos(\beta) \quad (1.1.6)$$

$$v = V_R + V_I \sin(\beta) \quad (1.1.7)$$

y en el izquierdo

$$u = V_I \cos(\beta) \quad (1.1.8)$$

$$v = V_I \sin(\beta) - V_R \quad (1.1.9)$$

De estas expresiones se tiene que:

- β es el ángulo que forma el viento con la isobara (considerado como constante)
- V_I representa la velocidad del viento para cada punto de un ciclón simétrico
- V_R es la velocidad de desplazamiento del ciclón en cada punto

Según Pérez Parrado et. al. (1987), partiendo de la ecuación del viento gradiente se obtienen las siguientes expresiones:

$$V_I = V_M \left(\frac{R_M}{R} e^{(1 - R_M/R)} + \frac{f^2 R^2}{4 V_m^2} \right) + \frac{fR}{2} \quad (1.1.10)$$

$$V_R = V_C \left(\frac{R_M}{R} e^{(1 - R_M/R)} + \frac{f^2 R^2}{4 V_m^2} \right) + \frac{fR}{2} \quad (1.1.11)$$

Donde:

V_C es la velocidad de desplazamiento del ciclón tropical

R_M es el radio de viento máximo

V_M velocidad máxima del viento

Mediante este modelo se logran resultados similares a los obtenidos por Jelesnianski (1965) y por otros autores que mediante modelos teóricos calculan el perfil de viento en los ciclones tropicales.

De igual manera el campo de presión se obtiene considerando un vórtice en balance de gradiente y un perfil hiperbólico de la presión, según lo propuesto por Shloener (1954) y Holland (1980):

$$P = P_o + (P_\infty - P_o) e^{(\frac{R_M}{R})} \quad (1.1.12)$$

En la cual :

P_o presión central

P_∞ presión en la periferia (valor de la última isobara cerrada)

R_m radio de viento máximo

En la Figura 1.1.1 se presentan los perfiles de viento y presión calculados para el huracán Emily (31 de agosto de 1993) mediante el modelo teórico propuesto en esta investigación. En la Figura 1.1.2 se muestra una comparación entre el perfil real de viento y el calculado para el huracán antes mencionado, mientras que las Figuras 1.1.3 y 1.1.4 representan una visión tridimensional de estos campos respectivamente.

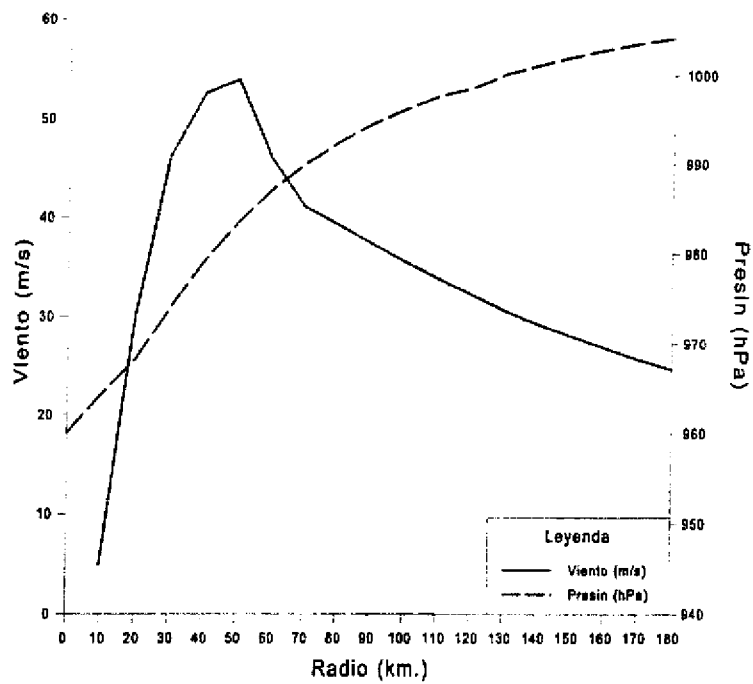


Figura 1.1.1 Perfiles radiales de viento y presión calculados por el modelo teórico para el huracán Emily (31 de agosto de 1993)

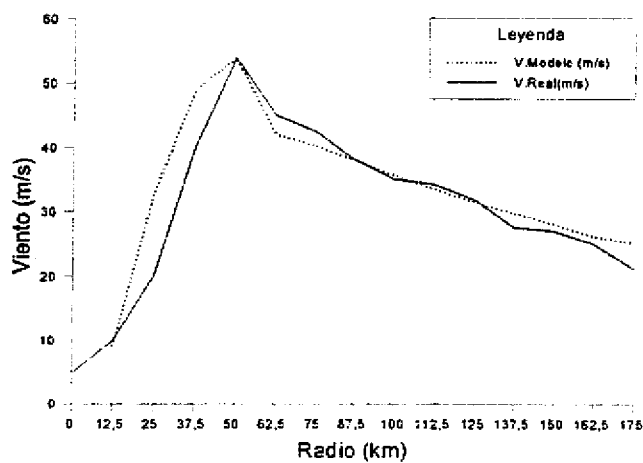


Figura 1.1.2 Comparación entre el perfil real de viento (tomado de Avila, 1993) y el modelado para el huracán Emily (31 de agosto de 1993)

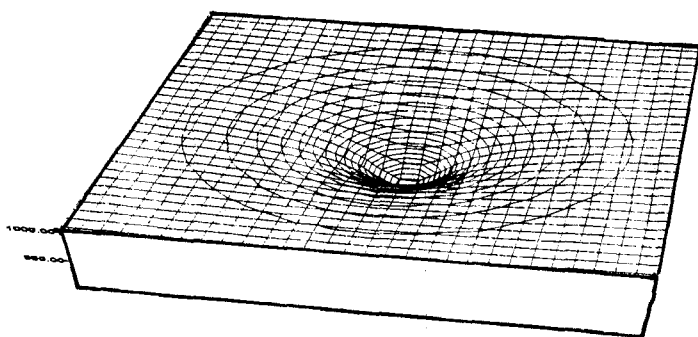


Figura 1.1.3 Representación tridimensional del campo de presión modelado para el huracán Emily (31 de agosto de 1993)

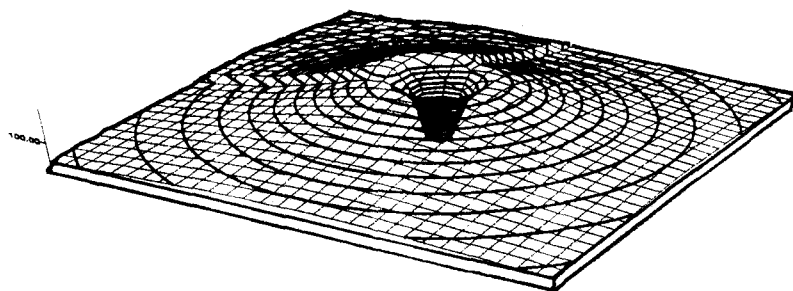


Figura 1.1.4 Visión tridimensional del campo de viento modelado para el huracán Emily (31 de agosto de 1993)

Jelesnianski (1967) señaló y demostró la importancia de incorporar la tensión de fondo a las ecuaciones de transporte cuando se quiere generalizar el cálculo de la surgencia a tormentas tropicales que cruzan la costa con cualquier ángulo y velocidad de traslación, o que se desplazan paralelamente a la misma.

