

CAPITULO 9

Hidrodinámica

Resumen

En los capítulos anteriores se ha discutido que el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez, presenta un problema serio de contaminación por el crecimiento explosivo del turismo y de la zona urbana en el centro turístico de Cancún. El deterioro del complejo lagunar debido a la contaminación por aguas residuales, a los daños ocasionados por huracanes y probablemente a los cambios morfológicos de origen antropogénico, se ha convertido en una preocupación de las autoridades y de la industria turística. Una componente fundamental en el proceso de dispersión de los contaminantes es la hidrodinámica del sistema lagunar. Son las corrientes inducidas por el viento, por las variaciones de densidad y por las mareas las que transportan los contaminantes. Puesto que el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez es bastante somero, las corrientes inducidas por gradientes horizontales de densidad no deben ser de importancia y rápidamente frenadas por fuerzas de fricción. Por este motivo, en el presente proyecto se estudia la dinámica inducida por las mareas y por el viento, los cuales son dominantes. Es conveniente mencionar en este punto que las mediciones hidrográficas de temperatura y salinidad indican que estos parámetros no varían en la vertical. Además, considerando que el sistema lagunar es bastante somero y el efecto de fricción se incrementa, es lógico pensar que las mareas sólo van a afectar una parte del complejo lagunar y, como ya se mencionó, que las corrientes inducidas por

las variaciones horizontales de densidad no juegan un papel preponderante en la dinámica de estas lagunas. Puesto que el viento actúa sobre toda la superficie del sistema lagunar, la circulación inducida por este medio es la más importante. En otras palabras el forzamiento dominante es el atmosférico.

Antecedentes

En sólo unas décadas la ciudad de Cancún, ubicada en los márgenes del sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez, se ha convertido en un centro turístico de importancia mundial y por ende, los intereses económicos de la industria turística son enormes. El crecimiento no controlado de la ciudad ha deteriorado al sistema lagunar en forma dramática (Villan, 2001). Con fines de infraestructura, la laguna ha sido dragada y rellenada en diferentes puntos, todo esto sin previos estudios realmente serios sobre la dinámica del sistema. Estos cambios morfológicos han afectado la circulación en la laguna y su intercambio con el mar abierto. La eutrofización de los cuerpos de agua con menor capacidad de intercambio de aguas (laguna de Bojórquez) ha sido documentada en los capítulos anteriores. Los problemas de contaminación se han acumulado y se hace necesario un estudio hidrodinámico en combinación con la química y estado bacteriológico del sistema y de lo que está sucediendo actualmente. El conocimiento de la dinámica es fundamental para estimar tanto aspectos biológicos como ecológicos y para proyectar trabajos de restauración del ecosistema y de la calidad del agua en todo el complejo (Jordan et al., 1997).

El sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez está ubicado en una franja costera de mucha importancia ecológica. En ella desembocan aguas subterráneas y conforman un complejo interactivo de lagunas costeras, manglares, marismas, hábitat de aguas de baja salinidad y zonas ribereñas interconectadas por canales y que en general son receptoras de material, sólidos disueltos, partículas y una infinidad de recursos provenientes de tierra adentro (Escobar, 2002). El sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez tiene características muy propias y difiere enormemente de otras franjas costeras más comunes por la alta permeabilidad de la roca circundante y de lo plano de la orografía del lugar. El agua de lluvia no se acumula y se filtra inmediatamente, desconociéndose la estructura del flujo subterráneo de agua. No hay descargas de agua dulce por ríos, todos los flujos al sistema son por filtraciones subterráneas y por lluvia directa sobre su superficie. En el capítulo 4 hemos mostrado la hidrología del sistema lagunar que sugiere las zonas en donde estas filtraciones tienden a ser más grandes por los bajos valores de salinidad (ver también Merino et al., 1990).

Morfológicamente, el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez surgió, como otras muchas lagunas, a consecuencia del transporte de litoral de arena y sedimentos. Las lagunas más importantes que lo conforman son la de Nichupté, Bojórquez y Río Inglés (Figura 3.2). Para fines prácticos vamos a distinguir la laguna de Nichupté en tres zonas; la Cuenca Norte, la Cuenca Central y la Cuenca Sur. Como se puede observar en la Figura 3.2, estas cuencas están separadas por bajos de 0.5 metros de profundidad. Para la distribución de salinidad en el complejo lagunar, es muy importante la interacción con el mar abierto. El complejo lagunar está comunicado al

mar por las bocas Cancún y Nizuc. Aunque las mareas son pequeñas en el Golfo de México y sus inmediaciones, es interesante determinar cual es la capacidad de las mareas para influir en la dinámica en el interior del complejo lagunar a través de las dos bocas. Estas bocas tienen un ancho de aproximadamente 50 y 30 metros respectivamente. La profundidad en la boca Cancún es de aproximadamente 5 metros y en Punta Nizuc de únicamente 3 metros. El área que incluye los humedales, la Isla de Cancún y la zona de tierra firme alrededor de la laguna es de aproximadamente 48 km². Las mediciones en detalle de la batimetría de la laguna, mostradas en la Figura 3.2, indican que el complejo es bastante somero con profundidades que varían entre 1 y aproximadamente 6 metros

Las lagunas costeras están profundamente influenciadas por procesos marinos, continentales y atmosféricos. La dinámica en estos sistemas es afectado por las mareas, el oleaje, el viento, la precipitación pluvial, la evaporación, los flujos de agua dulce y el transporte de sedimentos. El balance entre todos estos procesos determina las características imperantes en cada laguna. A continuación se presentan resultados sobre la hidrodinámica del sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez.

Hidrodinámica de las mareas

Las mareas diurnas y semidiurnas en esa zona del Caribe Mexicano tienen en general amplitudes que varían de moderadas a pequeñas. En primera aproximación podría decirse que tienen un carácter secundario en la dinámica del sistema. Sin embargo, cuando las mareas, incluso aquellas de pequeña amplitud, interaccionan con cuerpos

de agua costeros como lagunas, estuarios y esteros, pueden inducir una fuerte circulación en canales y dentro del cuerpo de agua mismo. Las mareas en la región de Cancún son de amplitud pequeña, como lo demuestra la tabla 9.1 (Ochoa et al. 2005). en Cozumel, la máxima amplitud de 0.0699 metros pertenece a la marea semidiurna lunar principal M_2 . Le sigue la marea principal solar S_2 con un amplitud de 0.0314 metros.

Tabla 9.1 Amplitudes y fases de las mareas principales en Cozumel y Calica. Datos tomados de Ochoa et al. (2004).

	Amplitud (m) Cozumel	Amplitud (m) Calica	Fase (grados) Cozumel	Fase (grados) Calica
Q_1	0.0088	0.0091	354 ± 5	355 ± 4
O_1	0.0288	0.0277	5 ± 2	6 ± 1.5
K_1	0.0139	0.0112	303 ± 3	313 ± 3
N_2	0.0239	0.0240	60 ± 1	59 ± 1
M_2	0.0699	0.0698	73 ± 0.5	72 ± 0.4
S_2	0.0314	0.0312	54 ± 1	51 ± 1
K_2	0.0072	0.0072	29 ± 5	29 ± 5

Las mareas semidiurnas M_2, S_2 son entonces las más importantes en Cozumel y en Calica. Las mareas diurnas alcanzan valores aún menores. Esta zona del Caribe debe estar en las cercanías de puntos anfodrómicos semidiurnos y diurnos, es decir, en zonas donde el nivel del mar varía muy poco en el proceso de oscilación de las diferentes constituyentes de marea (M_2, S_2, K_1, O_1, K_2) y otras. Con el fin complementar la información sobre las mareas en esta zona del Mar Caribe Mexicano, se presenta en la Figura 9.1 una serie de tiempo de las mareas en Cozumel para el

mes de Diciembre de 2004. Las mareas tienen un comportamiento semi-diurno con rangos que van desde unos 10 centímetros en tiempos de marea muerta hasta aproximadamente 30 centímetros en mareas vivas. Las oscilaciones muestran también que aunque el ciclo de mareas muertas a mareas vivas (14 .7 días) es muy suave, en tiempos de mareas vivas el efecto de marea debe ser, al menos en periodos de algunos días, lo suficientemente importante para producir un intercambio de agua significativo en las bocas. A continuación se describe la formulación matemática del modelo y posteriormente se presentan resultados sobre la hidrodinámica del sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez.

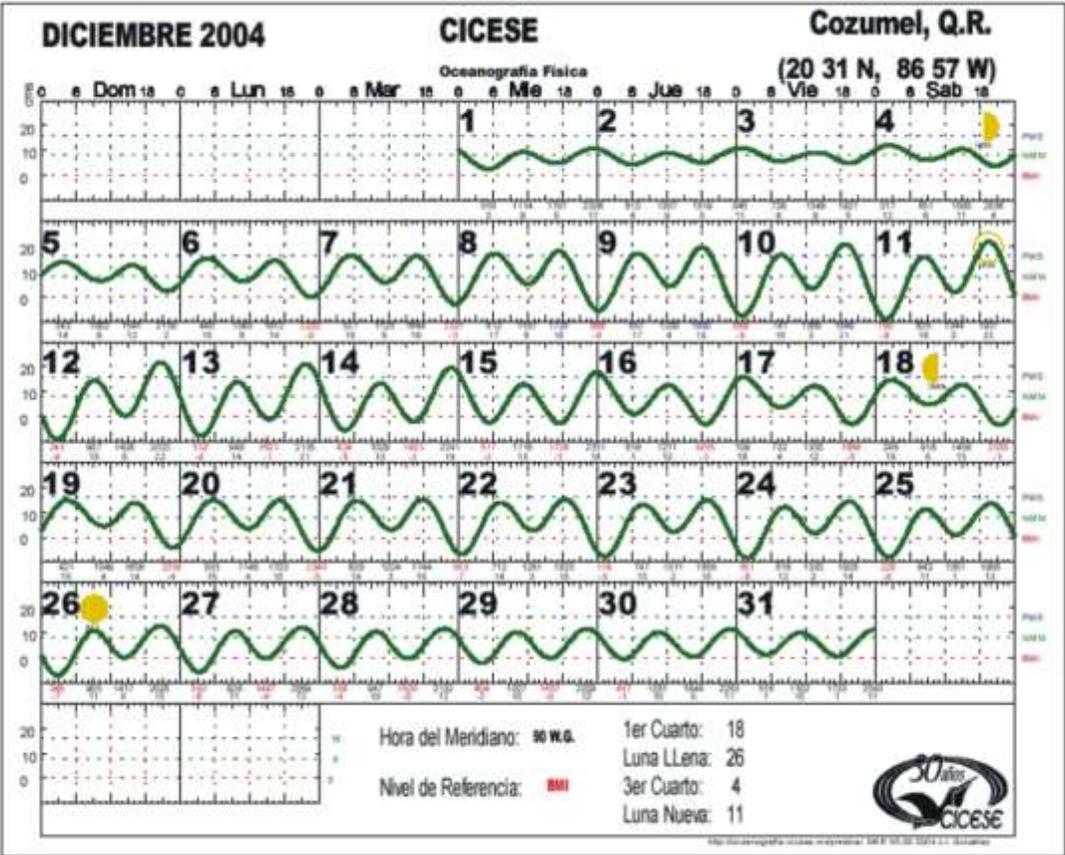


Figura 9.1 Calendario de mareas de la zona de Isla mujeres. Su comportamiento es muy semejante al de Cancún. Gráfica obtenida del departamento de Oceanología del CICESE.

Modelo hidrodinámico numérico

En este documento, se reportan los resultados de un modelo hidrodinámico numérico no lineal de diferencias finitas, semi-implícito, verticalmente integrado (Obeso-Nieblas et al., 2002; Obeso-Nieblas et al., 1999; Carbajal, 1993). El modelo, ha sido aplicado con bastante éxito para calcular la circulación marina en lugares tan distintos como el Golfo de California (Carbajal y Backhaus, 1998), el Delta del Río Colorado (Montaño, 2004), y en el complejo lagunar de Altata Ensenada del Pabellón, Sinaloa (Carbajal y Riboni, 2002).

El modelo se basa en las ecuaciones de movimiento

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{H + \zeta} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{(H + \zeta)} \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g(H + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - r \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{H + \zeta} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{H + \zeta} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{(H + \zeta)} \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g(H + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - r \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{H + \zeta} \quad (2)$$

y la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

En estas ecuaciones la explicación de los símbolos es la siguiente:

x, y coordenadas espaciales en la horizontal

t es el tiempo

U es el transporte en la dirección x

V es el transporte en la dirección y

ζ es la elevación del mar

A_H = Coeficiente de intercambio turbulento horizontal

$f = 2\Omega \sin \phi$ es el parámetro de Coriolis

$\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ es la velocidad angular de la Tierra

H es la profundidad

g es la aceleración gravitacional

r es el coeficiente de fricción

En las bocas el sistema es forzado por una oscilación en el nivel del mar de la forma

$$\zeta = \zeta_0 \cos(\omega t - \varphi)$$

donde ζ_0 es la amplitud, φ es la fase y ω la frecuencia de la onda de marea incidente.

En los cálculos llevados a cabo se seleccionó $\zeta_0 = 0.07$ cm para la marea lunar

principal, M_2 . En las fronteras abiertas el gradiente de velocidad tiene la forma

$$\frac{\partial V_n}{\partial x_n} = 0$$

donde V_n es el transporte normal y x_n es una variable espacial normal a la frontera abierta. Se aplicó un coeficiente de fricción constante $r = 0.003$.

Resultados

La aplicación de un modelo bidimensional verticalmente integrado se basa en el hecho de que las variaciones de temperatura y salinidad en la vertical son muy pequeñas. Adicionalmente, el sistema lagunar es muy somero y el efecto de fricción es grande, por lo que en primera aproximación la modelación numérica bidimensional debe reflejar bien la circulación inducida por el viento y por las mareas.

Con el fin de investigar que orden de magnitud alcanza la interacción de estas amplitudes de marea con el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez, se llevó a cabo una simulación numérica para la marea semidiurna dominante M_2 . La diferencia de fase entre la boca Cancún al norte y la boca de Punta Nizuc es de tan sólo unos 5 minutos o equivalentemente de 2.4° . Ya se mencionó que la amplitud de la onda de marea entrante en las bocas tuvo un valor de 0.07 metros. De este modo se forzó la marea en el sistema lagunar. En la Figura 9.2 se muestra la circulación en el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez a un octavo de periodo de componente de marea M_2 . Tal y como se esperaba, la circulación inducida por las mareas se restringe a zonas aledañas a las bocas Cancún en el norte y en mucha menor importancia en la región de la boca Punta Nizuc. Las velocidades alcanzan valores del orden de 0.20 m/s en los canales vecinos a la entrada por la boca Cancún. Es interesante observar los abanicos

de influencia en los canales que desembocan a la laguna de Nichupté, uno en el canal que desemboca hacia la parte norte y otro hacia la parte central de Nichupté. Se distinguen dos abanicos asociados al flujo de marea, uno más significativo en la parte noroeste y el otro proveniente de Punta Nizuc en el sur de menor importancia. En la parte central de Nichupté, estos abanicos no parecen tener mucha influencia. El intercambio de aguas entre la laguna Bojórquez y Nichupte ocurre principalmente a través de la boca sur que comunica los dos cuerpos de agua y alcanza en esta etapa del periodo velocidades máximas de unos 0.03-0.04 m/s. En general, las mareas tienen una mayor influencia dinámica en la parte centro-norte de Nichupté. Por otro lado, los cuerpos de agua ubicados en la parte noroeste, en el sur y suroeste, no son influenciados por la propagación de la onda de marea M_2 en el sistema lagunar a este instante del periodo. Es interesante mencionar que las velocidades asociadas a las mareas se incrementan en las zonas donde dos cuerpos de agua se comunican. Así por ejemplo, entre el cuerpo de agua de la laguna Inglés y Nichupté, las velocidades alcanzan valores del orden de 0.10 m/s. El flujo también se incrementa en las zonas muy someras del sistema. Se puede observar, por ejemplo, una franja de velocidades mayores que cruza de Oeste a Este en la parte central de Nichupté.

Un octavo de periodo mas tarde, es decir, a un cuarto de ciclo, la distribución de flujo cambia ligeramente en el sistema lagunar (ver Figura 9.3). Las velocidades se incrementaron lo mismo que la zona de influencia de los abanicos. Las velocidades asociadas a flujos entre cuerpos de agua diferentes alcanzan valores de hasta 0.15-0.20 m/s entre la parte sur y norte de Nichupté. Entre Bojórquez y Nichupté las

velocidades son del orden de 0.10 m/s. Si consideramos que la profundidad media en este canal que une a Bojórquez con Nichupté tiene una anchura de 60 metros y un profundidad promedio de 1.5 metros, podemos decir entonces que a esta velocidad de 0.10 m/s y en estos instantes de la circulación hay un flujo de aproximadamente $9 \text{ m}^3 / \text{s}$. Puesto que parte de este flujo es recirculado otra vez hacia Bojórquez podemos deducir que el intercambio por mareas es demasiado pequeño. A continuación proponemos una manera de resolver el problema de intercambio de agua entre Bojórquez y Nichupté. La metodología propuesta tendría una gran eficiencia de intercambio de agua, haciendo que el flujo hacia y desde Bojórquez siempre tenga la misma dirección, es decir, hacer trabajar a la laguna de Bojórquez como un diodo, con flujo de agua en una sola dirección. Esto se lograría, por ejemplo, al momento que el nivel del agua aumenta por las mareas, la boca norte que une a Bojórquez con Nichupté, se cierra con una compuerta, de tal modo que sólo entre agua a Bojórquez por la boca sur. Al entrar el agua el nivel del agua en Bojórquez sube como en todo el sistema lagunar. Al momento, en que la marea cambia de dirección la boca sur se cierra con una compuerta y se abre la boca norte para que salga el agua al ir bajando el nivel del agua en Nichupté. De este modo, se logra un intercambio de agua mucho más efectivo, que en la forma oscilante actual. Puesto que la predicción de la mareas es muy buena para varios años a futuro, se podría mediante un sistema electrónico programar la apertura y cierre de las bocas norte y sur.

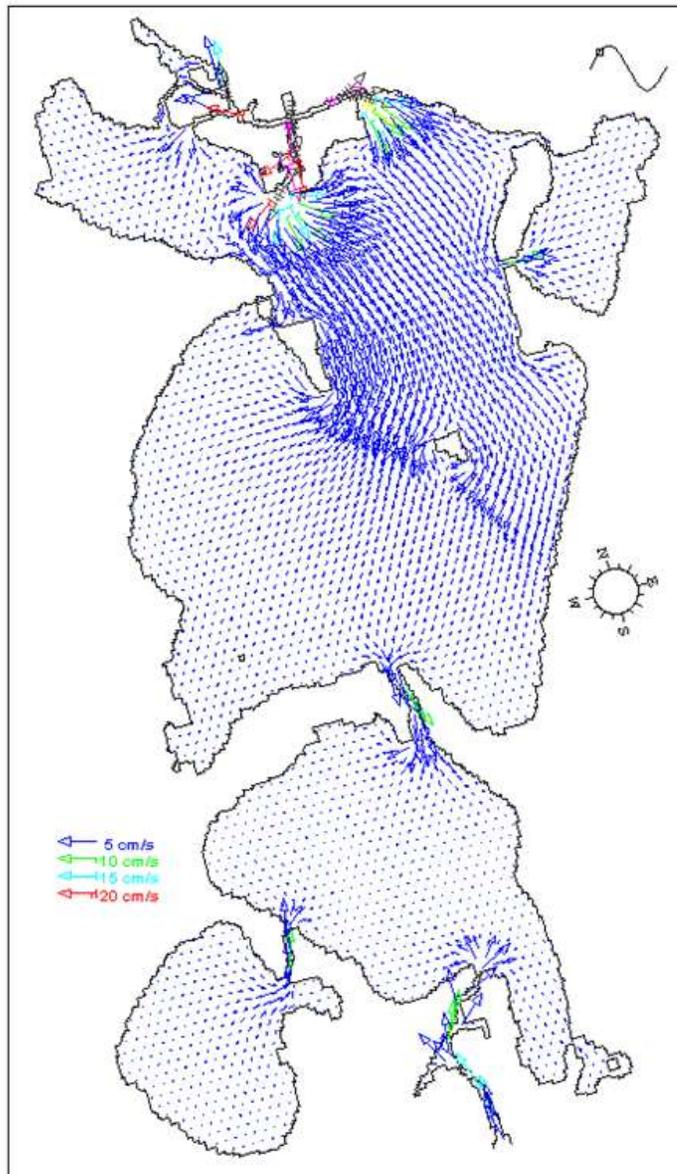


Figura 9.2 Flujo de la marea M_2 a un octavo de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.