De acuerdo con Miyasaki, Ueno y Unoki (1961) la tensión de fondo puede calcularse de la siguiente manera:

$$\tau_f^{(x)} = k_1 |V| u - k_2 \tau_s^{(x)} \quad (1.1.13)$$

$$\tau_f^{(y)} = k_1^a |V| v - k_2 \tau_s^{(y)} \quad (1.1.14)$$

Donde k_1 y k_2 representan constantes calculadas para el modelo.

Condiciones iniciales del nivel de las aguas

En esta investigación se adiciona al nivel medio de las aguas, la elevación de la altura estática debido a la caída de la presión por la presencia de la tormenta tropical (efecto de barómetro invertido), este incremento se calcula a través de la ecuación de la hidrostática.

$$\frac{\partial P}{\partial h} = -\rho g \quad (1.1.15)$$

En la Figura 1.1.5 se observa el perfil de la altura estática para el huracán Emily, calculado por el proceso mencionado anteriormente.

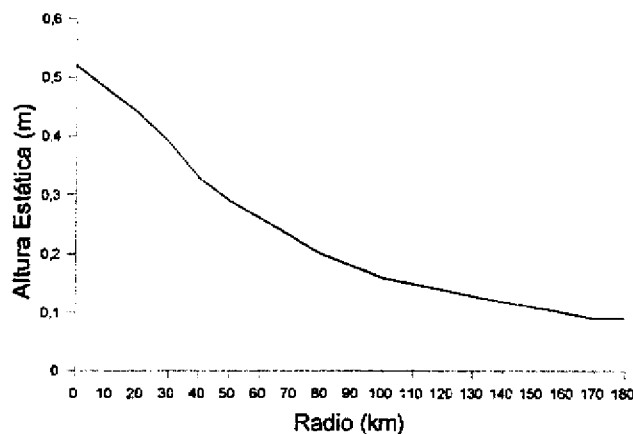


Figura 1.1.5 Perfil modelado de la altura estática para el huracán Emily (31 de agosto de 1993)

Características de la rejilla y de la cuenca

Para obtener una solución numérica del sistema de ecuaciones propuesto se tiene una rejilla rectangular de (70x140) puntos sobre Cuba y sus alrededores, con el extremo izquierdo inferior situado en (18 °N - 87 °W). Esta rejilla se utiliza para los datos de batimetría. Una vez dada la posición inicial del huracán, mediante un algoritmo matemático se crea la rejilla de trabajo (30x30) puntos con el huracán situado en el centro; el paso espacial es de 0,1 grado de latitud y el temporal de 60 segundos.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera establecidas después de diferentes exámenes para este modelo son las siguientes:

- La componente de transporte normal a la costa y en la frontera opuesta es cero ($V=0$), igual sucede con la derivada normal, o sea ($\partial u / \partial y = 0$)
- La componente de transporte normal a las fronteras laterales es cero ($U=0$), lo mismo sucede con la derivada normal, ($\partial v / \partial x = 0$)
- Los valores de altura de la surgencia en las fronteras se sustituyen por los valores del punto interior inmediato (en cada paso del tiempo), este proceso también es válido para las componentes u y v no especificadas anteriormente
- En los cuatro puntos de las esquinas los campos h , u y v toman los valores del punto inmediato interior que está en diagonal a dichos puntos

Esquema numérico

Para obtener la solución aproximada del sistema de ecuaciones diferenciales (1) se hará uso de un esquema en diferencias finitas centrado (leap-frog) tanto espacial como temporalmente, obteniéndose el siguiente esquema numérico para los puntos interiores:

$$u_{i,j}^{t+\Delta t} = u_{i,j}^{t-\Delta t} - g_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta S} (h_{i+1,j}^t - h_{i-1,j}^t) \\ + 2 \Delta t (f_{i,j}^t + \tau_{s(i,j)}^{(x)t} + \tau_{b(i,j)}^{(x)t})$$

$$D_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta S} (P_{i+1,j}^t - P_{i-1,j}^t) \quad (1.1.16)$$

$$v_{i,j}^{t+1} = v_{i,j}^t - g D_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta S} (h_{i,j-1}^t - h_{i,j+1}^t)$$

$$- 2\Delta t (f u_{i,j}^t + \tau_{s(i,j)}^{(y)t} + \tau_{b(i,j)}^{(y)}) +$$

$$+ \frac{D_{i,j} \Delta t}{\rho \Delta S} (P_{i,j-1}^t - P_{i,j+1}^t) \quad (1.1.17)$$

$$h_{i,j}^{t+1} = h_{i,j}^t - \frac{\Delta t}{\Delta S} (u_{i-1,j}^t - u_{i+1,j}^t + v_{i,j-1}^t - v_{i,j+1}^t) \quad (1.1.18)$$

Donde la notación genérica :

$$f_{i,j}^t$$

significa $f(i\Delta x, j\Delta y, t\Delta t)$

Procedimiento de inicio

Al observar el esquema numérico anterior se aprecia que para calcular los valores de campo u , v y h en $t+1$ es necesario tener los valores de estas variables en los tiempos t y $t-1$. Por tal motivo para calcular los valores de campo en $t=1$ se utilizó el esquema de diferencia finita progresivo propuesto por Harris y Jelesnianski (1964), quienes consideraron que en el primer intervalo de tiempo las ecuaciones de transporte pueden aproximarse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f v + \frac{\tau_s^x}{\rho} + \frac{D}{\rho} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (1.1.19)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f u + \frac{\tau_s^y}{\rho} + \frac{D}{\rho} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (1.1.20)$$