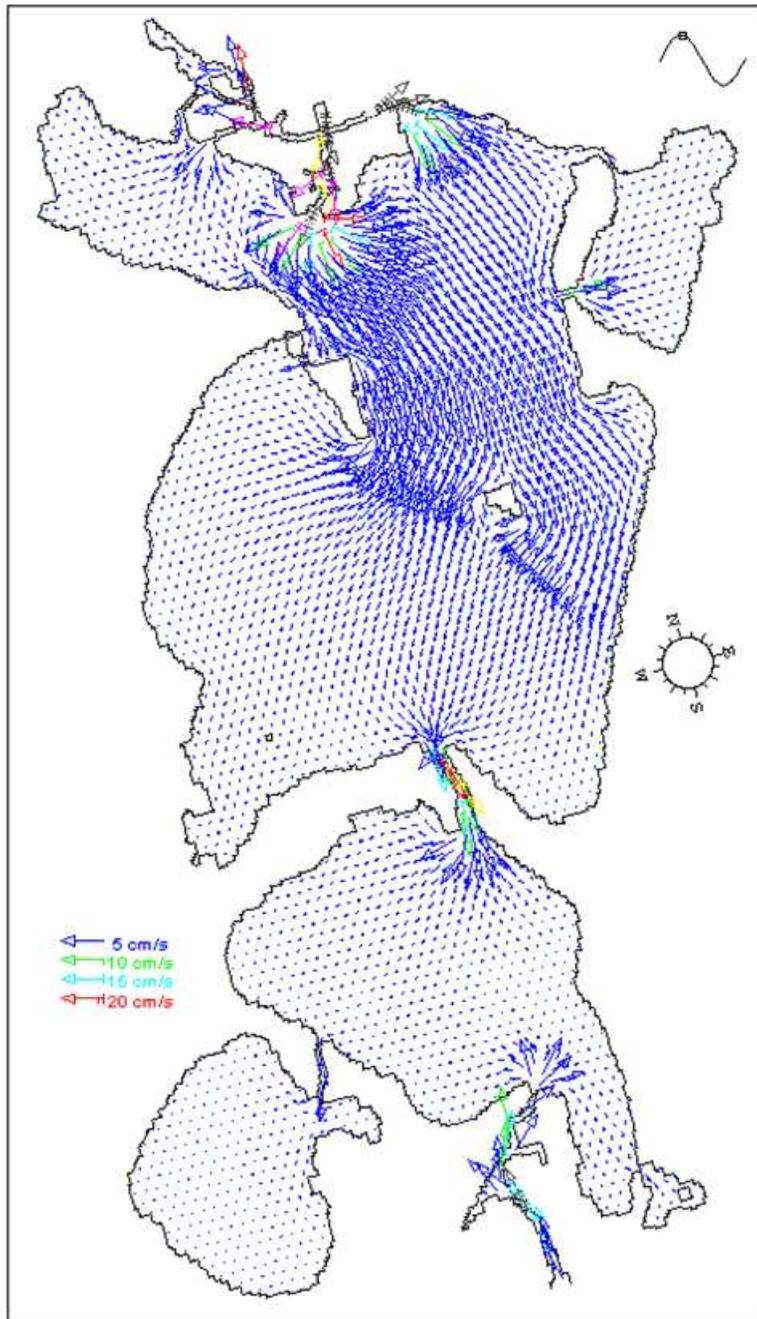


Figura 9.3 Flujo de la marea M_2 a un cuarto de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.

La circulación por la marea M_2 tiende ligeramente a ser menos intensa cuando se encuentra en los tres octavos de periodo (ver figura 9.4). Como se puede observar en la serie de tiempo mostrada en la parte superior derecha, el forzamiento en las bocas disminuye. Sin embargo, el intercambio de aguas entre los diferentes cuerpos o lagunas que conforman el sistema continúa siendo importante. Es interesante mencionar que en la laguna del Inglés por ser el cuerpo de agua más alejado de las bocas, debe presentarse un retardo en la fase. Este retardo ocurre como resultado del tiempo que necesita la onda para llegar a ese cuerpo de agua, pues esta laguna está ubicada en la parte más escondida del sistema, al menos en relación a la boca Cancún, ubicada en el norte y por la cual ocurre principalmente el forzamiento por mareas. El retardo se debe a que la marea se propaga con una velocidad de fase $c = \sqrt{gH}$, donde $g = 9.8$ m/s² y H es la profundidad. Considerando una profundidad promedio de 1.5 metros $c = 3.8$ m/s. Puesto que la onda de marea debe recorrer una distancia de alrededor de 18 kilómetros, resulta un desfase con respecto a la boca de al menos 1 hora veinte minutos. Esta explicación puede ser aplicada a los otros cuerpos de agua para explicar las diferencias de fase.

En las tres gráficas mostradas se puede apreciar que el flujo alcanza su máxima intensidad en los canales ubicados en los alrededores de la entrada en la boca Cancún y esto se mantiene durante todo el proceso de propagación de la onda de marea.

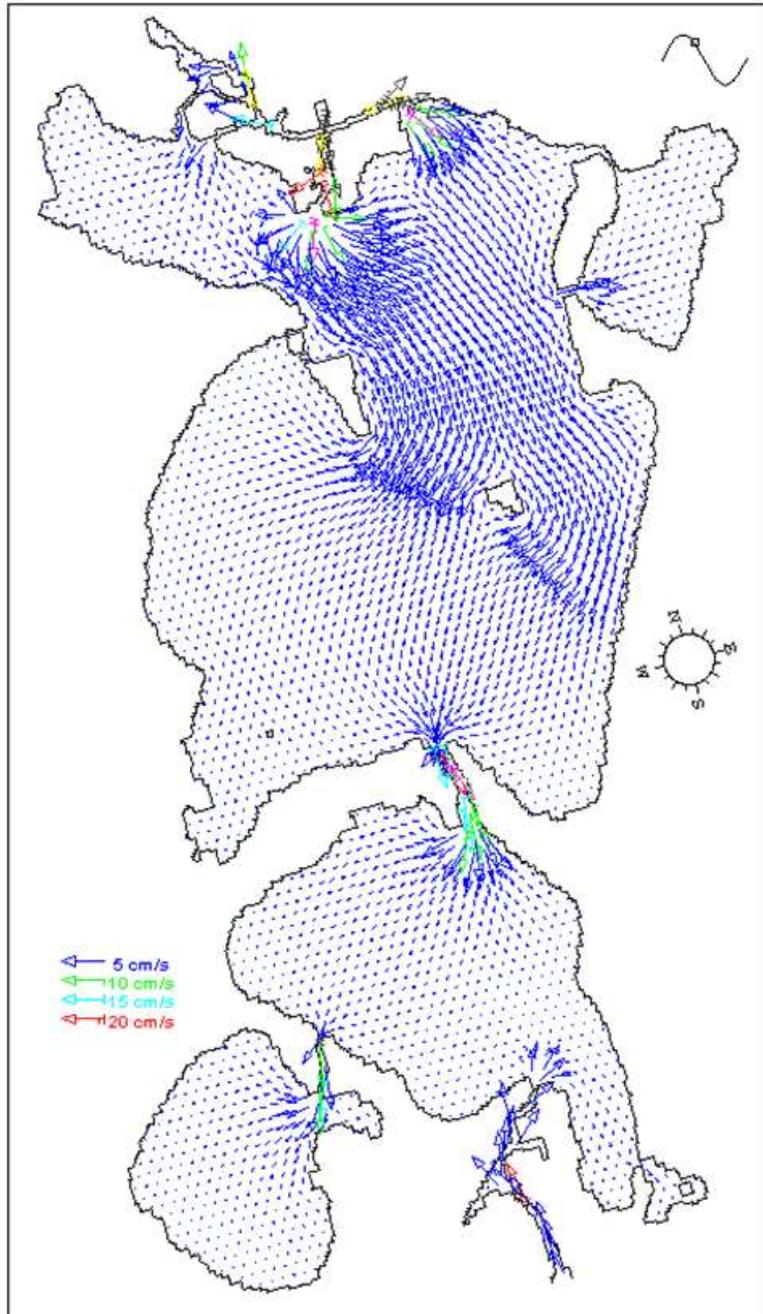


Figura 9.4 Flujo de la marea M_2 a tres octavos de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.

En la figura 9.5 se muestra la circulación a la mitad del periodo de la M_2 . Esto corresponde al tiempo de calma, es decir, cuando los flujos de marea cambian el sentido. Solamente en los canales cercanos a la boca Cancún y en los canales que unen los diferentes cuerpos de agua las velocidades son significativas, alcanzando incluso valores de hasta 0.15 m/s. En el resto del sistema lagunar las velocidades son bastante pequeñas.

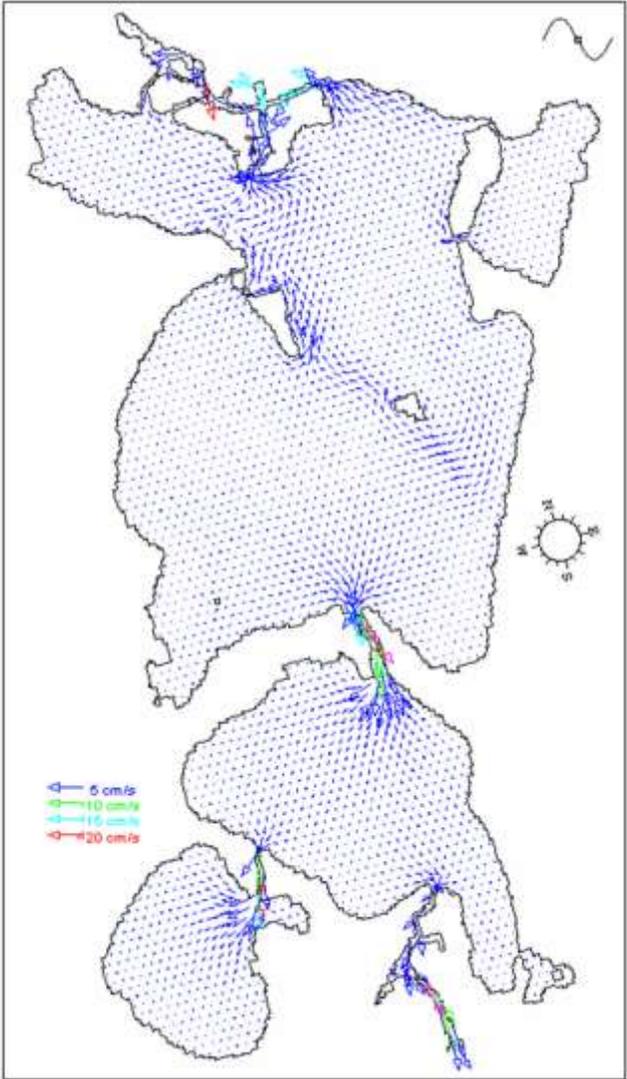


Figura 9.5 Flujo de la marea M_2 a la mitad de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.

La circulación a los tiempos de reflujo (flujo hacia el mar) son mostrados en las gráficas 9.6, 9.7, 9.8 y 9.9. Por comparación con los flujos de marea mostrados en las Figuras 9.2, 9.3 y 9.4, se deducen aspectos muy interesantes: sobre todo aquellos relacionados con las corrientes residuales que surgen de las diferencias existentes entre los procesos de flujo y reflujo de mareas. Así por ejemplo, se observa que los reflujos hacia los canales no forman abanicos como aquellos que aparecen en las Figuras 9.2, 9.3 y 9.4. Por tanto en estas zonas la circulación residual debe ser importante y capaz de tener una eficiencia importante en el transporte de sustancias disueltas en el agua. Generalmente, en las zonas donde los flujos y los reflujos son diferentes la corriente residual tiende a ser importante debido a que el denominado efecto de Stokes contribuye de manera importante a la corriente residual (Carbajal, 1998). En general, las corrientes residuales se pueden clasificar en tres partes: la corriente residual de Lagrange (U_L), de Euler (U_E) y de Stokes (U_S). Estas tres corrientes residuales están relacionadas por la ecuación $U_L = U_E + U_S$. Este aspecto de las corrientes residuales debe ser investigado en el futuro para estimar los tiempos de residencia y finalmente la capacidad de intercambio de materiales entre el sistema y el mar abierto.

De toda la serie de gráficas se deducen los siguientes aspectos: la laguna de Bojórquez tiene poca capacidad de intercambio de aguas por la acción de mareas. La laguna del Inglés no se ve prácticamente afectada por las mareas. La influencia de las mareas se reduce a la parte norte y central de la laguna de Nichupté, sobre todo en las zonas de los abanicos. La acción de la marea por el canal de Punta Nizuc no afecta la

parte sur de la laguna de Nichupté. La zona somera en la parte central de Nichupté amortigua sobre manera la capacidad de propagación de la marea en el complejo lagunar.

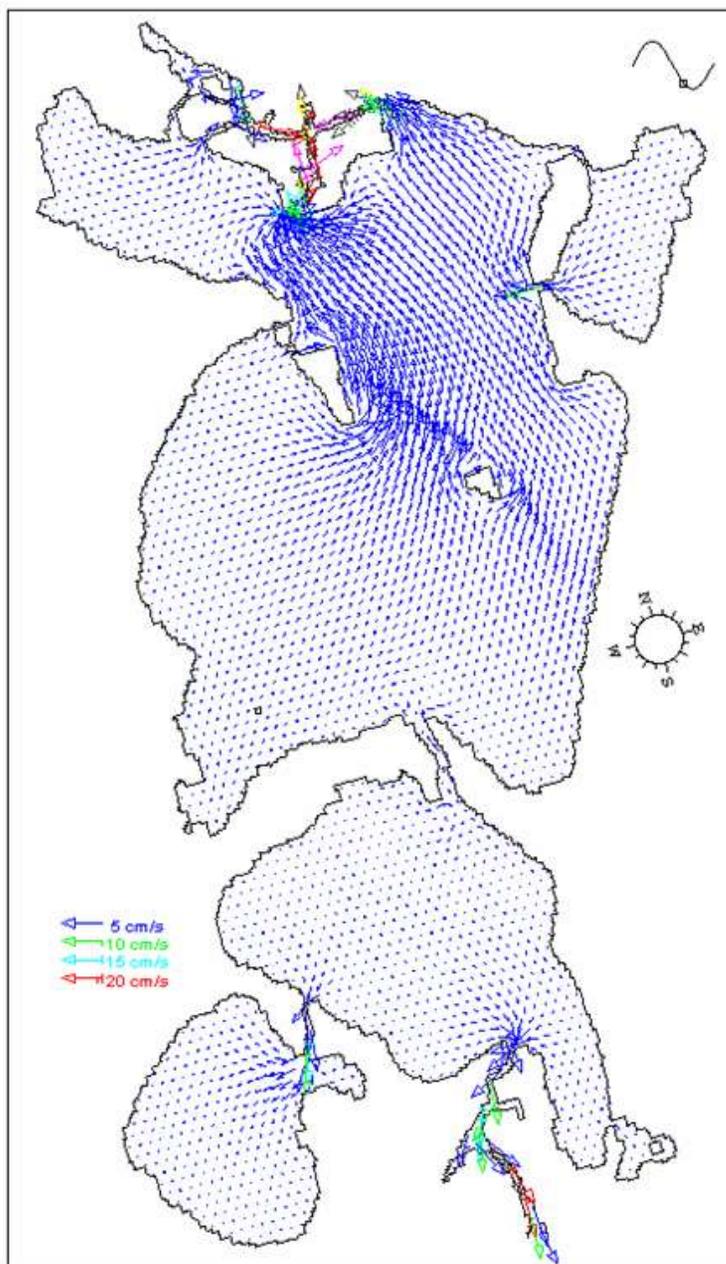


Figura 9.6 Flujo de la marea M_2 a cinco octavos de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.

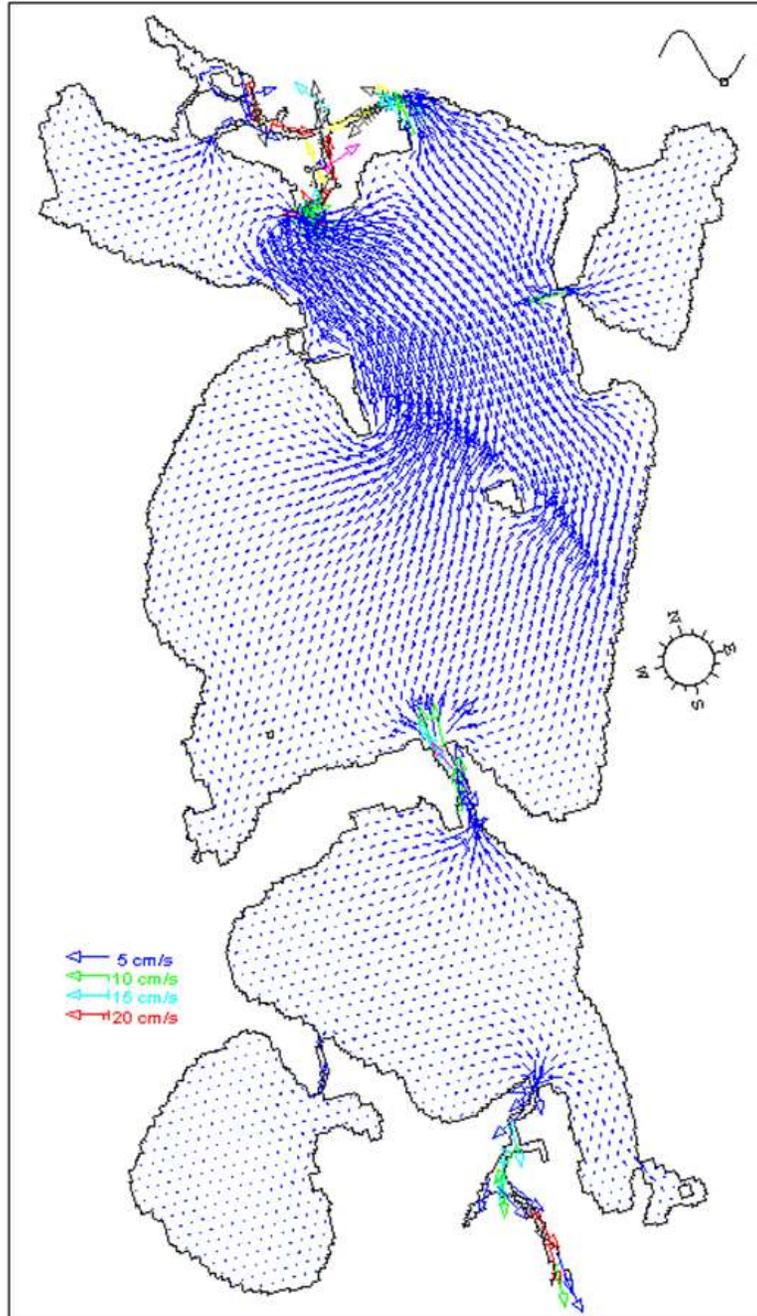


Figura 9.7 Flujo de la marea M_2 a tres cuartos de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.

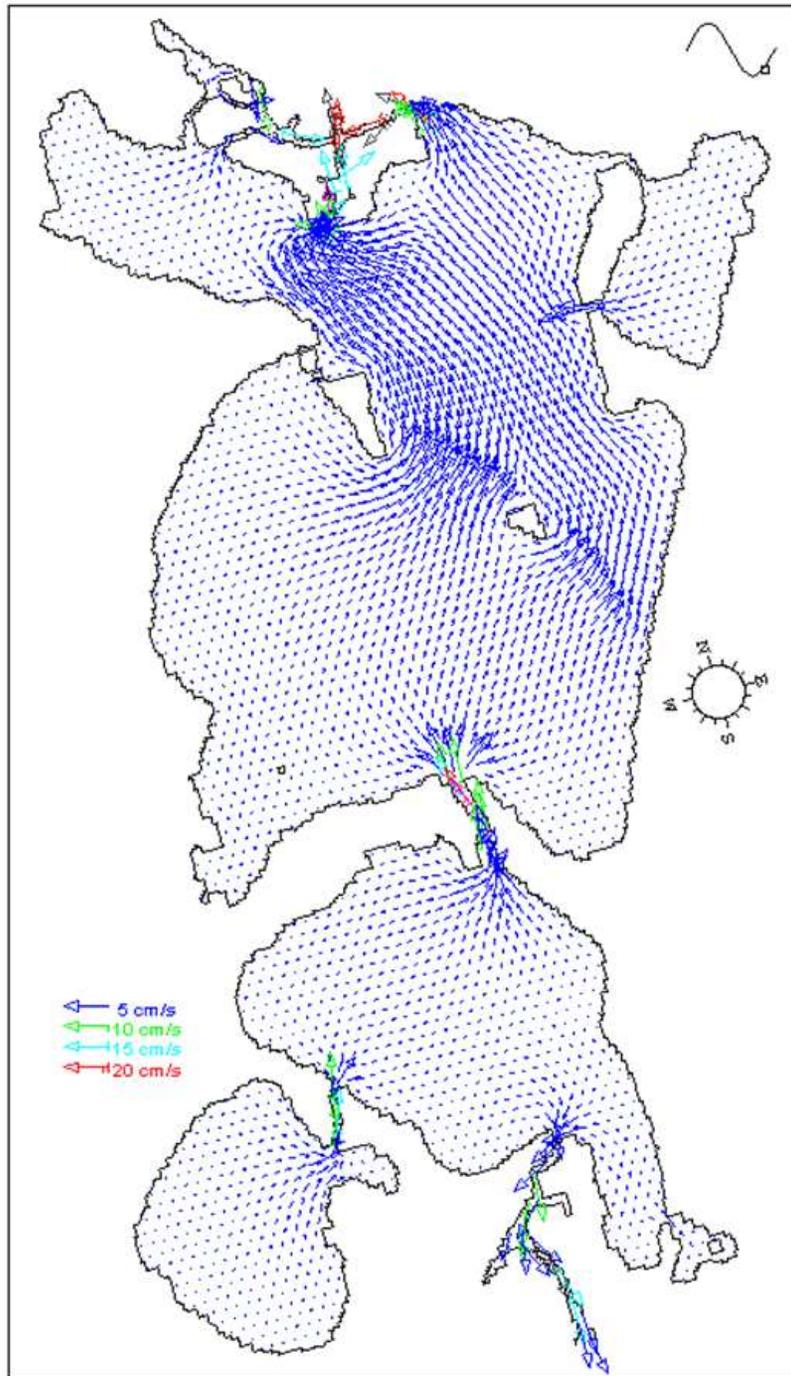


Figura 9.8 Flujo de la marea M_2 a siete octavos de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.

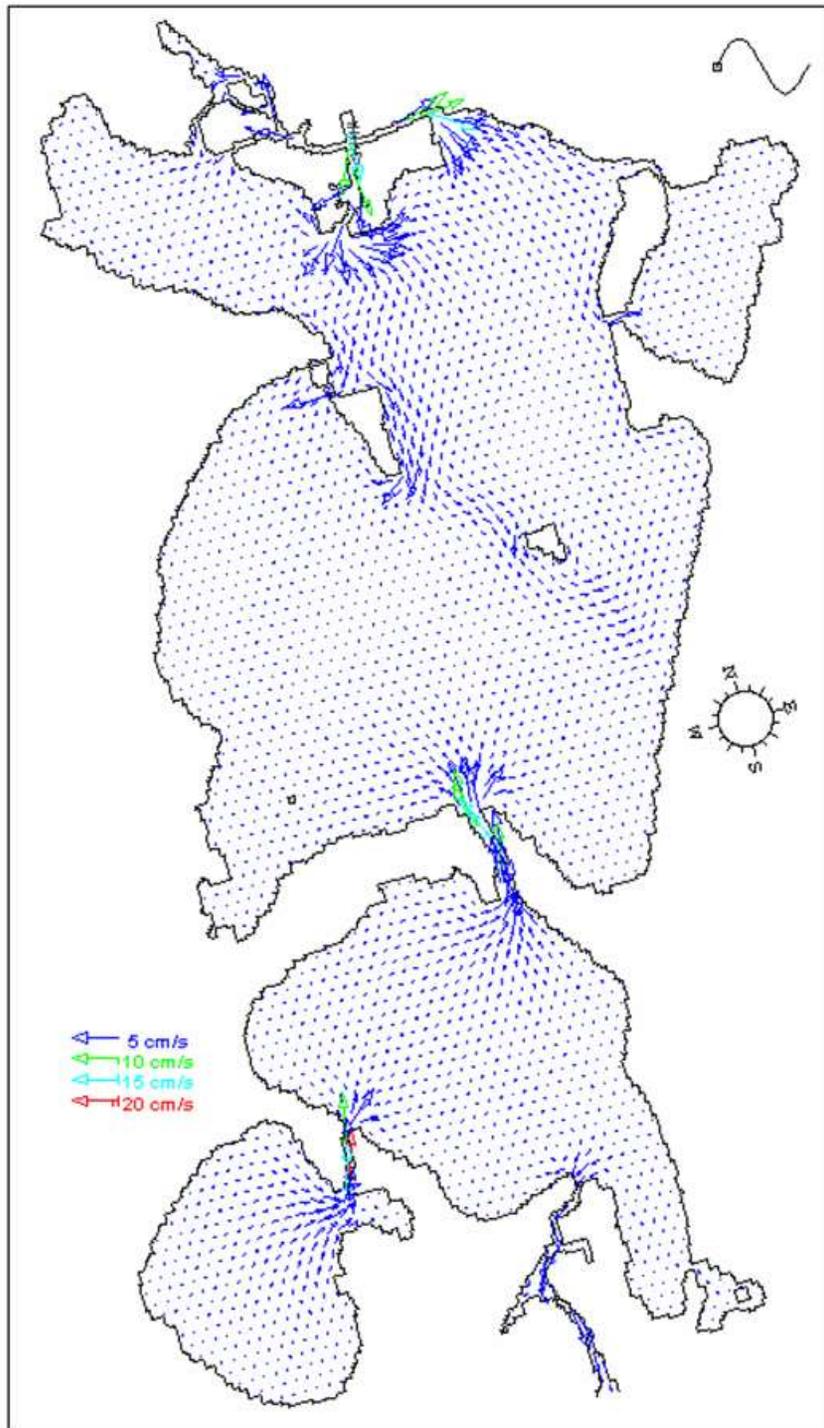


Figura 9.9 Flujo de la marea M_2 al inicio de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.

La serie de graficas mostradas arriba a diferentes tiempos del periodo de marea, también muestra que, a pesar de las amplitudes relativamente pequeñas en las bocas Cancún y Punta Nizuc, las velocidades en los canales y en los abanicos alcanzan valores de hasta 0.20 m/s. La zona de acción de las mareas abarca la zona de los canales y buena parte de la laguna de Nichupté. Además, es interesante mencionar que la barra somera que divide a la laguna de Nichupté, prácticamente en dos cuerpos de agua, limita que las mareas se propaguen a la parte sur. La influencia de la Boca Nizuc en el sur se limita a la zona de los canales.

Hidrodinámica inducida por el viento

Estudios realizados en octubre de 1993 por el Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA) mostraron que los vientos provenían predominantemente del Noreste con velocidades típicas que variaban entre 1 y 4.5 m/s (León, 1993). Sin embargo, se han reportado promedios mensuales de velocidad del viento que varían entre 5 m/s y 16 m/s (González et al., 1992). Indudablemente esta intensidad de vientos debe ocasionar corrientes importantes en el sistema lagunar. En el capítulo 3, en las Figura 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 hemos hecho una descripción de los vientos dominantes en la zona de Cancún. Hemos visto por ejemplo que en la serie de tiempo de todo un año (Figura 3.9), hay muchos eventos de intensos vientos con velocidades entre 25 y 30 km/h (7-8 m/s). Con el fin de investigar la circulación inducida por el viento en el sistema lagunar

de Nichupté-Bojórquez, se realizó una serie de experimentos de simulación numérica con vientos actuando sobre el sistema desde diferentes direcciones.

En la figura 9.10 se muestra la circulación provocada por un viento soplando de norte a sur con una velocidad de 5 m/s. Tal y como se esperaba, la circulación es del mismo orden en prácticamente todo el sistema lagunar con velocidades del orden de 0.03 a 0.05 m/s. Pond y Pickard (1978) dan una expresión para estimar las velocidades inducidas por el viento en la superficie. Esta fórmula es únicamente una estimación y tiene fines prácticos. La velocidad inducida en el agua esta dada por

$$V = \frac{0.0127}{\sqrt{\sin|\phi|}} W$$

donde V es la velocidad en la superficie del agua, W es la velocidad del viento y ϕ es la latitud. Para $\phi = 21^\circ$ y $W = 5$ m/s resulta $V \approx 0.10$ m/s. El hecho de que las velocidades calculadas para un viento de 5 m/s alcancen sólo valores de hasta 0.05 m/s, se explica por lo somero del complejo lagunar, lo cual induce un efecto de fricción importante que reduce las velocidades. La fórmula arriba discutida es para aguas más profundas pero igualmente puede ser usada para estimar el orden de magnitud de velocidades superficiales del agua. En la figura 9.10 se puede observar que una gran cantidad de remolinos son inducidos por el viento proveniente del norte. En general, tal y como lo predicen las teorías sobre circulaciones inducidas por el viento en cuencas cerradas, se producen dos remolinos en cada cuerpo de agua. Esto se puede observar en la laguna Bojórquez, en el cuerpo de agua ubicada en el noroeste, en el cuerpo de

agua principal de la laguna de Nichupté en el norte y en la parte central, en el cuerpo de agua en el lado sur y en la laguna del Inglés. Es bien sabido que los remolinos tienen una gran capacidad de intercambio de aguas, pues pueden transportar de un lado a otro de una laguna sustancias disueltas en el agua. Por tanto el viento puede redistribuir eficientemente el agua dulce proveniente de los manantiales y de los escurrimientos en la parte oeste y suroeste del sistema lagunar. Puede también redistribuir los contaminantes contenidos en las márgenes y provenientes de los asentamientos humanos y de los hoteles ubicados alrededor del sistema lagunar. La circulación por el viento transporta las aguas residuales de un lugar a otro del sistema lagunar y transporta sedimento fino de una región a otra. Así por ejemplo, de los resultados discutidos en los capítulos 5 y 6, se demostró que la laguna Bojórquez exporta sustancias hacia Nichupté. Se puede observar en la circulación mostrada en la figura 9.10 que las sustancias que eventualmente salieran de la laguna Bojórquez por la boca sur, podrían ser transportadas hacia el norte y luego con probabilidades de abandonar el sistema lagunar en combinación con las corrientes de marea. En todo caso, puesto que el viento es un fenómeno siempre presente en esta zona de la Península de Yucatán y considerando la presencia de remolinos en todo el sistema lagunar, los contaminantes vertidos en el sistema lagunar son redistribuidos en todo el área. La única laguna que no muestra un intercambio de aguas eficiente es la de Bojórquez, lo cual explica los altos valores de concentración de contaminantes dentro de la laguna como el nitrato, amonio, surfactantes, nitrito y fosfato (ver Figuras del capítulo 5). Otra fuente de contaminantes, puesta al descubierto en nuestras mediciones, está ubicada en la parte noroeste del sistema lagunar, donde se midieron

muy altas concentraciones de amonio y otras sustancias (capítulo 5). En esta parte de la laguna, igualmente la presencia de los remolinos sugiere que el transporte es eficiente y estas sustancias son redistribuidas de tal modo que pueden alcanzar los canales de intercambio con el mar abierto, si la interacción con las mareas favorece este proceso. Adicionalmente, es interesante mencionar que en las zonas más someras, la intensidad de las corrientes aumenta debido al efecto de continuidad, es decir, por conservación el flujo aumenta en las zonas donde disminuye la profundidad. Estas áreas están mostradas en verde en la figura 9.10, en donde el flujo alcanza velocidades del orden de 0.08 a 0.10 m/s.

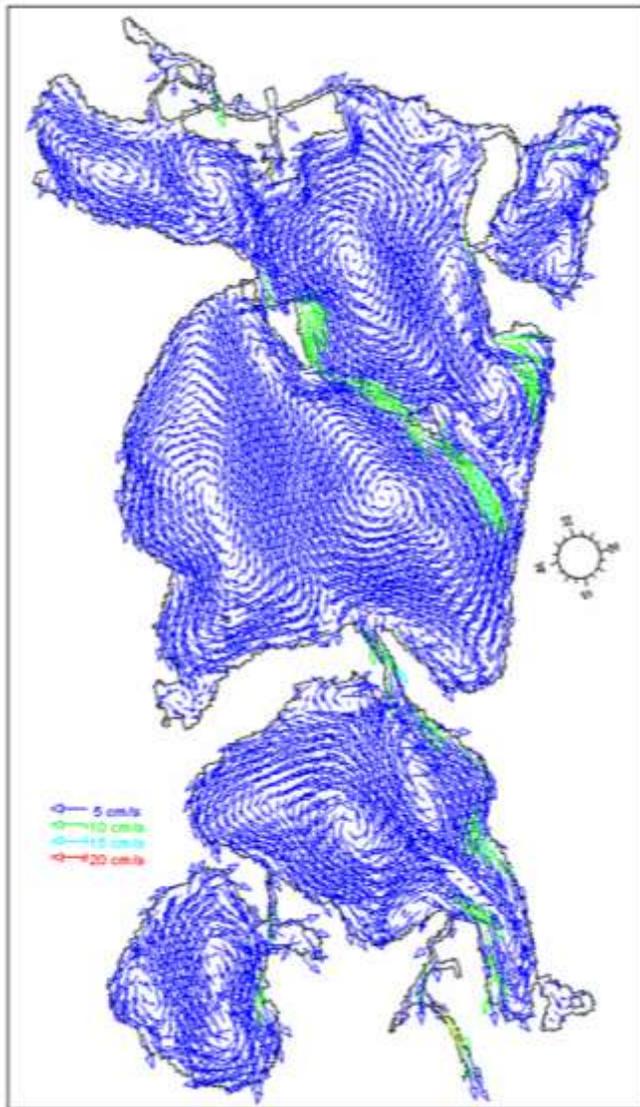


Figura 9.10 Circulación inducida por un viento soplando de norte a sur con una velocidad de 5 m/s.

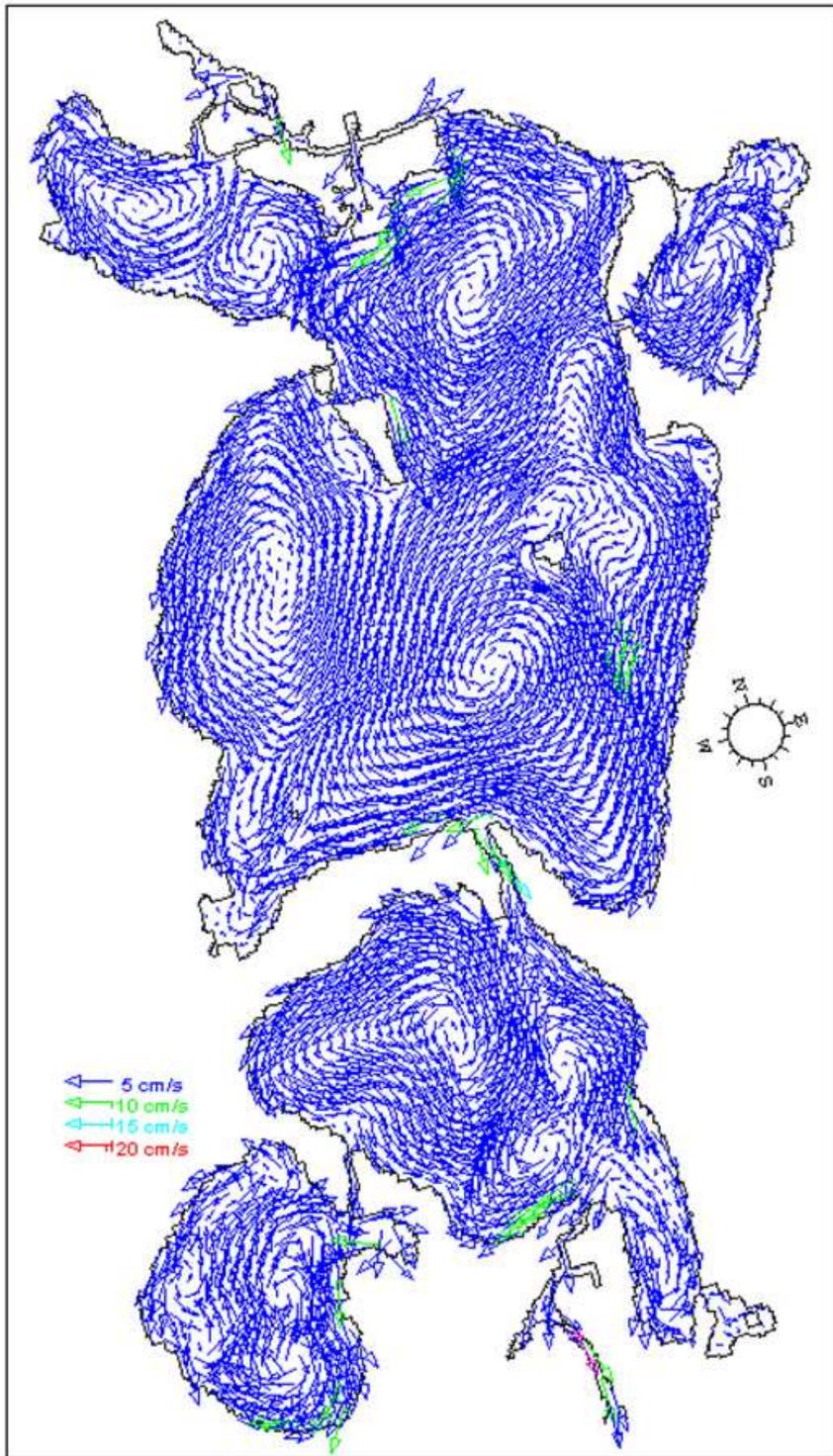


Figura 9.11 Circulación inducida por un viento soplando de noreste hacia el suroeste con una velocidad de 5 m/s.

Dependiendo de la estación del año y de la situación sinóptica meteorológica a un tiempo determinado, el viento puede fluir desde diferentes direcciones. Cuando se hacen los promedios, resulta que el viento dominante sopla del noreste hacia el suroeste. Por este motivo, hemos realizado un experimento con vientos soplando del noreste en dirección suroeste. El resultado de esta modelación se muestra en la figura 9.11. En general, los giros resultantes son similares a los que fueron obtenidos en la simulación con un viento del norte. Igualmente, el sentido de los giros o remolinos es el mismo. Sin embargo, podemos observar que a la salida de la boca sur que comunica a la laguna Bojórquez con Nichupté, la circulación se hace definitivamente hacia el sur, desapareciendo la ligera corriente hacia el norte que apareció en el cálculo con viento soplando del norte. En otras palabras, la circulación en la laguna de Nichupté parece ser muy sensible a la dirección con que sopla el viento, pues los patrones de circulación cambian significativamente. Se observa también que la circulación cambia en la laguna Bojórquez y en la laguna del Inglés. Es interesante mencionar adicionalmente que la intensidad de las corrientes sobre los bajos disminuye claramente. Esto se puede observar por el hecho de que hay menos zonas verdes en la simulación numérica con un viento soplando del noreste hacia el suroeste. En la figura 9.11 se puede observar que la circulación en esta situación favorece el flujo hacia los canales que conducen a la zona de intercambio con el mar en la parte norte, es decir, en la boca Cancún. Finalmente, es conveniente comentar que la circulación resultante por viento proveniente del norte, noreste y noroeste genera en cada cuerpo de agua del sistema lagunar dos giros o remolinos. La Posición del centro de los giros varía ligeramente con la dirección del viento. Este fenómeno es bien conocido en

cuencas cerradas y semi-cerradas. Esto se puede ver en las simulaciones para vientos del noroeste y del oeste mostradas en las figuras 9.12 y 9.13. En general, un criterio para entender la circulación resultante por un viento de una determinada dirección, es considerar que el flujo de agua será predominantemente en la dirección del viento en las zonas más someras de los cuerpos de agua, y un refluo, contrario a la dirección del viento, en las partes más profundas. El análisis de la circulación resultante en todos los casos presentados aquí, revela que este criterio se cumple ampliamente. Por ejemplo, en la figura 9.12 se puede observar que el giro con circulación ciclónica (contrario a las manecillas del reloj), ubicado en la parte norte de Nichupté y que aparece en los cálculos con vientos provenientes del norte y noreste, cambia a un giro con circulación anticiclónica (en el sentido de las manecillas del reloj) con un viento del noroeste. Este cambio en el sentido de rotación del giro, para un cambio de dirección del viento de 45°, refleja perfectamente lo sensible que pueden ser los sentidos de rotación de los giros a la dirección del viento. Estos cambios en la dirección de la circulación en los giros tiene indudablemente consecuencias en la capacidad de intercambio de aguas entre los cuerpos de agua que componen el sistema lagunar y finalmente entre el sistema lagunar y el mar abierto. Puesto que el intercambio de aguas está íntimamente relacionado al transporte de materiales y sustancias, la circulación inducida por el viento debe estar estrechamente relacionada a la capacidad de exportar sustancias contaminantes de un cuerpo de agua a otro o del sistema lagunar al mar abierto. Además, puesto que el viento en determinadas estaciones del año fluye predominantemente, o en promedio, de una dirección, es lógico suponer que ciertas estaciones del año favorecerán la eliminación de sustancias contaminantes del

sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez. Este resultado es muy importante en la capacidad del sistema de renovarse y de que los tiempos de residencias varían de una estación a otra. La rosa de vientos, mostrada en la Figura 3.10, indica que hay vientos prácticamente de todas las direcciones, con vientos dominantes provenientes del noreste (vientos alisios). Este hecho justifica todos los experimentos con diferentes direcciones de viento descritos aquí.