Ecuaciones que expresadas en diferencias finitas progresivas en el tiempo tienen la forma:

$$u_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\tau_s^{(x)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2\rho\Delta x} (P_{i-1,j}^1 - P_{i+1,j}^1) + f v_{i,j}^1 \right) \quad (1.1.21)$$

$$v_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\tau_s^{(y)1}(i,j)}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta y} (P_{i,j+1}^1 - P_{i,j-1}^1) - f u_{i,j}^1 \right) \quad (1.1.22)$$

Que finalmente se aproximan a:

$$u_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_s^{(x)1}(i,j)}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta x} (P_{i+1,j}^1 - P_{i-1,j}^1) \right. \\ \left. + f \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_s^{(y)1}(i,j)}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta y} (P_{i,j+1}^1 - P_{i,j-1}^1) \right] \right] \quad (1.1.23)$$

$$v_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_s^{(y)1}(i,j)}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta x} + (P_{i,j+1}^1 - P_{i,j-1}^1) \right. \\ \left. - f \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_s^{(x)1}(i,j)}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta x} (P_{i+1,j}^1 - P_{i-1,j}^1) \right] \right] \quad (1.1.24)$$

Sustituyendo en la ecuación de continuidad los valores iniciales de transporte :

$$h_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{4 \Delta s} (u_{i+1,j}^1 - u_{i-1,j}^1 + v_{i,j+1}^1 - v_{i,j-1}^1) \quad (1.1.25)$$

Análisis de la ejecución del modelo en algunos casos

Una vez programado el esquema de cálculo en lenguaje *Fortran*, se realizaron diferentes corridas con huracanes hipotéticos comprobándose la factibilidad del modelo ya que se obtuvieron valores de los distintos campos involucrados y de la surgencia acordes con los esperados desde un punto de vista teórico. Por tal razón se decidió efectuar corridas con algunos ciclones reales que han afectado al territorio nacional.

A continuación se presentan por su interés y variedad tres de las corridas realizadas:

Jelesnianski (1967) señaló y demostró la importancia de incorporar la tensión de fondo a las ecuaciones de transporte cuando se quiere generalizar el cálculo de la surgencia a tormentas tropicales que cruzan la costa con cualquier ángulo y velocidad de traslación, o que se desplazan paralelamente a la misma.

De acuerdo con Miyasaki, Ueno y Unoki (1961) la tensión de fondo puede calcularse de la siguiente manera:

$$\tau_f^{(x)} = k_1 |V| u - k_2 \tau_s^{(x)} \quad (1.1.13)$$

$$\tau_f^{(y)} = k_1^a |V| v - k_2 \tau_s^{(y)} \quad (1.1.14)$$

Donde k_1 y k_2 representan constantes calculadas para el modelo.

Condiciones iniciales del nivel de las aguas

En esta investigación se adiciona al nivel medio de las aguas, la elevación de la altura estática debido a la caída de la presión por la presencia de la tormenta tropical (efecto de barómetro invertido), este incremento se calcula a través de la ecuación de la hidrostática.

$$\frac{\partial P}{\partial h} = -\rho g \quad (1.1.15)$$

En la Figura 1.1.5 se observa el perfil de la altura estática para el huracán Emily, calculado por el proceso mencionado anteriormente.

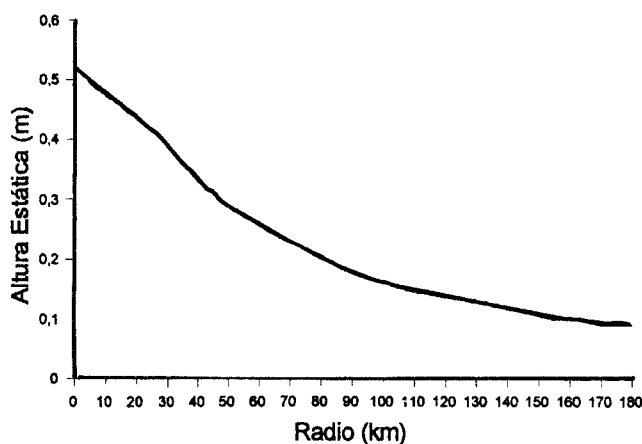


Figura 1.1.5 Perfil modelado de la altura estática para el huracán Emily (31 de agosto de 1993)

Características de la rejilla y de la cuenca

Para obtener una solución numérica del sistema de ecuaciones propuesto se tiene una rejilla rectangular de (70x140) puntos sobre Cuba y sus alrededores, con el extremo izquierdo inferior situado en (18 °N - 87 °W). Esta rejilla se utiliza para los datos de batimetría. Una vez dada la posición inicial del huracán, mediante un algoritmo matemático se crea la rejilla de trabajo (30x30) puntos con el huracán situado en el centro; el paso espacial es de 0,1 grado de latitud y el temporal de 60 segundos.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera establecidas después de diferentes exámenes para este modelo son las siguientes:

- La componente de transporte normal a la costa y en la frontera opuesta es cero ($V=0$), igual sucede con la derivada normal, o sea ($\partial u / \partial y = 0$)
- La componente de transporte normal a las fronteras laterales es cero ($U=0$), lo mismo sucede con la derivada normal, ($\partial v / \partial x = 0$)
- Los valores de altura de la surgencia en las fronteras se sustituyen por los valores del punto interior inmediato (en cada paso del tiempo), este proceso también es válido para las componentes u y v no especificadas anteriormente
- En los cuatro puntos de las esquinas los campos h , u y v toman los valores del punto inmediato interior que está en diagonal a dichos puntos

Esquema numérico

Para obtener la solución aproximada del sistema de ecuaciones diferenciales (1) se hará uso de un esquema en diferencias finitas centrado (leap-frog) tanto espacial como temporalmente, obteniéndose el siguiente esquema numérico para los puntos interiores:

$$\begin{aligned} u_{i,j}^{t+\Delta t} = & u_{i,j}^t - g D_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta S} (h_{i+1,j}^t - h_{i-1,j}^t) \\ & + 2 \Delta t (f v_{i,j}^t + \tau_{i,j}^{(y)2} + \tau_{i,j}^{(x)2}) \\ & + \frac{D_{i,j} \Delta t}{\Delta S} (p_{i+1,j}^t - p_{i-1,j}^t) \quad (1.1.10) \end{aligned}$$

$$v_{i,j}^{t+1} = v_{i,j}^t - g D_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta S} (h_{i,j+1}^t - h_{i,j-1}^t)$$

$$- 2\Delta t (f u_{i,j}^t + \tau_{s\alpha,j}^{(x)} + \tau_{b\theta,j}^{(y)}) +$$

$$+ \frac{D_{i,j} \Delta t}{\rho \Delta S} (P_{i,j+1}^t - P_{i,j-1}^t) \quad (1.1.17)$$

$$h_{i,j}^{t+1} = h_{i,j}^t - \frac{\Delta t}{\Delta S} (u_{i-1,j}^t - u_{i+1,j}^t + v_{i,j+1}^t - v_{i,j-1}^t) \quad (1.1.18)$$