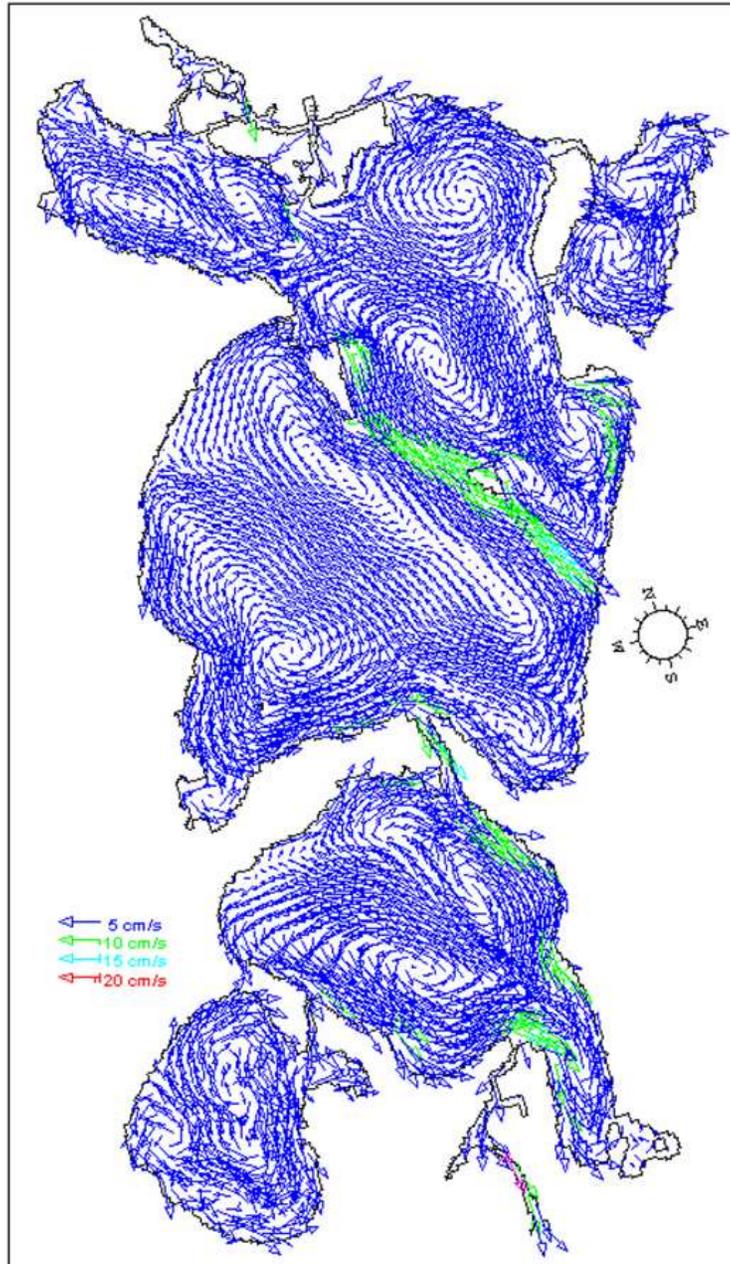


Figura 9.12 Circulación inducida por un viento soplando de noroeste hacia el sureste con una velocidad de 5 m/s.

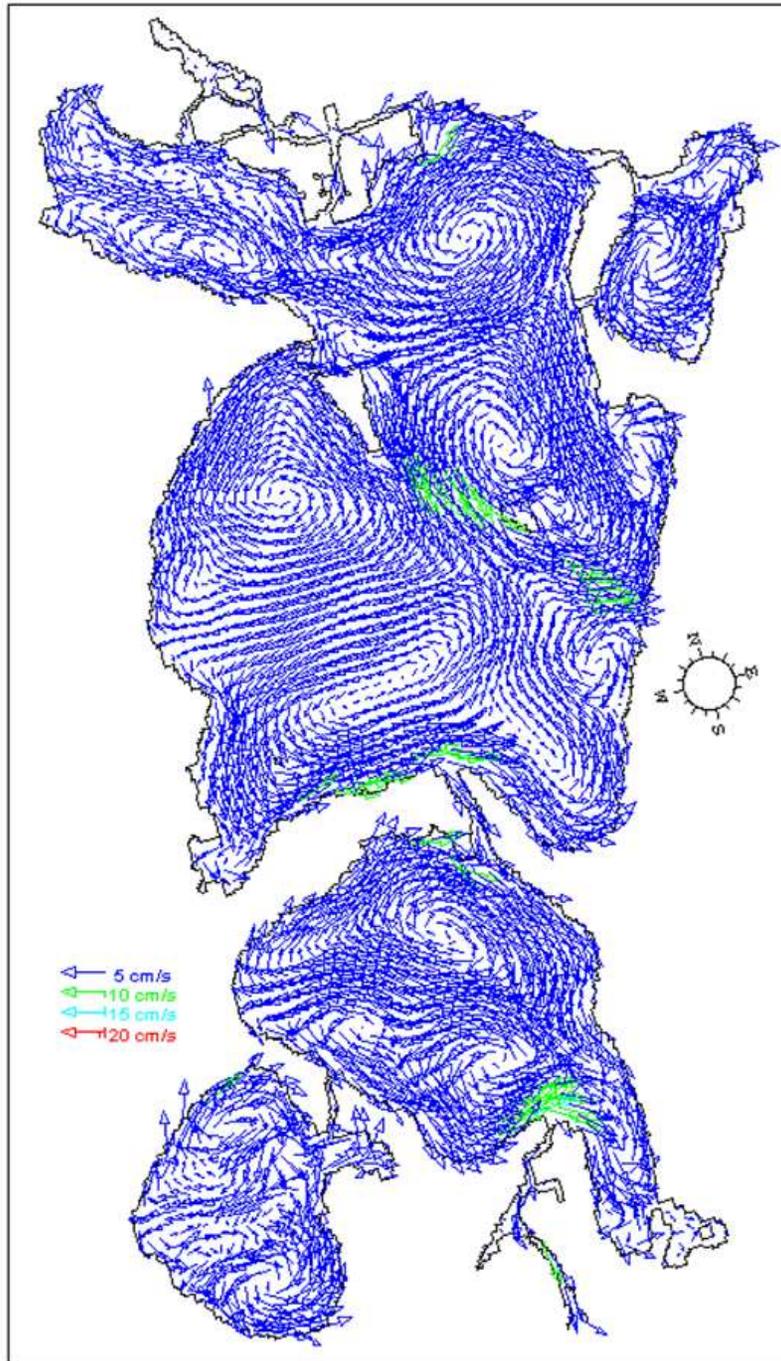


Figura 9.13 Circulación inducida por un viento soplando del oeste hacia el este con una velocidad de 5 m/s.

Referencias

Carbajal N., 1993. Modelling of the circulation in the Gulf of California. Berichte aus dem Zentrum für Klima- und Meeresforschung. Reihe B: Ozeanographie, Nr. 3.

Carbajal N. Backhaus J.O. "Simulation of tides, residual flow and energy budget in the Gulf of California. ". *Oceanologica Acta.*. 1998 ;**21** :429-446

Carbajal N., I. D. Núñez-Riboni "Dispersión de contaminantes pasivos en el complejo lagunar de Altata-Ensenada del Pabellón, Sinaloa". *Reportes del IPICYT.* 2002 ;1(1) :23-38

Escobar J, 2002. La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Serie Recursos Naturales e Infraestructura 50, CEPAL, Naciones Unidas.

González A. M. Merino y S. Czitrom, 1992. Laguna Bojórquez, Cancún: Un sistema de Características Marinas Controlado por la Atmósfera. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

Jordan E., R. de la Torre, M. Argot, 1997. Prospección Biológica de la Laguna de Nichupté, Cancún, Q. R., México: Nota Científica, Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología.

León L. Felipe 1993 Proyecto lagunar Nichupté. Reporte del Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua. Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos, Subcoordinación de Hidráulica.

Merino M., S. Czitrom, E. Jordan, E. Martin, P. Thomé and O. Moreno, 1990. Hydrology and Rain Flushing of the Nichupté Lagoon System, Cancún, Mexico. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences*, 30, 223-237.

Montaño Ley Yovani. "Long term effects of the bed-load sediment on the sea bottom morphodynamics of the Colorado River Delta, Mexico". *Universidad de Lieja, Bélgica.*, 2003.

Obeso-Nieblas M., Gaviño Rodríguez J.H., Jimenez Illescas A. R.,(1999) Modelación de la marea en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas, B.C.S., México, *Oceánides*, Vol.14(2) ,pp 79-88, ISSN-0186-5102.

Obeso Nieblas M., J.H. Gaviño Rodríguez, A. R. Jiménez Illescas, B. Shirasago Germán, (2002) Simulación numérica de la circulación por marea y viento del noroeste y sur en la Bahía de La Paz, B.C.S., *Oceánides*, Vol.17(1), pp. 01-12, ISSN-0186-5102.

Ochoa J., Candela J. Sheinbaum J., Ageostrophic fluctuations in Cozumel Channel. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, C02004, doi: 10.1029/2004JC002408, 2005.

Villan V. P. Nichupté una Cloaca. Novedades de Quintana Roo, 21 de Mayo de 2001.
CSI, UNESCO.

Pond S. and G. L. Pickard (1978) Introductory dynamic oceanography. Pergamon
Press, 241 pp.

CAPÍTULO 10

Transporte de contaminantes y sedimentos

Una vez que se ha hecho un estudio exhaustivo de la distribución de nutrientes, contaminantes y metales pesados y se conoce la hidrodinámica del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez, el siguiente objetivo es investigar los procesos de dispersión de sustancias, consideradas como si fueran pasivas. Los experimentos que realizamos fueron para el transporte de sustancias pasivas por circulación inducida por el viento. El modelo matemático en el cual se basa el proceso de dispersión de contaminantes puede ser planteado de dos formas. Ya sea aplicando al ecuación de advección-difusión directamente a una sustancia química pasiva de concentración C . Esta ecuación de advección-difusión para procesos turbulentos está dada en su forma general por

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (10.1)$$

Donde u, v, w son las componentes del vector velocidad \mathbf{v} en las direcciones x, y, z .

K_H y K_V son los coeficientes de difusión turbulenta en la horizontal y en la vertical.

En el caso de que K_H y K_V son constantes la ecuación (1) se reduce a

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = K_H \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + K_V \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (10.2)$$

Puesto que los procesos de difusión y advección ocurren en un sistema lagunar bastante somero, puede afirmarse con bastante certeza que la dispersión de contaminantes ocurre como un proceso en la horizontal, es decir, bidimensionalmente. De este modo la ecuación (10.2) se reduce a

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = K_H \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (10.3)$$

En esta ecuación distinguimos en primer lugar el término de cambio local de concentración $\frac{\partial C}{\partial t}$, los términos advectivos

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y}$$

y el término difusivo $K_H \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)$. Normalmente, para un sistema complejo, esta ecuación es resuelta numéricamente. Hay muchos algoritmos matemáticos para aproximar numéricamente esta ecuación para describir el proceso advectivo-difusivo. Sin embargo, es conocido que la aproximación numérica de los términos advectivos es un problema. Una alternativa a este procedimiento de solución es considerar el movimiento lagrangiano de partículas, cuyo número es proporcional a la concentración de la sustancia química pasiva. Básicamente, el procedimiento es el siguiente: se supone que la velocidad con la que se mueve una partícula es la suma de una velocidad advectiva y una velocidad difusiva. Esta última componente de la velocidad difusiva es por lo general de uno a varios órdenes de magnitud más pequeña que la

velocidad advectiva. De este modo, la velocidad \mathbf{V} de la partícula, es la suma de la velocidad de advección \mathbf{v} y la velocidad difusiva \mathbf{v}' . La velocidad de advección $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ es calculada con el modelo numérico descrito en el capítulo 9.

$$\mathbf{V} = \mathbf{v} + \mathbf{v}' \quad (10.4)$$

La velocidad difusiva es estimada aplicando un generador de números aleatorios normados de tal modo que los valores caigan en un cierto rango deseado. El rango de los valores de la velocidad difusiva es proporcional al coeficiente de difusión turbulenta K_H . Este modo de tratar la ecuación (10.1), o bien la ecuación (10.3), es denominado Método de Montecarlo. La descripción del método ha sido dada en detalle por Maier-Reimer (1973) quien lo aplicó al Mar del Norte y ha sido aplicado también con éxito a otras lagunas costeras (Núñez-Riboni, 2000; Carbajal y Núñez-Riboni, 2002). En la Figura 10.1 (a,b,c,d,e,f) se muestra la dispersión de partículas bajo la acción de un viento soplando del noroeste con una velocidad de 5 m/s. La fuente de partículas estuvo ubicada dentro de la laguna Bojórquez. La Figura 10.1 a muestra el estado de dispersión después de 1 día de simulación. Las partículas han comenzado a recircular alrededor de Bojórquez, pero sin que ninguna partícula logre salir hacia Nichupté. De la serie de gráficas se infiere que con un viento del noroeste la laguna Bojórquez no es eficiente en exportar sustancias pasivas hacia Nichupté. Este viento del noroeste no contribuye a reducir el tiempo de residencia de partículas en Bojórquez. Afortunadamente, de la rosa de vientos, mostrada en la Figura 3.10, estos vientos no son dominantes sobre el sistema lagunar.

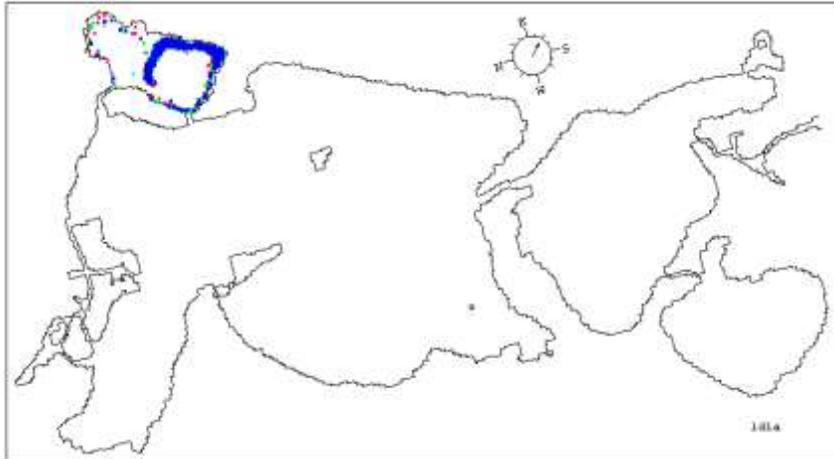


Figura 10.1 a Dispersión de partículas desde la laguna Bojórquez con viento del noroeste.

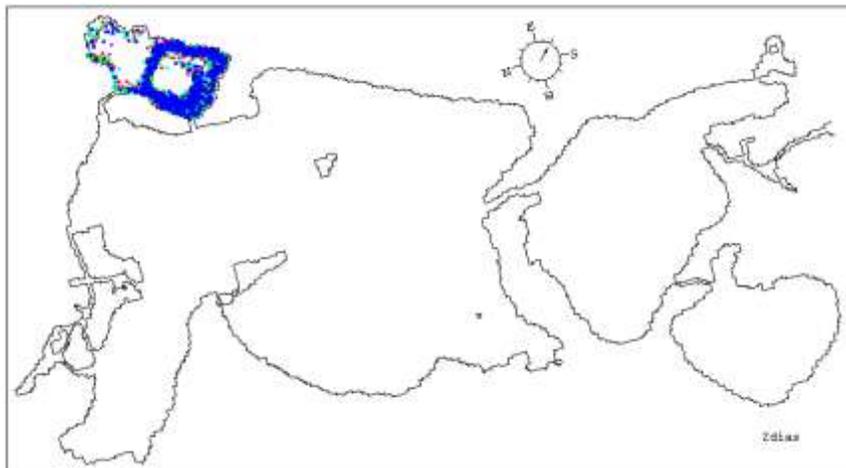


Figura 10.1 b. Situación después de 2 días.

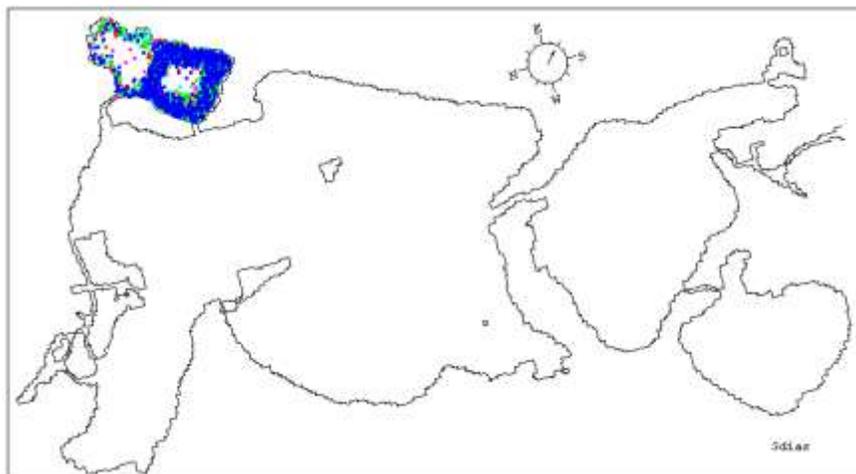


Figura 10.1 c. Situación después de 3 días.



Figura 10.1 d. Situación después de 8 días.

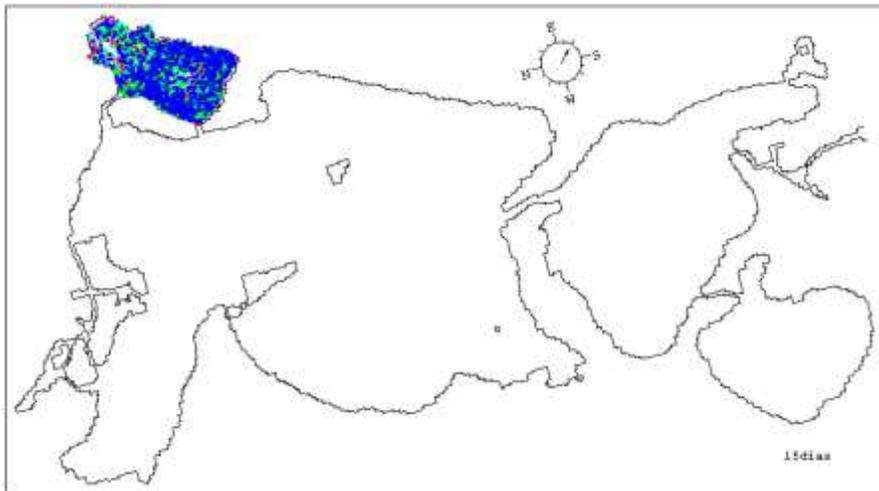


Figura 10.1 e. Situación después de 15 días.

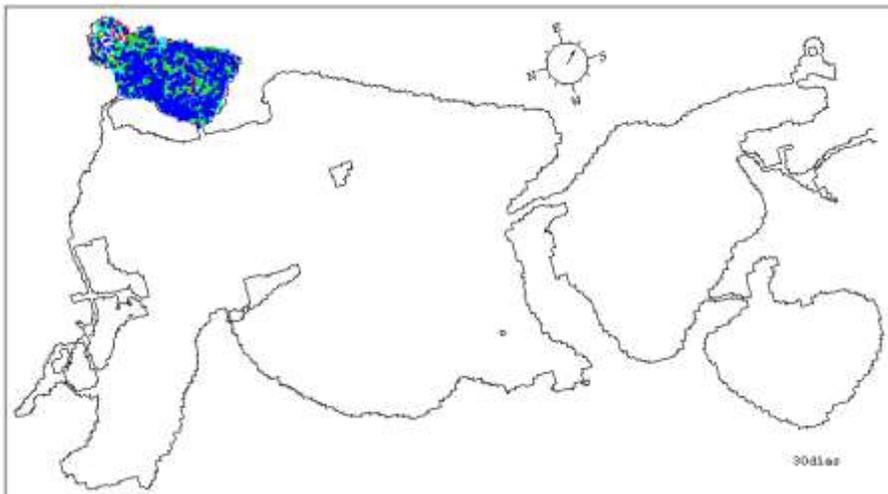


Figura 10.1 f. Situación después de 30 días.

En la serie de gráficas mostradas en la Figura 10.2 (a,b,c,d,e,f), se describe el proceso de dispersión de partículas desde la laguna Bojórquez con un viento proveniente del noreste. En comparación al experimento anterior, en el cual un viento del noroeste fue incapaz de dispersar las partículas desde Bojórquez, este viento del noreste es bastante efectivo en exportar partículas hacia Nichupté, incluso hacia la parte más al sur del sistema lagunar. A partir de las Figuras 10.2 (c,d,e,f), se puede constatar que el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez exporta a través de la boca Punta Nizuc partículas hacia el mar abierto. Este es un resultado muy importante pues el viento del noreste es dominante según la rosa de viento mostrada en la Figura 3.10, además la laguna Bojórquez es el cuerpo de agua más contaminado. Este transporte de partículas hacia el sur puede explicar las relativamente altas concentraciones de nutrientes, surfactantes y metales pesados observadas en la parte sur del sistema lagunar. Se puede observar en la Figura 10.2 f, que después de 45 días, prácticamente todas las partículas puestas en la laguna Bojórquez han sido exportadas hacia Nichupté. Este resultado quiere decir que en la estación, en la que los vientos alisios provenientes del noreste, son más intensos el sistema lagunar debe ser capaz de reducir substancialmente el tiempo de residencia de sustancias químicas pasivas vertidas a la laguna Bojórquez. Es, además, interesante mencionar que por la boca Cancún, más cercana a Bojórquez, no hay manera de que con estos vientos logren salir partículas al mar abierto.

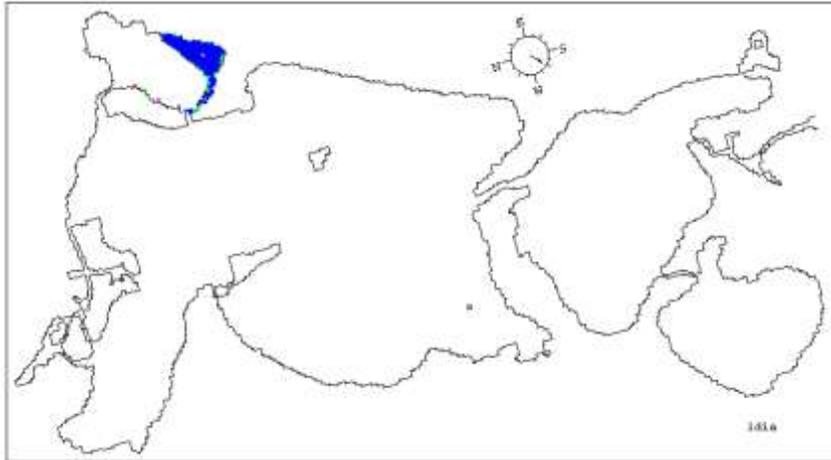


Figura 10.2 a Dispersión de partículas desde Bojórquez con un viento del noreste.

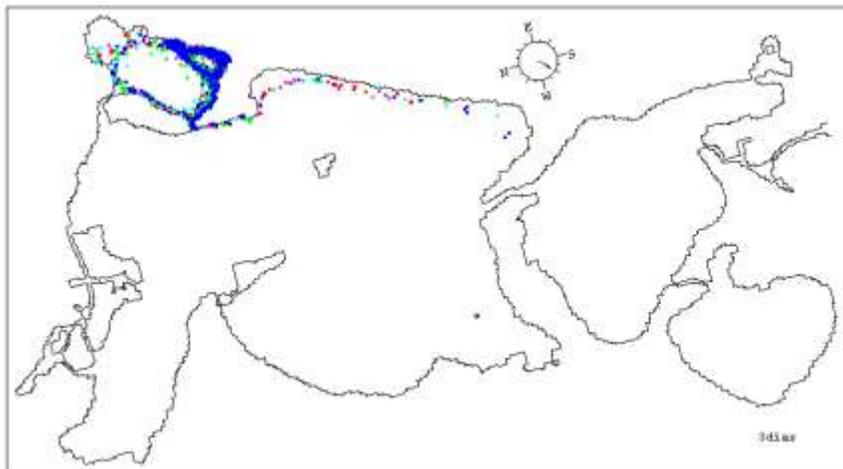


Figura 10.2 b. Dispersión después de 3 días.

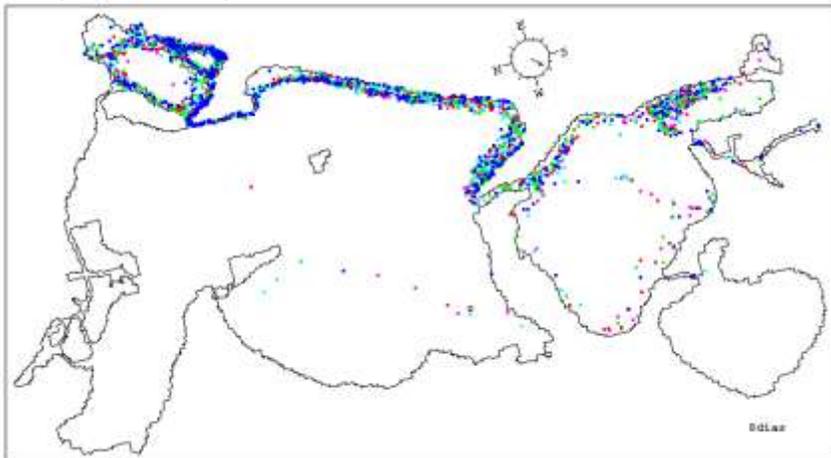


Figura 10.2 c. Dispersión después de 8 días.

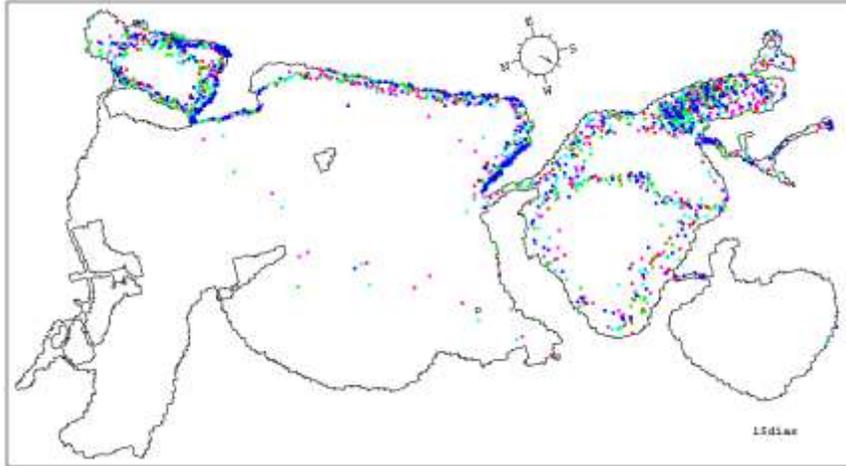


Figura 10.2 d. Dispersión después de 15 días.

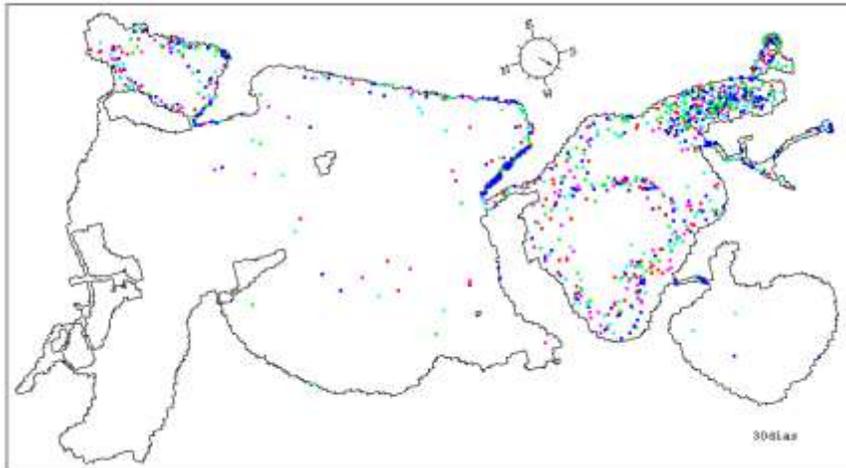


Figura 10.2 e. Dispersión después de 30 días.

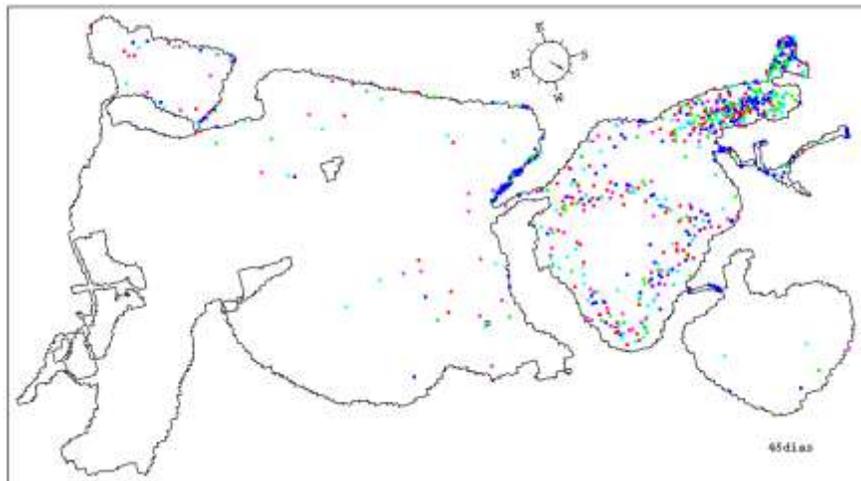


Figura 10.2 f. Dispersión después de 45 días.

Las intensas mediciones de nutrientes, contaminantes, salinidad y metales pesados indican que en la parte noroeste de la laguna Nichupté es una fuente importante de todas estas sustancias químicas. En los estudios batimétricos a gran detalle que se efectuaron en todo el sistema lagunar, se identificaron varios manantiales en esa parte de Nichupté. La inspección de estos manantiales mostró que la cantidad de agua fluyendo es importante y por la turbidez y gran cantidad de nutrientes se infiere que esta agua deben provenir, al menos en parte, de la ciudad de Cancún. El mecanismo de como el agua dulce de lluvia infiltrada en el subsuelo se mezcla con aguas residuales de la ciudad de Cancún y con el agua de mar se desconoce aún. Pero es importante señalar que de nuestras observaciones se infiere este proceso. Por este motivo se realizó un experimento de modelación numérica de dispersión de partículas desde la parte noroeste de Nichupté con un viento actuando desde el noreste. Este viento es muy común como se observa en la rosa de vientos mostrada en la Figura 3.10. De la serie de gráficas mostradas en la Figura 10.3 (a,b,c,d,e,f), se puede observar que el transporte de partículas ocurre principalmente hacia el este. En la Figura 9.11, se muestra la circulación con un viento proveniente del noreste. En ella se puede ver que en la zona donde están las fuentes de partículas hay una fuerte circulación hacia el este, esto explica la dispersión de las partículas en esa dirección. Después de 8 días, la serie de remolinos inducidos por el viento logran transportar las partículas a prácticamente todo el sistema lagunar. Finalmente, después de 45 días, las partículas esta homogéneamente distribuidas en todo el sistema lagunar.

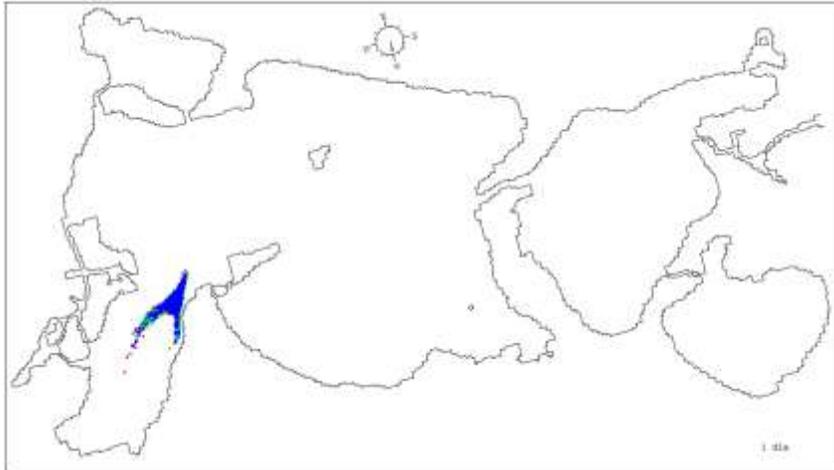


Figura 10.3 a. Dispersión de partículas desde Nichupté con un viento del este.

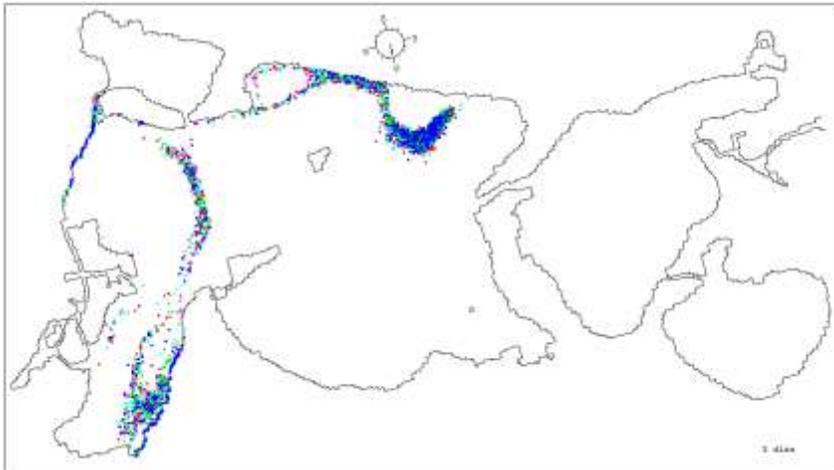


Figura 10.3 b. Dispersión después de 3 días.

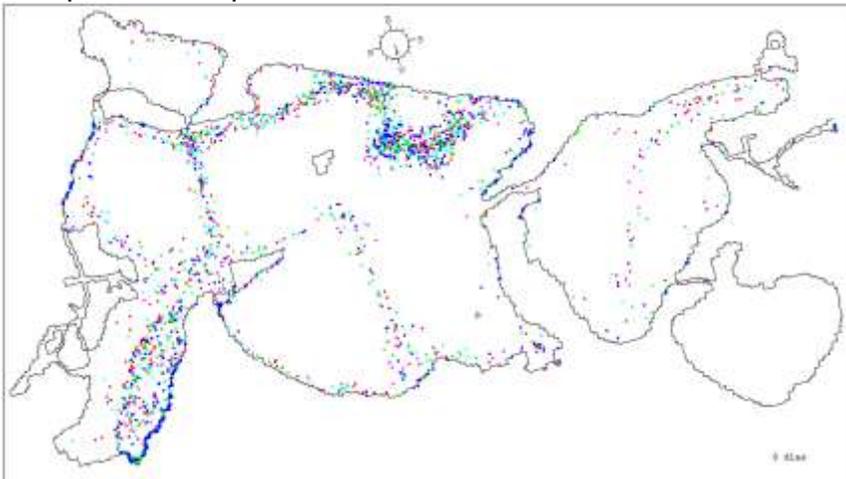


Figura 10.3 c. Dispersión después de 8 días.

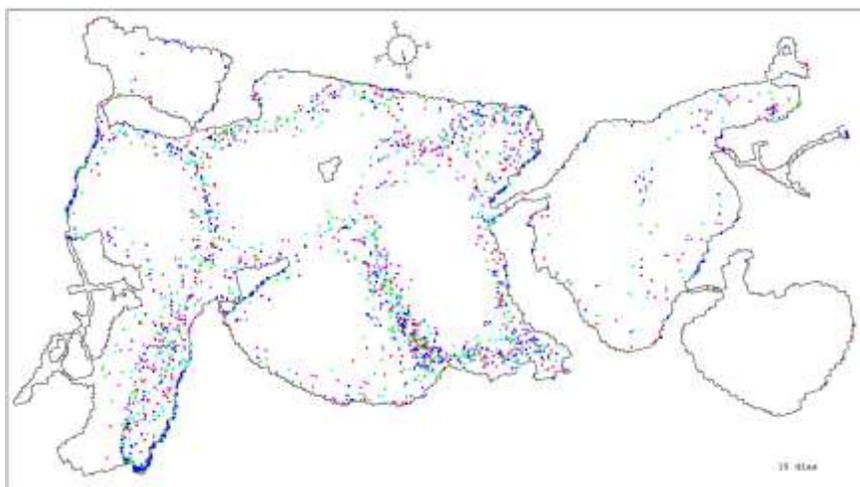


Figura 10.3 d. Dispersión después de 15 días.

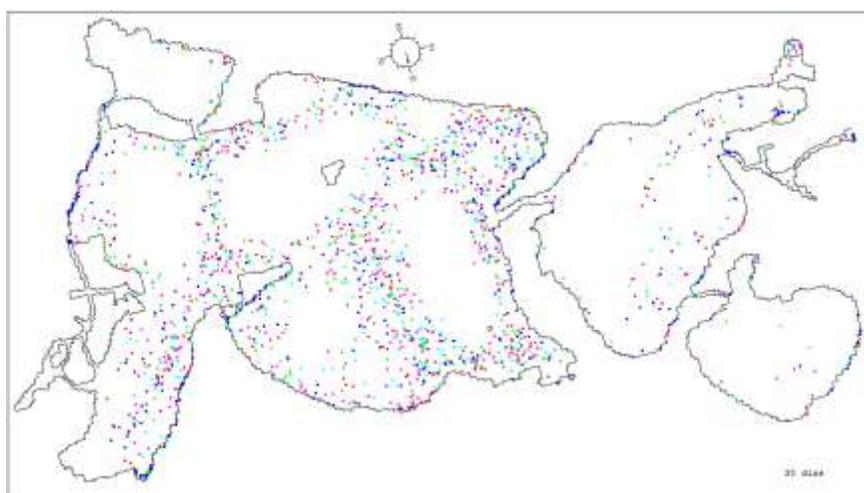


Figura 10.3 e. Dispersión después de 30 días.

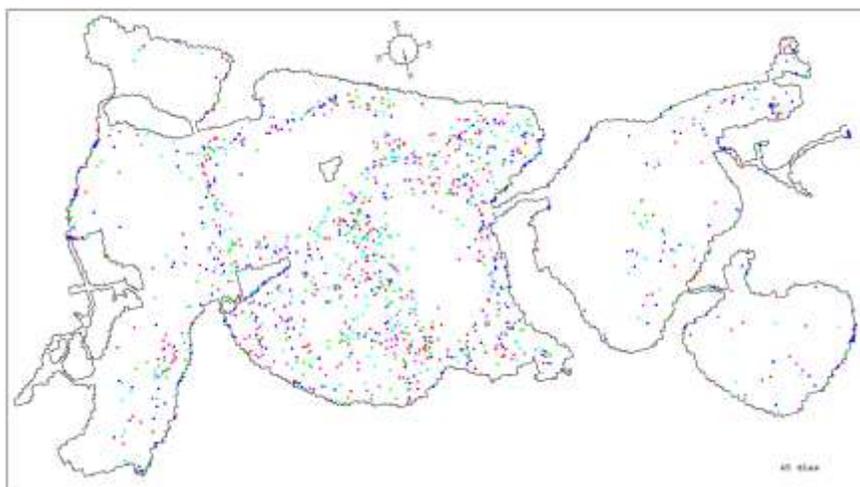


Figura 10.3 f. Dispersión después de 45 días.

Se ha discutido a detalle la acción del viento soplando desde diferentes direcciones sobre la dispersión de sustancias pasivas en el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez. Hemos encontrado que los vientos provenientes del noreste y este son bastante efectivos en dispersar los contaminantes cuyas fuentes estuvieron ubicadas en la laguna Bojórquez y en la parte noroeste del Nichupté. Se escogieron estas dos posiciones para las fuentes, basados en que las concentraciones de contaminantes mostraron ser bastante altas en esas zonas. Es importante mencionar que no se presentaron modelaciones numéricas sobre la dispersión de contaminantes causadas por la circulación inducida por las mareas. Las mareas son un proceso fundamentalmente oscilatorio, es decir, los contaminantes son desplazados con el flujo en una dirección y traídos de regreso con el refluo a casi la misma posición que tenían originalmente. Después de un ciclo de mareas, semidiurno de aproximadamente 12 horas o diurno de alrededor de 24 horas, el contaminante prácticamente se ha desplazado muy poco. En otras palabras, los flujos oscilatorios no son muy efectivos, por lo general, en dispersar contaminantes. Sin embargo, es conveniente mencionar que existen corrientes de mareas residuales que son el resultado neto después de un ciclo de la constituyente de marea considerada. En el caso del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez, el viento es definitivamente el responsable de la dispersión de contaminantes.