Donde la notación genérica :

$f_{i,j}^t$

significa $f(i\Delta x, j\Delta y, t\Delta t)$

Procedimiento de inicio

Al observar el esquema numérico anterior se aprecia que para calcular los valores de campo u , v y h en $t+1$ es necesario tener los valores de estas variables en los tiempos t y $t-1$. Por tal motivo para calcular los valores de campo en $t=1$ se utilizó el esquema de diferencia finita progresivo propuesto por Harris y Jelesnianski (1964), quienes consideraron que en el primer intervalo de tiempo las ecuaciones de transporte pueden aproximarse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f v + \frac{\beta}{\rho} + \frac{D}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1.1.19)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f u + \frac{\beta}{\rho} + \frac{D}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (1.1.20)$$

Ecuaciones que expresadas en diferencias finitas progresivas en el tiempo tienen la forma:

$$u_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\tau_{s(i,j)}^{(x)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2\rho\Delta x} (P_{i+1,j}^1 - P_{i-1,j}^1) + f v_{i,j}^1 \right) \quad (1.1.21)$$

$$v_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\tau_{i,j}^{(y)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta y} (P_{i,j+1}^1 - P_{i,j-1}^1) - f u_{i,j}^1 \right) \quad (1.1.22)$$

Que finalmente se aproximan a:

$$\begin{aligned} u_{i,j}^1 &= \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_{i,j}^{(x)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta x} (P_{i+1,j}^1 - P_{i-1,j}^1) \right. \\ &+ f \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_{i,j}^{(y)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta y} (P_{i,j+1}^1 - P_{i,j-1}^1) \right] \left. \right] \quad (1.1.23) \\ v_{i,j}^1 &= \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_{i,j}^{(y)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta x} (P_{i,j+1}^1 - P_{i,j-1}^1) \right. \\ &- f \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_{i,j}^{(x)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta y} (P_{i+1,j}^1 - P_{i-1,j}^1) \right] \left. \right] \quad (1.1.24) \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación de continuidad los valores iniciales de transporte :

$$h_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{4 \Delta y} (u_{i+1,j}^1 - u_{i-1,j}^1 + v_{i,j+1}^1 - v_{i,j-1}^1) \quad (1.1.25)$$

Análisis de la ejecución del modelo en algunos casos

Una vez programado el esquema de cálculo en lenguaje *Fortran*, se realizaron diferentes corridas con huracanes hipotéticos comprobándose la factibilidad del modelo ya que se obtuvieron valores de los distintos campos involucrados y de la surgencia acordes con los esperados desde un punto de vista teórico. Por tal razón se decidió efectuar corridas con algunos ciclones reales que han afectado al territorio nacional.

A continuación se presentan por su interés y variedad tres de las corridas realizadas:

Primer caso

Los datos de entrada en esta ocasión corresponden a los del huracán de Santa Cruz del Sur (1932) y son los siguientes:

Plazo de pronóstico	18 horas
Posición geográfica del centro del huracán	18,9 °N - 80,4 °W
Dirección y velocidad de traslación	10° y 36 km/h
Viento máximo y presión mínima	250 km/h y 930 hPa
Cuenca	Sur de Camagüey
Radio de viento máximo	50 km

En la Figura 1.1.7 se muestran los perfiles de la surgencia sobre la costa calculados por el modelo, cuando el huracán se encontraba a ocho horas de penetrar en tierra, en el momento de su llegada y tres horas después de la entrada.

La Figura 1.1.8 representa los valores máximos alcanzados por la surgencia sobre la costa en distintos instantes

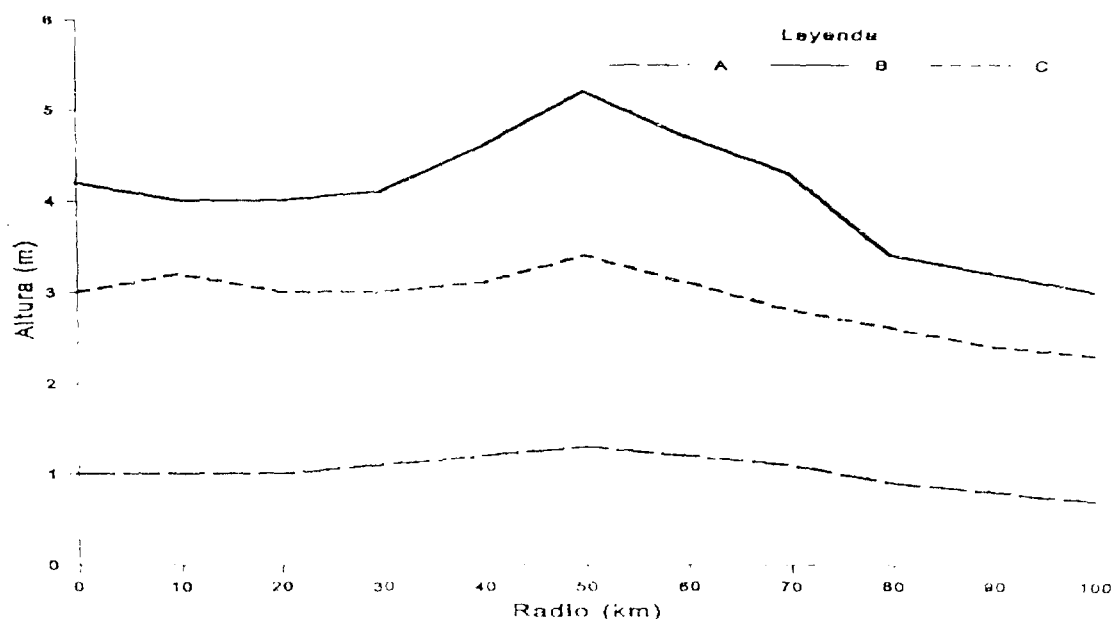


Figura 1.1.7 Comparación entre los perfiles de surgencia provocados por el huracán de Santa Cruz del Sur, 12 horas antes de penetrar en tierra, en el momento de llegada y tres horas después, según el modelo