Transporte de sedimentos

En esta sección mostramos como fue calculado el transporte de sedimentos como carga de fondo en sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez. Aunque ya hemos

mostrado en el capítulo 9 el modelo numérico aplicado en la simulación de la hidrodinámica del sistema lagunar, creemos conveniente volver a escribir las ecuaciones para explicar el proceso de transporte de sedimentos como carga de fondo. En primer tenemos las ecuaciones de movimiento verticalmente integradas, son bidimensionales, no lineales y que son resueltas numéricamente en forma implícita. Esta metodología ha sido aplicada con éxito en varios cuerpos marinos como el Delta del Río Colorado (Montaño, 2003; Montaño y Carbajal, 2007), en la parte norte del Golfo de California (HernándezAzcúnaga, 2006).

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{H+\zeta} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{H+\zeta} \frac{\partial U}{\partial y} - fV = \\ -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial U}{\partial y} \right) - r \frac{U}{H+\zeta} \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned} \quad (10.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{H+\zeta} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H+\zeta} \frac{\partial V}{\partial y} + fU = \\ -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial V}{\partial y} \right) - r \frac{V}{H+\zeta} \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned} \quad (10.6)$$

Tenemos también la ecuación de continuidad que representa a la ley de conservación de masa.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (10.7)$$

También es necesaria una ecuación de conservación de sedimento (van Rijn, 1993).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = 0 \quad (10.8)$$

Donde

$$\mathbf{S} = \alpha \frac{|\mathbf{v}|^b}{u_c^b} \left(\frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} - k_* \nabla H \right) \quad (10.9)$$

Es el vector de flujo volumétrico ($m^2 s^{-1}$, metros cúbicos de sedimento por anchura de fondo marino por segundo). En estas ecuaciones, U y V, dados en $m^2 s^{-1}$, son los transportes en las direcciones (x,y). Las demás variables que aparecen en las ecuaciones (10.5, 10.6, 10.7) ya han sido descritas en el capítulo 9. En la ecuación (10.8), H es la profundidad y S el vector de flujo volumétrico. En la ecuación 10.9, $\alpha = 10^{-6}$ es una función local de las propiedades del fluido, b= 3.0 es la potencia del transporte, k^* es un coeficiente que corrige por la pendiente del fondo marino y u_c es la velocidad crítica a la cual el transporte de sedimentos como carga de fondo comienza, es decir, si $|\mathbf{v}| \leq u_c$ no hay transporte de sedimentos.

La marea es dada en las dos bocas, cancún y Punta Nizuc, por una ecuación de la forma

$$\zeta_{x,y,t} = A \cos \omega t - \Phi \quad (6)$$

Donde ω es la frecuencia angular de la constituyente de marea lunar principal M_2 .

En esencia, el procedimiento es que las componentes de velocidad horizontal son calculadas con las ecuaciones de la hidrodinámica (10.5, 10.6, 10.7) en cada paso de tiempo y aplicadas en la ecuación (10.9) y posteriormente en la (10.8). De este modo, el transporte de sedimentos como carga de fondo ocurre en cada paso de tiempo. Como se puede observar en las ecuaciones (10.8) y (10.9), el proceso de transporte de sedimentos como carga de fondo es altamente no lineal.

Efectuamos varios experimentos sobre el transporte de sedimentos como carga de fondo, en todos ellos el transporte de sedimentos por el viento resultó bastante pequeño. Esto indica que el viento, que normalmente sopla sobre el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez, no alcanza a producir las velocidades necesarias para superar a la velocidad crítica de 0.3 m/s, necesaria para iniciar el transporte. Por este motivo efectuamos experimentos con mareas y encontramos algunos procesos muy interesantes. En la Figura 10.4, se muestra el transporte de sedimentos como carga de fondo causado por la marea lunar principal. Se puede ver que hay un intercambio de sedimentos únicamente por la boca Cancún. El sedimento se propaga a lo largo de los canales, hacia el oeste, hacia el este y el principal hacia el cuerpo de la laguna de Nichupté. Se puede ver que únicamente en estas zonas la velocidad crítica es superada, por lo que no ocurre en otras áreas el transporte de sedimentos. En la parte sur, en el canal que conduce a Punta Nizuc, hay también un ligero transporte de sedimentos. Estos resultados indican que hay un intercambio de sedimentos entre la costa y el sistema lagunar. Esto ocurre, porque a lo largo de la costa ocurre lo que se llama el transporte de litoral de arena o sedimentos. Cuando llega a aperturas hacia

cuerpos de agua como las lagunas costeras, ocurre la interacción y el sedimento puede entrar a las lagunas. El transporte de sedimentos como carga de fondo es un proceso muy lento y ocurre en escalas de años (Carbajal et al., 2005). La distribución mostrada en la Figura 10.4, es después de un año de simulación.

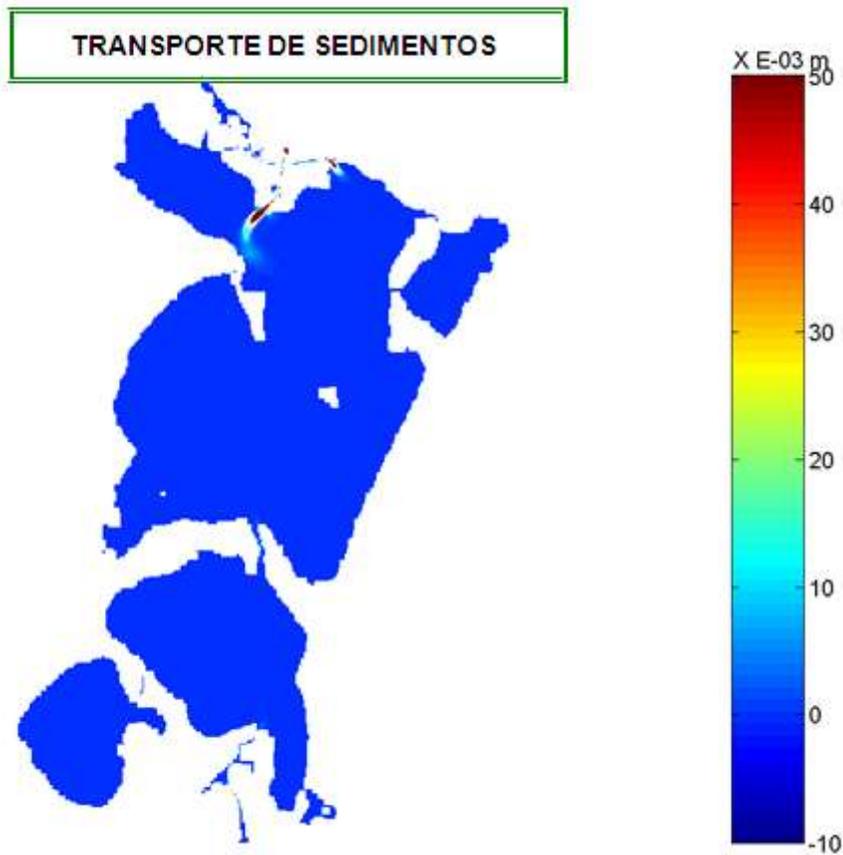
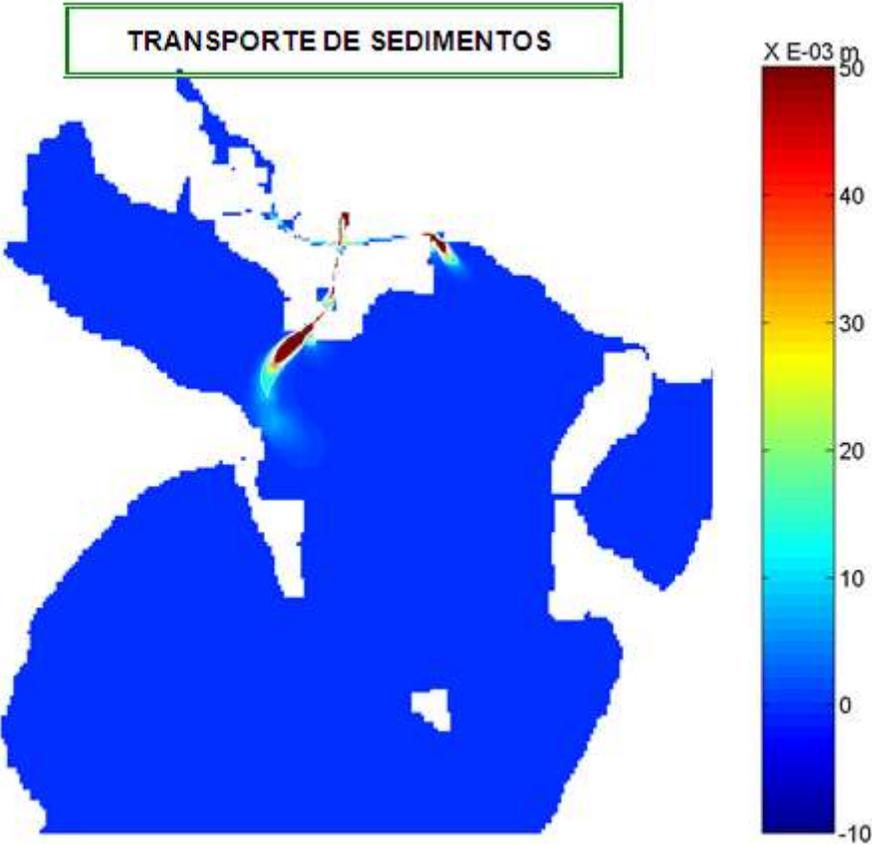


Figura 10.4. Transporte de sedimentos después de un año de simulación.

Con el propósito de observar mejor el transporte de sedimentos como carga de fondo, mostramos en la Figura 10.5 una ampliación de la zona de Nichupté donde ocurre el transporte de sedimentos. En ella se puede ver que el transporte al final del canal principal tiende a girar hacia el este en la dirección a los bajos que han sido descritos

en el capítulo 3, concretamente en la Figura 3.2. Estos cálculos muestran que muy probablemente este fue el mecanismo por el cual se formaron los bajos en esa parte de Nichupté e incluso en otras áreas.



Referencias

Carbajal N., I. D. Núñez-Riboni (2002) Dispersión de contaminantes pasivos en el complejo lagunar de Altata-Ensenada del Pabellón, Sinaloa. *Reportes del IPICYT*. 2002 ;1(1) :23-38.

Carbajal N., Stephanie Piney, Jorge Gómez Rivera (2005) A numerical study on the influence of geometry on the formation of sandbanks". *OCEAN DYNAMICS* ;55 :559-568

Maier-Reimer E. (1973) Hydrodynamisch-numerische Untersuchungen zu horizontalen Ausbreitungen und Transportvorgänge in der Nordsee. Mitteilungen des Instituts für Meereskunde der Universität Hamburg. Nr. XXI.

Monataño Y. (2003) Long term effects of the bedload sediment transport on the seabottom morphodynamics of the Colorado River Delta. Tesis de doctorado, universidad de Lieja, Bélgica. 126 p.

Montaño Y., N. Carbajal (2008) Numerical experiments on the long term morphodynamics of the Colorado River Delta". *OCEAN DYNAMICS* ;58 :19-29

Núñez Riboni I. D. (2000) Dinámica y procesos dispersivos en el complejo lagunar bahía de Altata-Ensenada del Pabellón, Sinaloa. Tesis de Maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

CAPÍTULO 11

Evaluación fotográfica del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez

El turismo es el conjunto de relaciones y fenómenos producidos por el desplazamiento y la permanencia de personas fuera de su lugar de domicilio, en tanto dicha permanencia y desplazamiento no estén motivados por una actividad lucrativa. El turismo es la actividad de mayor expansión en el mundo. Según datos de la Organización Mundial de Turismo la magnitud e importancia económica se ha triplicado en los últimos 50 años y se prevé que volverá a triplicarse en los próximos 20 o 30 años. A nivel mundial, las llegadas de turistas internacionales en el 2004 alcanzaron los 763 millones de turistas. Durante este año se registro un crecimiento del 10.7% en relación con el año anterior, representando un ingreso de 623,000 millones de dólares.

De acuerdo a datos de la Secretaria de Turismo en el segundo cuatrimestre del 2005, ingresaron a México 7.5 millones de turistas internacionales que generaron una derrama económica de 3,895 millones de dólares. En total se captaron 8,401 millones de dólares en los primeros ocho meses del 2005. Esta cifra representa un aumento de 15.3% frente a los primeros ocho meses del 2004. Durante este periodo se crearon 34 mil 371 empleos, lo que da un total de 1, 850,567 empleos en todo el país.

Una administración adecuada de los centros turísticos puede contribuir considerablemente a la protección y el mejoramiento del patrimonio natural y cultural del destino. El turismo aumenta la generación de empleos, la inversión, y la construcción de infraestructura básica y eleva la calidad de vida de la comunidad receptora. Los prestadores de servicios turísticos deben mantener en condiciones ideales el medio ambiente donde el turista disfruta de sus vacaciones y días de descanso. Una inadecuada administración puede dañar el destino. Los empresarios y las diferentes instancias de gobierno deberían ser los primeros en interesarse por proteger su patrimonio natural ya que es el fundamento de sus empresas.

Al transformar sin control los destinos turísticos y queriendo satisfacer una creciente demanda de servicios e infraestructura, se han generado problemas de destrucción de ecosistemas, contaminación, disminución de la calidad del agua, extinción de especies, aculturación, migración, reducción de las actividades económicas tradicionales, crecimiento de la población, incremento en el consumo de agua y energía y un aumento de residuos y aguas negras. Es muy importante que durante la etapa de planeación de un nuevo proyecto turístico, se lleve a cabo una evaluación del impacto ambiental. La información resultante de esta evaluación debe permitir llegar a conclusiones sobre los efectos que pueda producir la instalación y el desarrollo del proyecto sobre el entorno, establecer medidas a implementar para mitigar y monitorear los impactos.

Los destinos turísticos ubicados en zonas costeras son mayormente vulnerables a los efectos del cambio climático. Las alteraciones de los fenómenos meteorológicos pueden repercutir en la programación de los viajes y en el bienestar y la salud de los turistas. Las tormentas tropicales y otros fenómenos meteorológicos extremos pueden dañar los atractivos naturales. El oleaje producido por tormentas tropicales y el aumento del nivel del mar pueden erosionar las playas y un aumento en la temperatura del mar podría blanquear los corales. Los sistemas de alerta temprana y preparación para tormentas tropicales y la mejor utilización de la información que proporcionan los servicios meteorológicos son medidas básicas que los prestadores de servicios turísticos pueden tomar para reducir los riesgos relacionados con los fenómenos climatológicos.

Finalmente, existen centros vacacionales donde la afluencia de turistas es muy masiva como en el puerto de Cancún, Quintana Roo. La cantidad de hoteles ubicados alrededor del complejo lagunar de Nichupté–Bojórquez, se ha incrementado considerablemente a la par del consumo de agua, aumento de aguas residuales, tráfico de yates, lanchas y otras embarcaciones y un daño a la flora y fauna marina de complejo, En este informe se presenta una evaluación fotográfica del complejo lagunar de Nichupte-Bojórquez en condiciones de antes y después del huracán Wilma. Los comentarios vertidos sobre el contenido de las fotos dan una idea de lo dañado que quedó este ecosistema y en general de su funcionamiento y características principales.

A continuación se presentan algunas características principales del complejo lagunar como la geografía, la batimetría (profundidad del agua) y de la distribución de contaminantes. En la figura 11.1 se muestra un mapa del complejo lagunar y de la ciudad de Cancún.

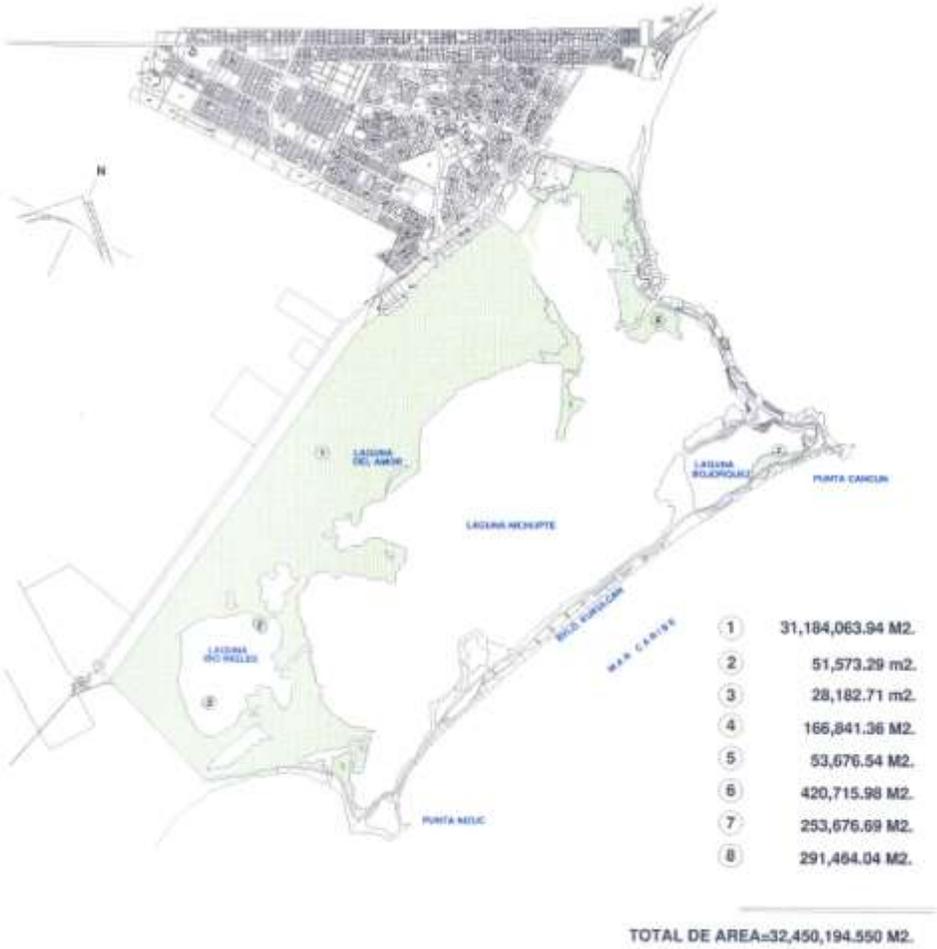


Figura 11.1 Geografía del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez.

Para el control del ecosistema, para evaluar las corrientes y el transporte de contaminantes y en general para estudiar la dinámica del sistema se requiere conocer la distribución de las profundidades. Estas se muestran en la figura 11.2.

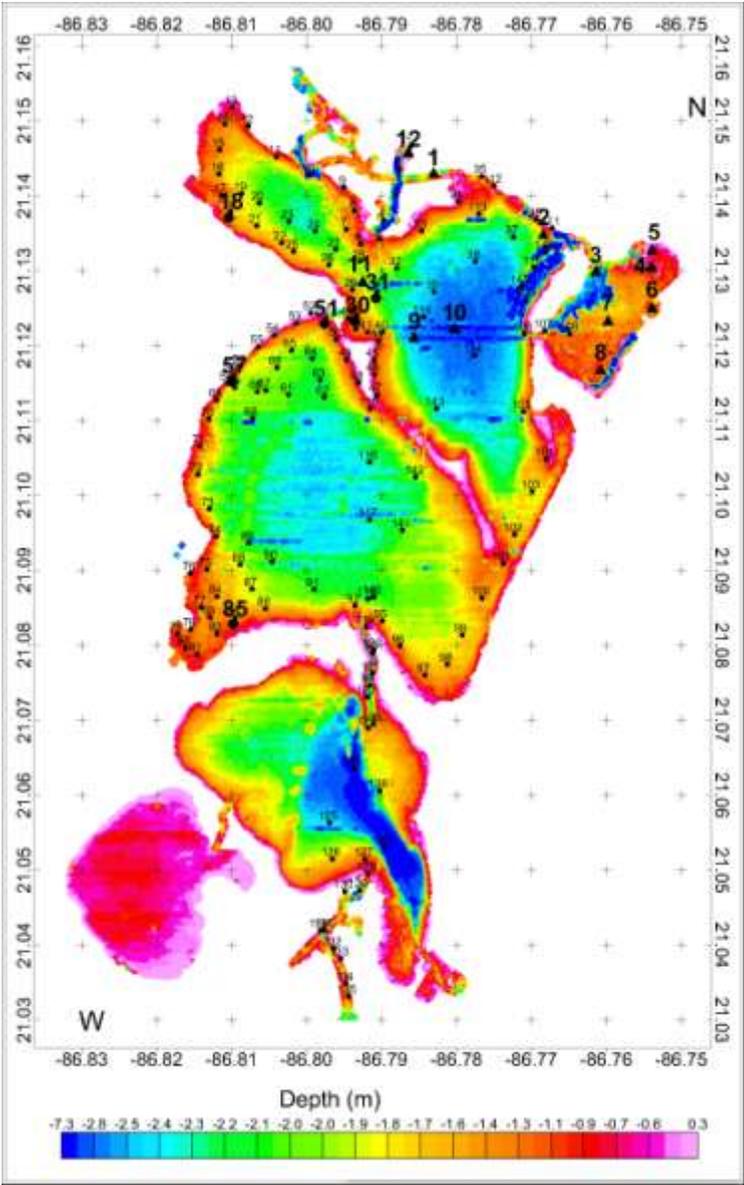


Figura 11.2 Distribución de profundidades en la laguna (batimetría) y la posición de las estaciones hidrográficas en la campaña de medición de septiembre de 2004.

Para hacer un diagnóstico sobre el grado de contaminación de los cuerpos de agua en los alrededores de importantes centros turísticos, se hacen muestreos de agua y un análisis químico. En la figura 11.3 y 11.4, se muestran las concentraciones de los nitritos y fosfatos los cuales son indicadores de aguas residuales. En este caso, los valores encontrados son altos y deben tomarse acciones para mejorar las condiciones del complejo lagunar.

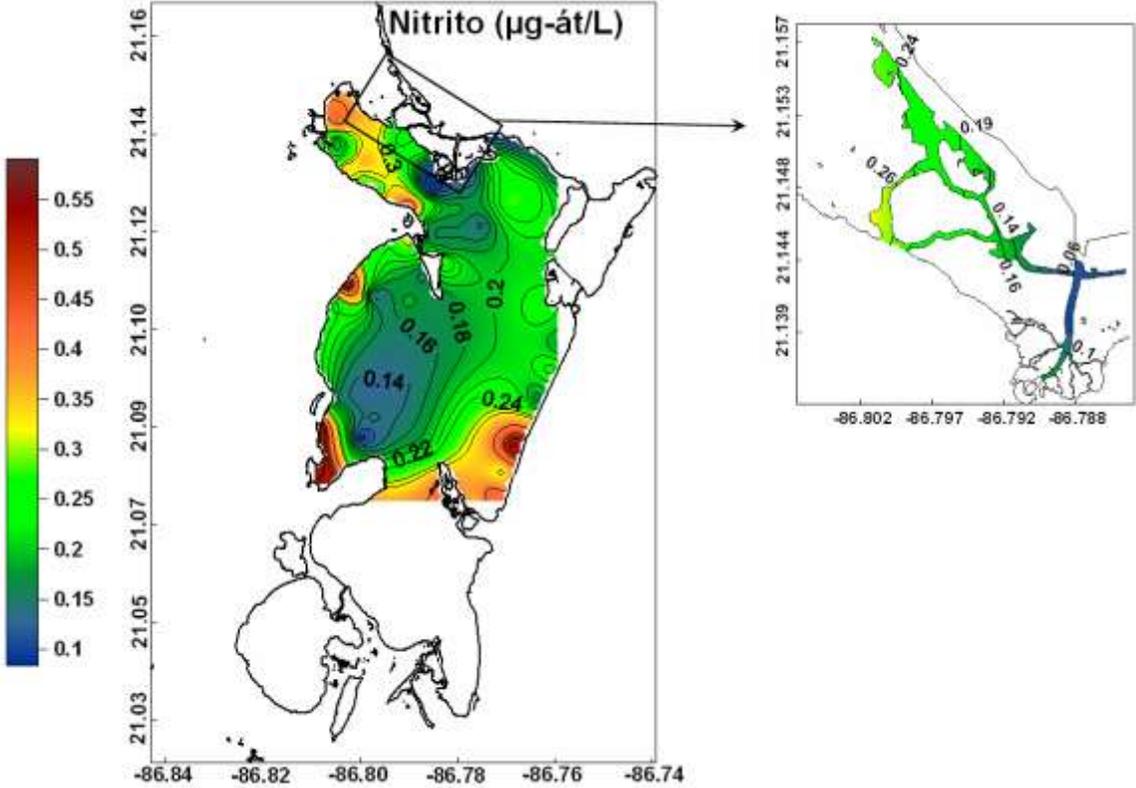


Figura 11.3 Distribución de nitritos los cuales son una indicación de contaminación.

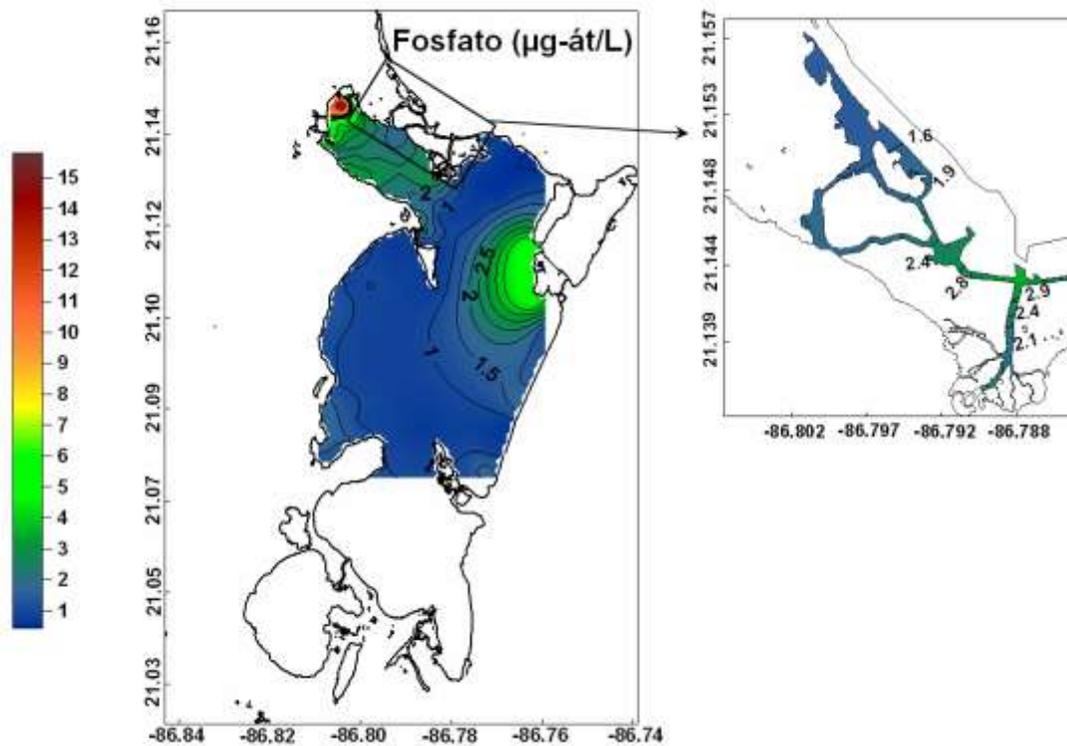


Figura 11.4 Distribución de fosfato el cual es una indicación de contaminación.

Procesos costeros

Los procesos costeros se refieren a los fenómenos naturales y acciones antropogénicas que impactan y afectan las zonas costeras. Debido a su importancia y complejidad los procesos costeros son investigados por diferentes ramas de la ciencia como: geología, física, meteorología, oceanografía, hidráulica, matemáticas y arquitectura entre otras. Los fenómenos sociales y económicos constituyen también una parte importante de los procesos costeros. El turismo, la pesca y navegación son beneficiarios de los procesos costeros.

El turismo es la tercera fuente generadora de divisas a nivel nacional. Tan solo Cancún cuenta con aproximadamente 27,750 habitaciones en 146 hoteles, que es el 10% de los cuartos de hotel de todo el país. Además recibe alrededor de 3,300,000 visitantes año, lo cual genera una derrama económica de cuatro mil millones de dólares anualmente. Debido a la creciente importancia del turismo en México, y a los beneficios económicos y sociales que genera en los diferentes centros turísticos, se destina una gran cantidad del presupuesto anual para mejorar la infraestructura de estos destinos con la finalidad de ser más atractivo para los turistas y de esta forma aumentar su afluencia. El problema es que los aspectos ambientales y sociales no están recibiendo por parte de las autoridades la atención necesaria para poder tener un crecimiento sustentable. Curiosamente, los principales factores por la que visitan nuestros centros turísticos son la biodiversidad, la calidad del agua, los recursos naturales y la diversidad cultural que existe en nuestro país, y resulta que son los aspectos que reciben menor atención y cuidado.

La población actual en Cancún es de más de 800,000 habitantes de los cuales más de 10,000 familias viven en asentamientos irregulares cuyas descargas de aguas negras van directamente al subsuelo por el uso de fosas sépticas o terminan en cuerpos de agua como cenotes. Esta falta de drenaje es una de las principales causas de la contaminación de los mantos acuíferos. La comisión de agua potable y alcantarillado tiene registrados un padrón de 113,400 usuarios, de los cuales un 84% cuenta con red de drenaje pero la mitad no esta conectada por razones económicas. Ya que los

costos de conectar la tubería del sanitario hasta la red de drenaje de la calle oscilan entre \$10,000 y \$15,000.

Antes de crear un centro turístico se deben de tomar en cuenta diferentes factores que pueden afectar la viabilidad del proyecto como pueden ser:

Procesos ambientales de tipo químico y tipo ecológico

Los ecosistemas marinos tienden a ser especialmente frágiles a la acción antropogénica. Los mangles, pastos marinos, corales y en general la flora y fauna son bastante sensibles a cambios en la composición química del agua. La construcción de hoteles, la correspondiente basura y aguas residuales generadas afectan directamente el equilibrio ecológico conduciendo a menudo a daño prácticamente irreversible del ecosistema. El daño del ecosistema reduce la belleza original del servicio turístico ofrecido.

Procesos hidrodinámicos (viento, oleaje, mareas, corrientes marinas)

Las olas son el principal modelador de las costas y pueden tener un efecto constructivo o destructivo. Cuando las olas son pequeñas tienden a mover poco sedimento, sobre todo muy cerca de la orilla, tendiendo a acumular la arena en la parte alta de la playa. Cuando las olas son mas altas pueden mover el sedimento más

profundo, y provocar una corriente hacia el mar, que progresivamente va erosionando la playa seca.

Fenómenos meteorológicos estacionales (huracanes, nortes, tormentas)

Es muy importante conocer este tipo de fenómenos meteorológicos, en que temporada llegan y con que frecuencia e intensidad han tocado tierra, para poder estimar los posibles daños e informar y prevenir a los visitantes. Actualmente, mediante modelos matemáticos y el uso de computadores muy potentes es posible simular la trayectoria de los huracanes con bastante precisión. Es necesario contar con el personal científico que pueda hacer estas simulaciones y que asesore a las autoridades de Protección Civil en casos de emergencia.

Procesos de transporte de sedimentos (fuentes, trayectorias, bancos de arena, playas)

La dinámica de los sedimentos en las playas, denominado transporte de litoral de sedimentos, tiene un carácter estacional que depende de las corrientes marinas y del oleaje. En una estación del año, el transporte puede ser a lo largo de las playas en una dirección y revertirse este proceso con la llegada de una nueva estación. Por este motivo, la construcción de espigones por muchos hoteleros afecta gravemente este transporte que está en equilibrio conduciendo al asolvamiento en unas secciones de la

costa y de erosión en otras. Antes de construir espigones es necesario hacer estudios sobre las consecuencias que puede acarrear este tipo de obras.

Procesos geológicos (tipo de suelo, tipo de arenas, limos, arcillas)

Antes de promover el desarrollo de un nuevo centro turístico que implique la construcción de hoteles, puertos, marinas, canales de navegación, etc, es necesario realizar estudios sobre el tipo de suelo y sobre la dinámica de los sedimentos que en forma de arenas, arcillas y limos abundan en los ecosistemas marinos. En Cancún, por ejemplo, abundan las calizas que están visiblemente resquebrajadas lo que explica la presencia de muchos cenotes y canales subterráneos que comunican diferentes cuerpos de agua. En el caso concreto de Cancún, un suelo calizo implica que las aguas residuales de las fosas sépticas fluyan fácilmente a otras partes a través de canales subterráneos.

Procesos de largo plazo

Este tipo de procesos como pueden ser el cambio climático y el cambio en el nivel del mar, pueden afectar a la industria turística. El aumento en el nivel del mar ocasiona problemas a las construcciones hoteleras que se encuentran en la playa. Al no dejar una distancia razonable entre el hotel y la playa, la interacción del oleaje y los cambios de nivel del agua estacionales tienen el efecto de ir desapareciendo la playa.

Condiciones políticas y sociales

Se debe de conocer las características de la población como son: uso de suelo, leyes, turismo, tendencias sociales, seguridad social, economía. Esto, con la finalidad de saber que actividades podrían generar mayor beneficio a la sociedad. La principal actividad económica en el puerto es el turismo el cual genera aproximadamente cuatro mil millones de dólares. Por esta actividad, Cancún es uno de los puertos con mayor tasa de migración en el país. Debido a su creciente población ha aumentado la demanda de servicios públicos básicos, lo que ha generado una gran problemática ya que existe escasez de viviendas, deficiencia en el suministro de redes de drenaje, suministro y tratamiento de agua potable, suministro de electricidad, abasto de alimentos, y fuentes de empleo estables.

Procesos de preservación del medio ambiente y restauración de áreas primordiales

Es importante que se conozcan el tipo de ecosistemas con el que cuenta la zona en la que se pretende construir el proyecto así como la importancia y función ecológica de cada uno de ellos, así como el impacto que se generaría al tener que reducirlos. En particular, el sistema lagunar Nichupte-Bojorquez está formado por un conjunto de ecosistemas:

Selva mediana subperennifolia. Este bosque tropical representa un escenario de alto valor patrimonial y estético para el turismo internacional, brindando una oferta

creciente de oportunidades recreativas y ecoturísticas. Estos bosques significan un mecanismo estratégico de captación y suministro de agua potable para las zonas urbanas y de desarrollo turístico, e impiden la erosión y el arrastre de sedimentos hacia los sistemas arrecifales de la costa, proceso vital para la conservación de estos últimos.

Manglares. Son ecosistemas de transición entre los ambientes terrestres y marinos, constituyendo uno de los hábitats de mayor productividad biológica que existen. Brindan protección de las costas, ayudan a controlar la sedimentación y la erosión, reducen los contaminantes, ayudan el mantenimiento de la calidad del agua, son un refugio para una enorme diversidad de vida silvestre.

Lagunas costeras. Representan el principal sistema de intercambio ecológico entre los sistemas terrestres y marinos ofreciendo una alta productividad biológica, asegurando la protección y continuidad de procesos básicos tanto en manglares como en arrecifes.

Arrecifes coralinos. Frente a las costas de Cancún se inicia la segunda barrera arrecifal coralina en el mundo. El arrecife coralino sustenta una gran diversidad de peces, moluscos, crustáceos, equinodermos, y esponjas. El arrecife protege y estabiliza la dinámica costera, amortigua el impacto de mareas y fenómenos meteorológicos de gran magnitud y ofrece una infinidad de oportunidades para las actividades productivas, recreativas y de investigación.

Dunas y playas. La vegetación de dunas costeras, ayudan a estabilizar el movimiento de arena así como la protección de la línea de costa. En las playas de Cancún arriban y anidan varias especies de tortugas marinas que se encuentran en peligro de extinción.

A continuación se presenta una evaluación fotográfica del complejo lagunar de Nichupte-Bojórquez con la finalidad de evaluar como primera impresión del turista la calidad del medio ambiente de playas, lagunas, mangle y otros aspectos importantes de este centro turístico.

Evaluación fotográfica 1

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'22.32668"</u>	<u>21°8'2.35571"</u>



Foto 1 Vista de la laguna Bojórquez. Este cuerpo de agua es el más contaminado de Cancún.

Cancún es el destino turístico más importante de México y con gran reconocimiento a nivel mundial. Además, aporta de una manera muy importante en divisas a la economía nacional. Por este motivo, los diferentes niveles de gobierno han permitido la creación de hoteles, marinas y otras obras de infraestructura en áreas donde antes existía manglar. Esto ha traído un desequilibrio ecológico y una fuerte contaminación de la laguna. Así mismo, se ha reducido la protección de la costa frente a fenómenos naturales.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°46'10.4546"</u>	<u>21°8'13.16763</u>



Foto 2 Corte de mangle injustificado en una zona de marinas.

El paso del huracán Wilma afectó considerablemente el ecosistema de manglares en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez. En la presente foto se muestra el corte injustificado de manglar dañado el cual muy probablemente se recuperaría por si mismo en algunos meses. Debido al acelerado desarrollo turístico de la ciudad de Cancún, se aprovechó el fuerte daño del mangle para cortarlo y utilizar este espacio probablemente para realizar alguna obra de infraestructura.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°46'0.72769"</u>	<u>21°8'2.39682"</u>



Foto 3 Mangle dañado junto al Boulevard Kukulkán.

Un recorrido alrededor del complejo lagunar reveló una gran cantidad de árboles y palmeras caídas, especialmente en zonas de la laguna cercanas al mar. En esta fotografía, se muestra como el detritus asociado a los mangles fue completamente barrido por las corrientes producidas por el huracán Wilma. En esta zona del Boulevard Kukulkán, se observa que el mangle comienza a recuperarse y muy probablemente generará la cantidad suficiente de detritus para sobrevivir.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'5.71611"</u>	<u>21°7'55.88486"</u>



Foto 4 Isla de mangle en Bojórquez.

El ecosistema de manglar sirve de hábitat para numerosas especies, además de que brinda protección en caso de vientos y olas producidas por tormentas tropicales. El manglar actúa como una barrera que evita la erosión de la costa. Por lo que la reducción de este ecosistema pone en gran riesgo la vida silvestre y aumenta la vulnerabilidad de la costa en caso de una tormenta tropical. Este tipo de islas de mangle coadyuvan a mejorar la estabilidad y recuperación de los ecosistemas.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'18.93717</u>	<u>21°07'32.2661"</u>



Foto 5 Mangle dañado en Bojórquez mostrando signos de recuperación.

Esta foto muestra la manera en que el mangle fue masivamente dañado por la acción del oleaje generado por los fuertes vientos del huracán. Esto se deduce por la manera en que el mangle esta astillado en numerosas ramas y troncos. A pesar de que esta foto fue tomada 6 semanas después del paso del huracán, el mangle muestra síntomas claros de recuperación.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
86°45'44.12176"	21°07'52.71660"



Foto 6 Boca norte que comunica a la laguna Bojórquez con la de Nichupté.

La laguna Bojórquez esta conectada con el cuerpo de agua de Nichupté a través de dos bocas. En la presente foto se muestra la boca norte la cual se caracteriza por ser bastante estrecha con poca capacidad de intercambio de aguas. Esto tiene como consecuencia que la renovación del agua es muy lenta habiendo la tendencia a la eutroficación. Es necesario promover de alguna manera un mejor intercambio de agua para que las condiciones de contaminación actuales tiendan a ser disminuidas.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

Longitud Latitud

86°44'55.41224" 21°07'48.34848"



Foto 7 Playa externa completamente erosionada por la acción del oleaje generado por el huracán Wilma.

Las obras de protección costera como estos muros incrementan la susceptibilidad de erosionar la costa. Si se presenta una tormenta tropical, los vientos favorecen que las olas lleguen con más fuerza, por lo que las olas al estrellarse contra un muro no pueden disipar su fuerza de manera normal, mueven el sedimento mas profundo y lo arrastran hacia el interior lo que ocasiona la erosión de las playas.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°46'2.85100"</u>	<u>21°07'16.74835"</u>



Foto 8 Playa de Cancún completamente erosionada con restos de piedras calizas.

Se observa en esta imagen que a pesar de la inclinación de la playa, la acción del oleaje generado por el huracán Wilma fue de tal magnitud que logró erosionar las partes más altas de la playa. Un efecto negativo y que seguramente contribuyó a esta erosión es la presencia de muros en la parte superior. Esto tuvo el efecto que la energía asociada al oleaje no se disipara en las playas sino que fuera reflejada y ocasionara la erosión que se observa en esta foto.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
86°44'42.78035"	21°08'1.76028"



Foto 9 Daños ocasionados por la marejada sobre la playa y construcciones hoteleras.