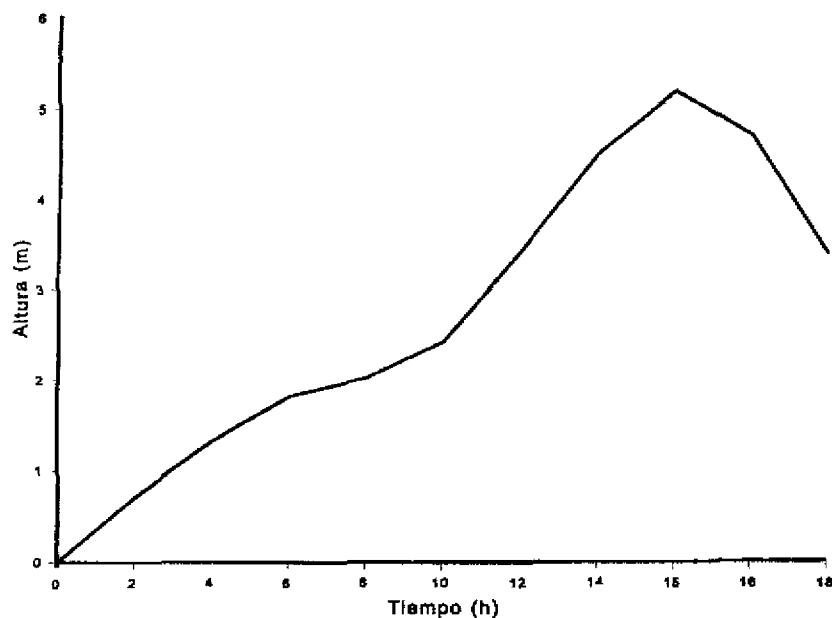


Figura 1.1.8 Valores máximos de la surgencia provocada por el huracán de Santa Cruz del Sur en distintos instantes

Segundo caso

Se modeló el huracán de 1944, el cual también fue de gran intensidad, penetró por la costa sur de las provincias habaneras (cuenca con características diferentes a la anterior), su velocidad de traslación fue mucho menor (13 km/h).

En la Figura 1.1.9 se pueden observar los perfiles modelados de la surgencia en dos instantes diferentes para este intenso huracán.

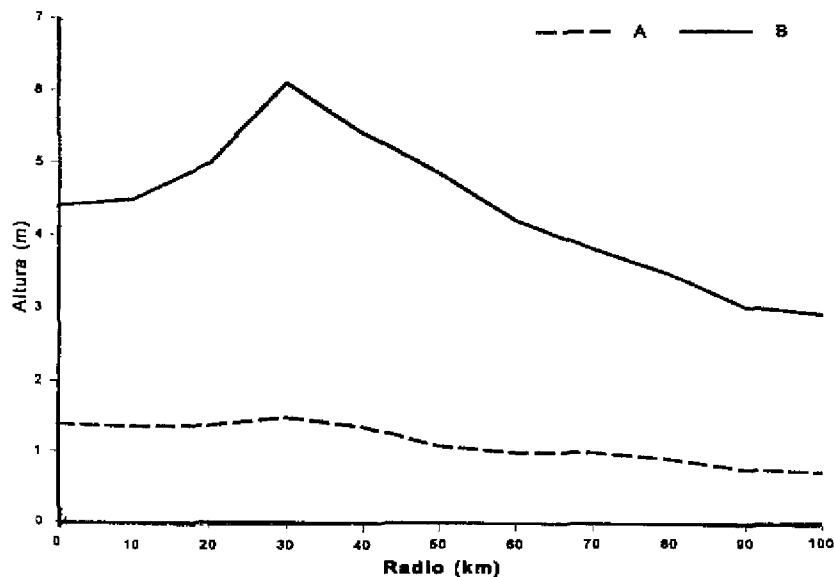


Figura 1.1.9 Perfiles de la surgencia 12 horas antes y en el momento de llegada a tierra del huracán de octubre de 1944

Tercer caso

Totalmente diferente a los dos anteriores. Corresponde al huracán Kate (noviembre de 1985), el cual tuvo un movimiento paralelo a la costa norte de Cuba, con el centro desplazándose por tierra. Produjo penetraciones del mar en una extensa zona de la región central de Cuba, la presión central fue muy superior a los modelados anteriormente. En esta ocasión los valores máximos de la marea de tormenta estuvieron alrededor de los 2 metros, según los reportes de testigos presenciales. Los resultados del modelo se muestran en la Figura 1.1.10.

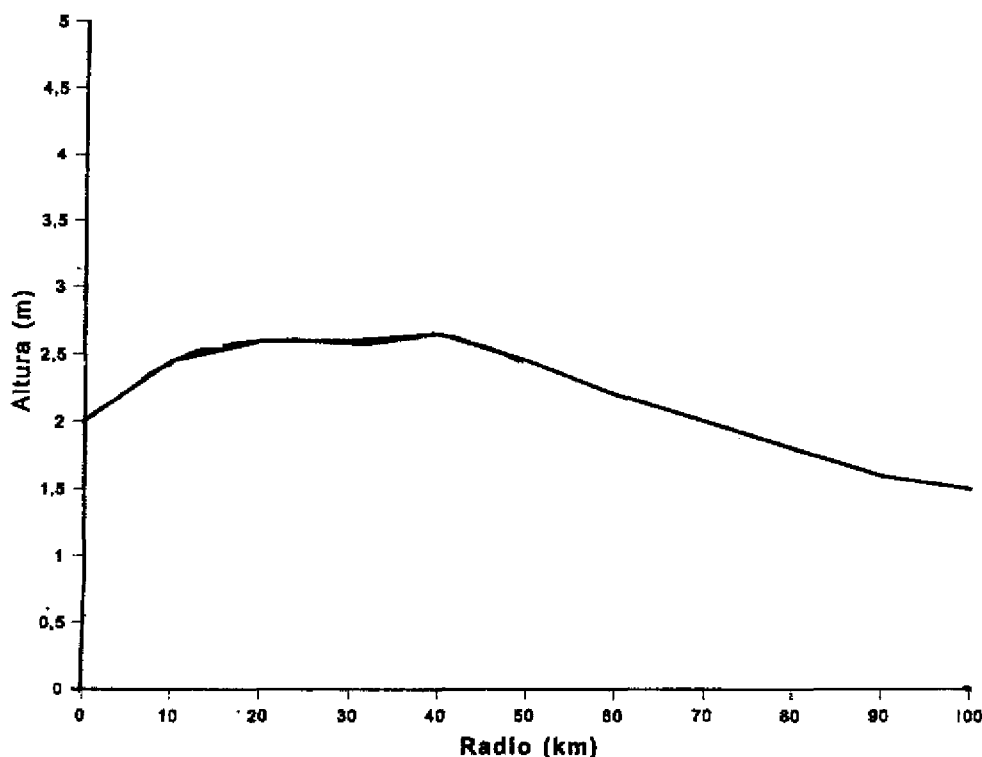


Figura 1.1.10 Perfil de la surgencia al penetrar en tierra el huracán Kate (noviembre de 1985)

Los resultados obtenidos permiten inferir que el modelo creado refleja el comportamiento y la importancia relativa de los diferentes mecanismos envueltos en la generación de la surgencia y se estima que el mismo representa una valiosa ayuda para el pronóstico de la surgencia por el Servicio Meteorológico de Cuba, no obstante se continuará trabajando en la mejora del mismo.

Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Segunda versión. MONSAC2

En esta parte de la investigación se obtiene un modelo dinámico mejorado para pronosticar la altura alcanzada por la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba, para alcanzar esa meta se estudiaron las características y el comportamiento presentado por el modelo ya construido y cuyas siglas son MONSAC1 (García y Pérez Parrado, 1994), sin olvidar las condiciones objetivas con que se cuenta en el país, esto es: base geográfica de datos, tipo de computadoras personales disponibles, etc.

Después de ese análisis se decidió mantener la filosofía utilizada en el MONSAC1 para resolver matemáticamente el sistema de ecuaciones diferenciales que describen la altura de la surgencia y el movimiento del fluido. No obstante, se realizaron diferentes pruebas con el esquema de rejilla "B" de Mesinger y Arakawa (1976), pero dada la resolución espacial del modelo y el incremento en tiempo computacional al utilizar este esquema no se realizó cambio en este sentido.

También se mantuvo invariante el modelo de viento utilizado anteriormente y el algoritmo para el cálculo de las tensiones superficiales y de fondo, partiendo del principio teórico-práctico de que la altura de la surgencia es un campo más conservativo que los campos auxiliares, siempre y cuando al modelo se le proporcionen parámetros de entrada exactos y las fuerzas usadas para calcular el viento estén en balance de gradiente.

A este nuevo modelo se le identificará como MONSAC2 (García y Pérez Parrado, 1995) y el mismo representa un salto ascendente para el Servicio Meteorológico Nacional al lograrse un pronóstico objetivo del evento más dañino y peligroso de los asociados a los ciclones tropicales.

Batimetría

Un gran número de investigadores han señalado el importante papel que desempeña la batimetría de un lugar en la amplificación de la surgencia, cuando un huracán se desplaza sobre aguas poco profundas, de lo anterior se deriva que el cálculo de la surgencia mediante un modelo donde se considera una batimetría ficticia, indudablemente ya tiene una limitante al calcular los rasgos del campo de la surgencia.

La obtención de una base batimétrica es un proceso altamente laborioso y requiere de sumo cuidado. Por otra parte, cuando entre las finalidades de un modelo está pronosticar las inundaciones sobre el terreno, es necesario que los datos de batimetría y relieve estén referidos a un mismo nivel de referencia.

En los Estados Unidos existen tres niveles de referencia para estos datos: El nivel medio del mar, el nivel medio de las aguas bajas y los datos nacionales geodésicos verticales, siendo este último el usado para la base de datos geográfica del modelo SLOSH (Jarrell, 1987).

El nivel medio del mar, no es el nivel del mar in-situ, en un tiempo específico, ni es invariante con el tiempo con respecto a un terreno ajustable, no es el mejor nivel de referencia para un modelo sofisticado de surgencia. No obstante, al hacer esta investigación la única fuente disponible en el Instituto de Meteorología de la República de Cuba para extraer los datos batimétricos en los alrededores de Cuba eran las cartas batimétricas en proyección cónica de Lambert con escala de 1:250 000 y 1:500 000 para las costas norte y sur respectivamente.

Al analizar las características físico-geográficas de la plataforma insular del archipiélago cubano se decidió la construcción de nueve cuencas, Figura 1.1.11. El número de cuencas es un parámetro de entrada al modelo usado en el algoritmo computacional como parámetro de control para situar el centro del ciclón tropical y para controlar la transformación de coordenadas geográficas a las de rejilla. También será un parámetro de gran importancia para un paso futuro, cuando se pretenda obtener un modelo dinámico de alta resolución (malla fina).

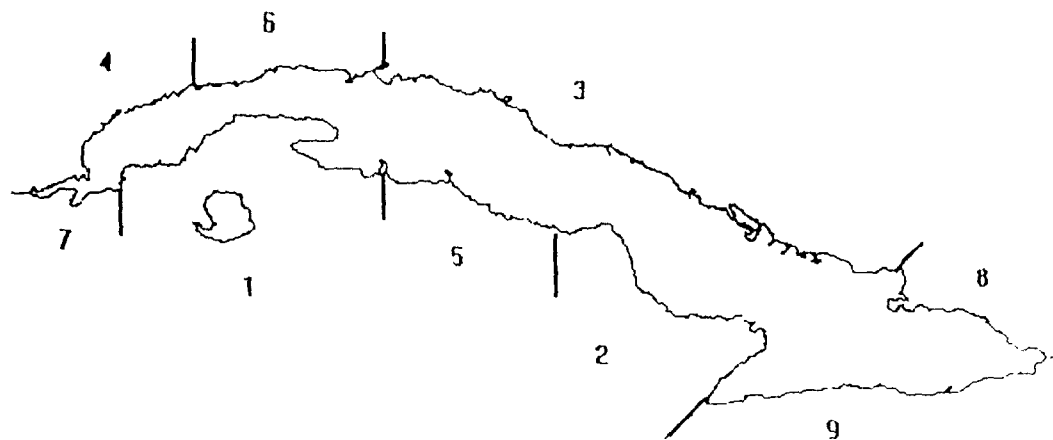


Figura 1.1.11 Cuencas seleccionadas para el modelo MONSAC2. La numeración es en orden de importancia de acuerdo a las características físico - geográficas de la plataforma insular en la generación de la surgencia

Se extrajeron 9800 datos batimétricos distribuidos de manera uniforme en una rejilla rectangular con 11 km de paso espacial, lo que constituye la base batimétrica para el modelo MONSAC2.

Resultados

Al efectuar diferentes corridas de pruebas para examinar y calibrar el modelo, una vez sustituido el fondo ficticio por el real se observó la necesidad de imponer nuevas condiciones de frontera al modelo, ya que cuando existe una marcada diferencia en los valores de la profundidad entre puntos cercanos de rejilla ocurren sumas algebraicas de distintos ordenes de magnitud, produciéndose inestabilidad computacional. Por este motivo, se impusieron las siguientes condiciones de frontera entre aguas poco profunda, mediana y profunda. (Jelesnianski, Chen y Shaffer 1992).

Aguas profundas (mayor de 45 metros)

$$\hat{h}_{i,j} = (h_0)_{i,j} \quad (1.1.26)$$

Medianamente profundas (mayor que 23 metros y menor de 45 metros)

$$\left(\frac{\delta h}{\delta x}, \frac{\delta h}{\delta y}\right)_{t,t_0} = \left(\frac{\delta h_0}{\delta x}, \frac{\delta h_0}{\delta y}\right)_{t,t_0} \quad (1.1.27)$$

Aguas poco profundas (menores de 23 metros)

$$\left((D)\frac{\delta h}{\delta x}, \frac{\delta h}{\delta y}\right)_{t,t_0} = \left((D)\frac{\delta h_0}{\delta x}, \frac{\delta h_{SUB0}}{\delta y}\right)_{t,t_0} \quad (1.1.28)$$

Donde h_0 es la altura estática.

Una vez considerado estas condiciones de frontera, los valores obtenidos eran aceptables desde un punto de vista teórico, coincidiendo en casos con los obtenidos mediante el modelo MONSAC1, pero a la vez, presentándose rasgos en el campo de la surgencia imposibles de obtener en la primera versión.

En última instancia, la confianza en un modelo la determina la comparación entre los valores de surgencia dados por el mismo y los valores observados. Desafortunadamente, registros de observaciones simultaneas de los parámetros meteorológicos necesarios para correr el modelo y de la surgencia para huracanes pasados no existen en Cuba.

Las marcas dejadas por el agua y la línea de los desechos son de gran utilidad para conocer el comportamiento de la surgencia (sin olvidar que estas huellas también reflejan el efecto del oleaje, el cual es necesario eliminar), además de representar una vía económica para obtener información, en muchas ocasiones la única fuente.

Entre los huracanes que han cruzado sobre Cuba es el de octubre de 1944 el que presenta una cierta cantidad de información histórica sobre el nivel alcanzado por las aguas, aunque estos datos no son enteramente confiables por las siguientes razones: se desconoce la calidad de las mediciones de las marcas dejadas por el agua en los diferentes objetos, y el grado de contaminación de las mismas, tampoco es posible eliminar la marea astronómica de la curva obtenida para la marea de tormenta. No obstante, se señala que en la zona por donde penetró este huracán la máxima elevación del mar debido a la pleamar no excede los 0,5 metros.

A pesar de todo lo expresado anteriormente el huracán de octubre de 1944 es el único que permite realizar una evaluación aproximada de un modelo de este tipo.

Al correr el modelo con los datos referentes a ese huracán se obtuvieron resultados acordes con los reportados.

En la Fig 1.1.12 se muestra un perfil de los valores de la surgencia dados por este modelo y el perfil de la marea de tormenta obtenido de acuerdo a los datos reportados según testigos presenciales.

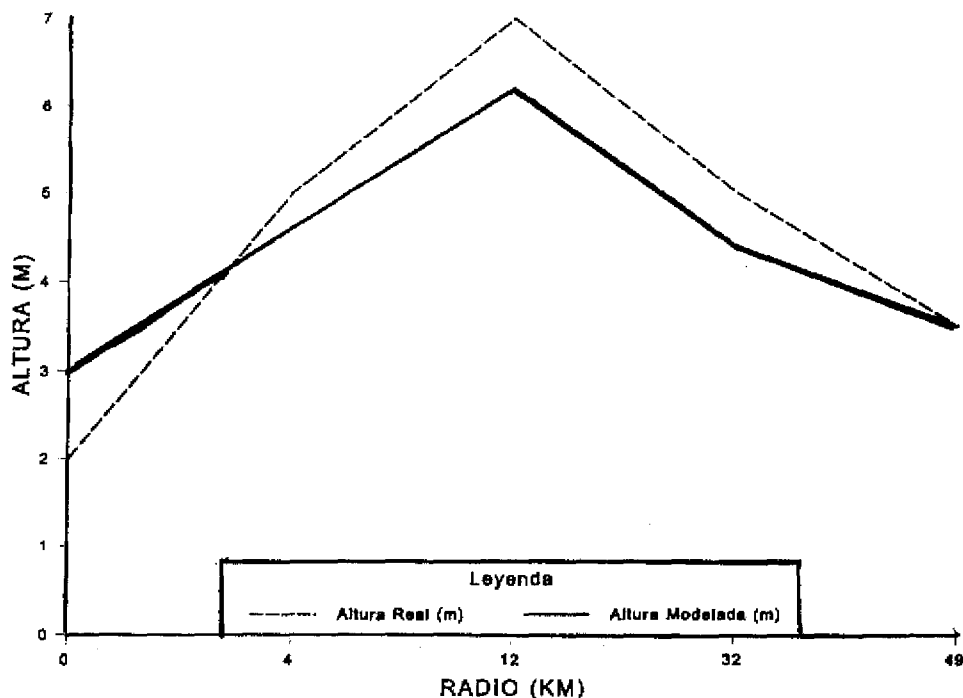


Figura 1.1.12 Gráfico de la altura alcanzada por la marea de tormenta durante el huracán de octubre de 1944, de acuerdo a testigos presenciales y el perfil de la surgencia para el modelo

Envolvente de la altura de las aguas (EOHW)

Un requisito previo para confeccionar los planes de evacuación es la determinación de las áreas costeras propensas a inundaciones debido a la surgencia. La inundación potencial podría ser especificada a través del estudio de eventos pasados ocurridos en la región de interés, pero los huracanes son eventos de rara ocurrencia para muchas regiones del mundo, en consecuencia, muchos de los datos hidrometeorológicos no están disponibles para este fin.

Entre la utilidad de los modelos numéricos está la compensación de esa falta de datos. Un producto útil en ese aspecto es el EOHW (Jarvinen y Gebert, 1986).

El EOHW representa el valor máximo de la altura alcanzada por la surgencia para cada punto de la rejilla (independiente del tiempo) y brinda una información sobre el comportamiento que tendrá la altura de la surgencia en un escenario dado para distintos ciclones tropicales. Al construir los mapas de EOHW para una cuenca dada es necesario tomar en consideración la climatología de los ciclones que han afectado esa zona.

En este trabajo se obtiene el EOHW para las costas cubanas, construido de la siguiente manera:

Para cada cuenca se corrieron huracanes en las direcciones más probables de afectación (desde un punto de vista climatológico), esto es: S, SE y SW en la costa sur y E y NE en la costa norte.