En esta imagen se observan los daños que puede ocasionar el oleaje asociado a tormentas y huracanes sobre construcciones que están demasiado cerca del mar. A menudo se subestima la enorme fuerza que puede tener el rompimiento de toneladas de agua sobre muros, espigones y otras obras de infraestructura turística. No obstante que el muro fue construido firmemente y aparentemente con gran capacidad de resistencia, la acción de las olas lo dañaron de forma definitiva, de tal forma que se hace necesaria su remoción.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'29.31423"</u>	<u>21°06'54.67506"</u>



Foto 10 Problema de erosión y de rehabilitación de playas.

Como se ha explicado anteriormente, la presencia de muros contribuye a la erosión de playas tal y como se observa en esta foto. La erosión total de la arena en esta zona turística, tiene como consecuencia que para mantener la afluencia de turistas se hace necesario rehabilitar estas playas. El gobierno federal invirtió 235 millones de pesos para la recuperación de mas de 11.5 kilómetros de playas y se requirió dragar tres millones de metros cúbicos de arena del fondo marino en zonas cercanas a Cancún. Sin embargo, los procesos de dragado y de deposición de arena pueden ocasionar daños en el sistema de corales y arrecifes cercanos a Cancún.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'12.04467"</u>	<u>21°07'41.38897"</u>



Foto 11 Desarrollo no controlado de marinas y demasiado tráfico de yates, lanchas y motos acuáticas en el complejo lagunar.

El desordenado uso recreativo de la laguna es también una de las principales causas de su deterioro ya que diariamente cruzan por la laguna una cantidad creciente de embarcaciones que utilizan escapes bajo el agua y vierten grandes cantidades de aceite y gasolina en forma no controlada. Estas sustancias van dañando poco a poco los pastos y la fauna marina que viven en ellos. Es imprescindible que se desarrollen políticas de navegación en la laguna y que exista un control sobre el tipo de embarcaciones adecuadas para un sistema lagunar como el de Nichupté. Es recomendable que se establezcan canales de navegación bien definidos, regulando los tipos de embarcación que puedan circular en ellos.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°44'58.81246"</u>	<u>21°08'10.91704"</u>



Foto 12 Intento de rehabilitación de la laguna Bojórquez.

El problema de la contaminación en la laguna Bojórquez no es nuevo. En vista de la gravedad de la contaminación por aguas residuales en este cuerpo de agua ha habido varios intentos para su rehabilitación. Uno de los intentos del gobierno municipal de Cancún consistió en un sistema de bombeo que deslice el agua por esta construcción y genere movimiento a lo largo de la rampa con la finalidad de mejorar la oxigenación de la laguna. Desafortunadamente, no se le dio seguimiento a este proceso y la rampa quedó como un monumento al descuido de la laguna Bojórquez.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'14.82258"</u>	<u>21°07'52.13765"</u>



Foto 13 Residuos fecales observados en Diciembre de 2005 en la laguna Bojórquez.

Desde la zona hotelera y de las casas en las inmediaciones se han vertido aguas residuales por muchos años en la laguna de Bojórquez. Estas sustancias orgánicas se han ido acumulando en forma de costras en el fondo. Debido al huracán Wilma estas costras de residuos fecales fueron removidas y aparecen aún flotando después de 6 semanas en la laguna dando al paisaje y a la vista de cerca una imagen deplorable. La contaminación de la laguna puede afectar considerablemente la imagen de excelencia que tiene Cancún. Una imagen mostrando residuos orgánicos flotando en Bojórquez y en manos de un periodista crítico puede desatar una fuerte controversia y dañar la imagen de Cancún. Se tiene que actuar inmediatamente.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

Longitud Latitud
86°45'38.98419" 21°07'39.81591"



Foto 14 Residuos fecales y basura flotando en Bojórquez.

La fuerza del huracán ocasionó fuerte daño sobre el mangle desde las partes bajas hasta las altas, ya sea resquebrajándolo o deshojándolo. Esto tuvo como consecuencia una gran cantidad de basura que 6 semanas después del huracán aún se observa flotando en conjunción con residuos orgánicos. La imagen que se tiene en las cercanías de los hoteles con gran afluencia de turistas nacionales y extranjeros es pésima. La laguna Bojórquez se ve turbia y con gran cantidad de basura flotando.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'2.25030"</u>	<u>21°08'11.99656"</u>



Foto 15 Inmovilidad del agua en la laguna Bojórquez.

El intenso desarrollo urbano y el crecimiento de la infraestructura turística esta afectando los ecosistemas naturales con poca capacidad de renovación de aguas. De no haber conciencia acerca de este problema, la laguna puede sufrir una degradación probablemente irreversible. Las descargas de aguas negras de la zona hotelera y de la ciudad se realizan directamente en la laguna Bojórquez, la cual no puede recuperarse por si sola ya que existe poca movilidad del agua. El intercambio de agua entre Bojórquez y Nichupte es escaso.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'16.64912"</u>	<u>21°07'57666"</u>



Foto 16 Eutroficación del agua en la laguna Bojórquez.

En la actualidad el sistema Lagunar Nichupte-Bojorquez tiene grandes problemas de contaminación debido al ineficiente manejo de las aguas residuales que desembocan en la laguna. Esto provoca un aumento de materia orgánica que favorece la formación de algas y otras especies de flora y fauna marinas las cuales comienzan a consumir el oxígeno disuelto en la laguna hasta agotarlo completamente y alcanzar un alto grado de eutroficación.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

Longitud Latitud
86°46'09.97364" 21°07'13.53471"



Foto 17 Residuos orgánicos favoreciendo el crecimiento de almejas y ostras.

El vertido de residuos orgánicos en la laguna favorece las condiciones nutricionales y por ende contribuyen al crecimiento de almejas y ostras. Las ostras mostradas en esta foto se encuentran en el canal sur que comunica a Bojórquez con Nichupté. El color turbio y el mal olor son una indicación de eutroficación y de una cantidad importante de sustancias orgánicas. En la imagen se puede observar la poca movilidad del agua. Existe una gran pérdida en la calidad del agua para utilizarla con fines recreativos y turísticos, además de limitar la diversificación económica y el mantenimiento de la laguna a largo plazo.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°46'33.92515"</u>	<u>21°08'32.53929"</u>



Foto 18 Daños del huracán en los linderos de la laguna.

La fuerza del huracán fue tal que una gran cantidad de árboles ubicados alrededor de la laguna fueron arrancados y derribados completamente ocasionando un deterioro considerable de la imagen del puerto de Cancún. La pérdida de árboles fue acompañada de una reducción del detritus en donde el mangle se asienta. El lindero del complejo lagunar debe ser restaurado con la implantación de mangle y de nuevos árboles que tienen una función de protección costera.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°47'11.20970</u>	<u>21°08'13.24727"</u>



Foto 19 Mangle dañado en el interior de la laguna Nichupté.

El daño del huracán Wilma no se limitó a los linderos de la laguna con el mar sino que el mangle que se ubica en el interior de la laguna Nichupté fue también fuertemente perjudicado por el viento y por el oleaje. En esta imagen se observa la altura alcanzada por el agua (la zona sombreada). Estos manglares en el interior de Nichupté seguramente tiene mayor probabilidad de recuperarse que el ubicado en los linderos de la laguna. En la foto pueden verse algunas zonas verdes de recuperación.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
86°46'11.66227"	21°07'33.41444"



Foto 20 Construcciones civiles afectando la zona costera.

Uno de los efectos adyacentes a las tormentas y huracanes son las llamadas olas de tormenta. En estos fenómenos, dependiendo de la intensidad, el nivel del mar puede llegar a subir algunos metros sobre el nivel medio. También, debido al calentamiento global se estima que el nivel del mar sube cada año 1.1 mm. Estos dos efectos implican un gran riesgo para las construcciones hoteleras que se encuentran ubicadas demasiado cerca de la playa. Antes de construir un complejo hotelero se deben de tomar en cuenta los fenómenos que ocurren en el mar como son: las mareas, tormentas, oleaje, etc, además de estimar estos efectos a largo plazo.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

Longitud Latitud
86°44'54.82461" 21°07'56.94324"



Foto 21 Trabajos de restauración inmediatos.

Después de que el huracán Wilma devastara la ciudad de Cancún, se inicio inmediatamente la rehabilitación de la ciudad como se indica en esta foto. En el proceso de restauración y el arduo trabajo que ello implica, los ciudadanos de Cancún ayudaron enormemente en la limpieza de la ciudad y en los trabajos de reconstrucción. Además, muchas compañías hoteleras aprovecharon para remodelar sus instalaciones con la finalidad de brindarle al turista una mayor diversidad de actividades recreativas e instalaciones de mejor calidad. Este trabajo rápido de restauración revela la importancia económica de Cancún.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ -BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'1.72210"</u>	<u>21°07'45.13445"</u>



Foto 22 Boulevard Kukulkán devastado por el huracán Wilma, sin árboles y sin palmas.

En esta foto se presenta como quedó de desolado el boulevard después del huracán, sin árboles y sin palmas que fueron completamente arrancados y derribados por el viento y la acción del oleaje. A lo largo del boulevard quedaron algunos hoteles dañados seriamente que se hará necesario su demolición. Para que este paseo vuelva a adquirir su esplendor es necesaria su reforestación.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ - BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°47'16.61819"</u>	<u>21°8'32.80135"</u>



Foto 23 El principal intercambio de aguas entre el Nichupté y el mar abierto ocurre a través de la boca Cancún.

El complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez tiene el mayor intercambio de aguas a través de la boca Cancún en el lado norte. Aunque en esta boca se observan velocidades de 0.5 m/s, el alcance del intercambio es relativamente bajo, pues la presencia de manglares enfrente de la boca Cancún amortigua significativamente la movilidad del agua, reduciéndose a algunos canales de navegación. El tráfico de lanchas, yates y otras embarcaciones es intenso a través de esta boca. Foto tomada antes del huracán Wilma.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ - BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°47'25.35850"</u>	<u>21°8'9.14831"</u>



Foto 24 Principal canal de navegación en Nichupté.

Enfrente de la boca Cancún existe una gran cantidad de mangle que reduce la circulación del agua a algunos canales estrechos y otros más anchos. En la presente foto se muestra el principal canal de navegación que atraviesa los manglares de Nichupte. Puesto que esta foto fue tomada en Septiembre de 2005, es decir, antes del huracán Wilma, se observa que el mangle se encuentra en muy buen estado.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ – BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°47'17.93467"</u>	<u>21°8'25.45903"</u>



Foto 25 Control de datos medidos en la campaña de medición de septiembre de 2005.

El intenso tráfico de yates y otras embarcaciones perturba la calidad de las mediciones de nivel del agua y sobre todo de velocidades debido al oleaje generado al paso de las embarcaciones. El muestreo de agua para análisis químicos también es perturbado por la movilidad de sedimento que ocasiona el paso de yates relativamente amplios a velocidades muy altas. Este tráfico tiene que ser regulado pues indudablemente están perturbando la flora y fauna marinas de Nichupté.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ – BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°47'33.69958"</u>	<u>21°7'18.97467"</u>



Foto 26 Fuentes de agua natural en el complejo lagunar de Nichupte-Bojórquez.

Los estudios batimétricos que se realizaron en el complejo lagunar revelaron la presencia de fuentes o manantiales naturales de agua en varios puntos del complejo lagunar. Las mediciones hidrográficas y químicas de muestras de agua en estos lugares mostraron que el agua que brota está bastante contaminada y está, antes de salir a la superficie, ya mezclada con agua de mar.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y
SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ – BOJORQUEZ,
QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°46'37.50430"</u>	<u>21°7'47.46327"</u>



Foto 27 Oleaje y mangle

En esta foto se muestra la altura que alcanzó el agua durante el huracán Wilma (zona gris). Algunas semanas después del huracán, el mangle muestra signos favorables de recuperación. Desafortunadamente, no se puede decir lo mismo del mangle que estaba ubicado en los linderos de la laguna.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y
SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ – BOJORQUEZ,
QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°47'18.80421"</u>	<u>21°8'26.27611"</u>



Foto 28 El viento es el principal factor que induce la dinámica o circulación de agua en el complejo lagunar.

Puesto que las mareas en el Golfo de México son muy pequeñas, el viento se convierte en la principal acción que fuerza la circulación en todo el complejo lagunar. En esta foto se ve que el oleaje es importante y que favorece el entrampamiento de oxígeno en la laguna.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y
SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ – BOJORQUEZ,
QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°45'39.64544"</u>	<u>21°7'23.72047"</u>



Foto 29 Mangle en Bojorquez mostrando signos de recuperación.

En algunas partes de la laguna Bojórquez existen islas de mangle que fueron dañados fuertemente por el huracán. Es necesario hacer trabajos de rehabilitación de estas manchas de mangle con el fin de asegurar sus condiciones. El mangle juega un papel muy importante como regulador entre la interacción de condiciones de tierra firme y marinas.

HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS EN EL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ – BOJORQUEZ, QUINTANA ROO, MÉXICO (CQ063)

POSICIÓN GEOGRÁFICA

<u>Longitud</u>	<u>Latitud</u>
<u>86°46'16.99072"</u>	<u>21°8'22.52381"</u>



Foto 30 Arrasamiento de árboles, arbustos y palmas por la acción del viento asociado al huracán Wilma.

Velocidades del viento de más de 200 km/h durante un par de días que duró estacionado el huracán en las cercanías de Isla mujeres y Cancún tuvo efectos desastrosos principalmente sobre árboles y palmas. En esta foto se muestra un ejemplo de ello. La gran cantidad de árboles arrancados tierra adentro, se convirtieron en madera seca muy propicia para los incendios forestales tal y como realmente ocurrió algunos meses más tarde.

Evaluación fotográfica 2



FOTO 1. MANGLAR SECO

Longitud	Latitud
-86.7921168	21.049557

El paso del huracán Wilma por la zona noreste de la Península de Yucatán ocasionó grandes daños a los manglares localizados en el complejo lagunar de Nichupté



FOTO 2.
Mangle como refugio de aves

Longitud	Latitud
-86.792496	21.0484871

Durante nuestras campañas de
Medición a lo largo y ancho del



FOTO 3.
Mangle recuperado

Longitud	Latitud
-86,795427	21,045414

El daño a los manglares
Por el huracán Wilma tuvo
Un carácter diferencial
Pues en ciertas zonas el
Mangle se ha recuperado
Casi totalmente.



FOTO 4.
Mangle seco y recuperado

Longitud	Latitud
-86,795601	21,044745

En otras zonas del sistema
Lagunar, el daño por el



FOTO 5.
Boca sur. Punta Nizuc

Longitud	Latitud
-86,796589	21,040165

El sistema lagunar de
Nichunté-Rnióruuez tiene



FOTO 6.
Pastos marinos

Longitud	Latitud
-86,790854	21,053007

Aunque el sistema
lagunar está bastante



FOTO 7.
Indicación de canales de
navegación

Longitud	Latitud
-86,797331	21,124454

Para poder mantener zonas
Protegidas del intenso paso



FOTO 8.
Canales de intercomunicación

Longitud	Latitud
-86,796878	21,124941

La interacción de la laguna
Con el mar abierto por la
Influencia de las mareas, ha



FOTO 9.
Mangle alejado de la zona de
presión
(lejos de la zona hotelera)

Longitud	Latitud
-86,796878	21,124941

Dudimos observar que entre



FOTO 10.
Construcción (extensión del
malecón)

Longitud	Latitud
-86,811639	21,148894

Indudablemente que las
Obras hidráulicas que tienen



FOTO 11.
Nivel del agua y del suelo
(debido a la poca diferencia de
niveles alta susceptibilidad a
inundaciones)

Longitud	Latitud
-86,76831	21,122266



FOTO 12.
Mangle afectado por zona
hotelera

Longitud Latitud
-86,767666 21,121949

El mangle que está ubicado
En las inmediaciones de la



FOTO 13.
Crecimiento explosivo de la
zona hotelera

Longitud	Latitud
-86,75606	21,128709

La falta de ordenamiento y
Protección del sistema
La guerra ante el crecimiento



FOTO 14.
Mangle completamente
recuperado

Longitud	Latitud
-86,788801	21,143527

Afortunadamente, existen
Manglares completamente



FOTO 15.
Puente norte, boca norte. Zona
de mayor intercambio de agua
entre la laguna y el mar

Longitud	Latitud
-86,787839	21,142966

El intercambio con el mar

CAPÍTULO 12

Conclusiones

El sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez padece la interacción con el mar abierto a través de las bocas Cancún en el norte y Punta Nizuc en el sur, interactúa también con el agua subterránea a través de más de 20 manantiales de agua ubicados principalmente en el lado oeste del complejo lagunar. Sufre la acción del viento, principalmente de los alisios y de las mareas a través de las dos bocas. Padece también la acción antropogénica directa de la zona hotelera y de la ciudad de Cancún a través de las descargas de aguas residuales vertidas directamente o por conducción subterránea y que aflora en el sistema lagunar en los manantiales. Intermitentemente, esta zona de la Península de Yucatán es afectada también por huracanes que ocasionan daños severos al ecosistema, magnificados por las obras hidráulicas y de hoteles en la zona de la costa. Afectan la calidad del agua el paso de las innumerables lanchas, el corte de manglar y la afluencia de sustancias químicas que deterioran al sistema lagunar. Nuestras mediciones de metales pesados alcanzan valores demasiado altos para un sistema que se supone debe ser recreativo. Hemos constatado la entrada de aguas residuales a través de la medición de nutrientes en todo el sistema lagunar, identificado las zonas conflictiva y demostrando que el agua que sale de los manantiales debe tener contacto con aguas residuales de Cancún. Por primera vez dentro de un proyecto se ha efectuado un estudio integral del sistema

lagunar que incluye aspectos de batimetría a detalle con sistemas de información geográfica, hidrología, nutrientes, contaminantes, metales pesados, estudio bacteriológico profundo y con los métodos más modernos de la biología molecular, hidrodinámica inducida por viento y mareas, transporte de sustancias pasivas por el viento, transporte de sedimentos y dos evaluaciones fotográficas del sistema lagunar. Hemos propuesto una metodología por dinámica de mareas para producir un flujo en una sola dirección en la laguna Bojórquez, como un diodo, de tal modo que pueda contribuir a la reducción del tiempo de residencia de agua y a un mayor intercambio de agua que pueda disminuir el deterioro de esa laguna. Sobre la bacteriología se ha publicado un artículo científico en una revista internacional. Finalmente, hemos generado una cantidad importante de datos, medidos en diferentes épocas del año, que pueden ser útiles para otros trabajos con fines prácticos o de investigación. Concretamente se midieron: Batimetría, salinidad, temperatura, turbidez, pH, velocidades, nitrito, nitrato, fosfato, amonio, surfactantes, plomo, cadmio, cobre, hierro y zinc. Se encontraron en muestreos efectuados antes y después del paso del huracán Wilma, alrededor de 85 bacterias, que habían sido clasificadas taxonómicamente en diferentes partes del mundo. Esta fue una manera diferente de demostrar que hay entrada de aguas residuales desde la zona hotelera. Además, en las muestras tomadas después del huracán, se encontraron 8 bacterias que no fueron encontradas en los bancos de datos. Hemos efectuado un análisis de los vientos dominantes, su acción sobre la circulación en el sistema lagunar. Se calculó la hidrodinámica del sistema con modelo bidimensional verticalmente integrado. El sistema es bastante somero y con esto se justifica la aplicación del modelo de dos dimensiones. Las

simulaciones sobre el transporte o dispersión de contaminantes por viento, demostraron que los vientos del noreste y este son los más efectivos en dispersar las sustancias pasivas. Únicamente el viento del noreste fue capaz de exportar partículas hacia el mar abierto. Pero se demostró que bajo la acción de estos vientos los contaminantes se distribuyen por todo el sistema lagunar. Esto explica las concentraciones de nutrientes y metales pesados encontrados en las mediciones. Hemos demostrado la influencia de agua relativamente dulce que sale por los manantiales sobre la distribución de la salinidad. El transporte de sedimentos que fue modelado numéricamente demostró que muy probablemente las zonas de bajos encontrados en el sistema lagunar se deben a sedimento que entra por la boca Cancún y es transportado hacia la zona media de Nichupté. Finalmente, es conveniente comentar que este proyecto más que terminar un estudio del sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez, en realidad abre nuevas expectativas de investigación, como por ejemplo, investigar la diversidad bacteriológica de este tipo de sistemas costeros.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a CONABIO, en particular a María del Carmen Vázquez Rojas, a Yvonne Simms del Castillo, por su paciencia y apoyo durante los diferentes estados del proyecto. Agradecemos a Alejandro Bravo por su apoyo durante las campañas de medición, a Adolfo Lizárraga por su apoyo logístico, a la API de Cancún por su apoyo con lanchas.