Como presión central y viento máximo sostenido se consideró el valor medio para cada intervalo de la escala de intensidad de Saffir / Simpson, (citada por Rappaport y Mc Adie, 1991), el radio de viento máximo se consideró como 20 km y la velocidad de traslación de 20 km/h.

Estos resultados constituyen un valioso atlas que se encuentra disponible en el software creado para la explotación del modelo en computadoras personales.

La Figura 1.1.13 muestra el EOHW obtenido para un huracán de categoría cinco, penetrando perpendicularmente a la costa sur de las provincias habaneras.



Figura 1.1.13 Representación gráfica del EOHW obtenido por el modelo para un huracán de categoría cinco (valor medio del rango) y movimiento perpendicular a la costa sur de las provincias habaneras

En la Figura 1.1.14 se muestra un ejemplo del campo de la surgencia obtenido por el modelo para una tormenta tropical hipotética que este afectando las costas del territorio nacional, siendo este tipo de producto la finalidad principal del modelo.



Figura 1.1.14 Ejemplo del campo de la surgencia obtenido por el modelo para una tormenta tropical que ha penetrado perpendicularmente a la costa sur de las provincias habaneras, con una presión central de 999 hPa, viento máximo de 100 km/h, radio de viento máximo 25 km y velocidad de traslación de 18 km/h

1.1.3 Aplicaciones del modelo y el cálculo de los periodos de retorno de las surgencias en Cuba

Obtención de los periodos de retorno

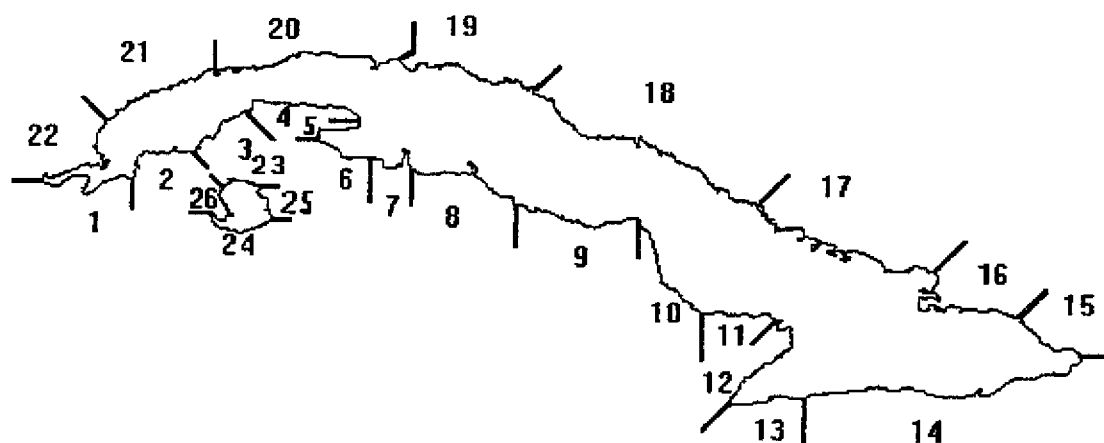
La práctica ha demostrado que las penetraciones del mar en Cuba producidas por los ciclones tropicales son relativamente frecuentes y muy peligrosas para algunos sectores de la costa, sobre todo para aquellos en que la plataforma insular es muy llana y las aguas poco profundas, en estos casos pueden producirse mareas excepcionalmente grandes, como ocurrió en los huracanes de noviembre de 1932 en Santa Cruz del Sur, donde el nivel del mar subió alrededor de 6 metros.

Otro caso notable fue el del huracán de octubre de 1944, aquí la marea borro del mapa el asentamiento de El Cajío y el agua penetró 12 km tierra adentro en la Zona de Guanimar, la altura del nivel del mar fue también aproximadamente de 6 metros.

Han ocurrido otros casos menos notables, pero también importantes como son el huracán de octubre de 1926 con 3 metros de marea en Batabanó, el huracán Kate en noviembre de 1985 con 2 metros en La Isabela de Sagua, así podemos citar alrededor de 10 huracanes con mareas notables en los dos últimos siglos.

Por este motivo utilizando el modelo presentado en este informe, se realizó un estudio de las costas de Cuba y se procedió al cálculo teórico de las mareas máximas y los perfiles para 26 sectores de las costas cubanas, ver Tabla 1.1.1 y Figura 1.1.15, así como la determinación de las cotas de inundación con las condiciones de batimetría del lugar, este trabajo se realizó para dar cumplimiento al compromiso del Instituto de Meteorología, en la realización del mapa de peligro para Cuba, empresa multi-institucional y que involucra además del Instituto de Meteorología, a los Institutos de Planificación Física y Geografía y a la Defensa Civil Nacional, para realizar este trabajo se utilizó una tormenta standard con las siguientes características:

1. La velocidad de traslación de 20 km/h
2. Radio de vientos máximos de 20 km
3. Todos los demás parámetros son variables



Fuente: INSMET - IPF

Figura 1.1.15 Mapa de sectores costeros según características físico - geográficas

Tabla 1.1.1 Sectores de la Costa Cubana tomados para el Cálculo de la Marea de Tormenta

Sector	1.....	Cabo de San Antonio a Cabo Francés
"	2.....	Cabo Francés a Estero de los Caimanes
"	3.....	Esteros de los Caimanes a Punta Salina
"	4.....	Punta Salina a Ensenada de Mijares
"	5.....	Ensenada de Mijares a Punta Gorda
"	6.....	Punta Gorda a Punta Macurijes
"	7.....	Punta Macurijes a Punta de Cazones
"	8.....	Punta de Cazones a Punta María Aguilar
"	9.....	Punta María Aguilar a Ensenada de Sabanalamar
"	10.....	Ensenada de Sabanalamar a Punta San Juan
"	11.....	Punta San Juan a Punta Birama
"	12.....	Punta Birama a Cabo Cruz
"	13.....	Cabo Cruz a Punta Caimán Grande
"	14.....	Punta Caimán Grande a Punta Maisí
"	15.....	Punta Maisí a Punta Guarico
"	16.....	Punta Guarico a Punta Lucrecia
"	17.....	Punta Lucrecia a Punta Piedras
"	18.....	Punta Piedras a Cayo la Vaca
"	19.....	Cayo La Vaca a Península de Hicacos
"	20.....	Península de Hicacos a Punta Gobernadora
"	21.....	Punta Gobernadora a Punta Lazo
"	22.....	Punta Lazo a Cabo de San Antonio
"	23.....	Punta Buenavista a Punta de Afuera
"	24.....	Punta del Este a Punta Francés
"	25.....	Punta del Este a Punta de Afuera
"	26.....	Punta Frances a Punta Buenavista