

# EUTROFIZACIÓN COSTERA EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

*Jorge A. Herrera-Silveira, Nancy Aranda Cirerol, Luis Troccoli  
Ghinaglia, Francisco A. Comín y Chris Madden*

---

## INTRODUCCIÓN

Resulta ampliamente reconocido que los países que no pueden planificar su estrategia de desarrollo económico en armonía con la conservación de los recursos naturales y su manejo, quizá no pueden sustentar ninguna clase de progreso en las áreas de salud, alimentación, vivienda, energía y otras necesidades críticas. Bajo este contexto, México se encuentra ante un gran reto en virtud de su riqueza de recursos naturales y de las necesidades económicas y sociales de sus habitantes.

Para ello, se debe desarrollar una estrategia económica, social y ambientalmente compatible que tenga como meta ofrecer una mejor calidad de vida a la población humana. Bajo esta premisa el investigador y el experto en manejo deben enfrentar complejas opciones de investigación, uso y administración de los recursos naturales, de los ecosistemas terrestres y acuáticos con los que cuenta el país.

Entre los sistemas que integran ambientes terrestres y acuáticos destaca de manera particular la zona costera, la cual puede definirse como un área donde tienen lugar interacciones entre procesos marinos, atmosféricos, terrestres, fluviales, subterráneos y antrópicos, lo cual le ha conferido no sólo riqueza de paisaje, sino que también estos procesos son responsables de que haya una alta diversidad y productividad biológica, haciendo

de la zonacostera un sitio atractivo para nuevos asentamientos humanos y desarrollo de actividades económicas.

México es de los países en los que la proporción de territorio terrestre y marítimo se inclina claramente hacia el mar, ofreciendo una serie de oportunidades de desarrollo, pero también imponiéndole una serie de retos en función de que cualquiera que sea el uso de sus recursos marinos, éste sea ambientalmente amigable. Desafortunadamente ésto no ha sucedido así, y ya es posible encontrar casos en los que pesquerías, playas, estuarios, lagunas costeras, zonas de manglar, y fauna silvestre, entre otros recursos, han sufrido severos daños (Merino *et al.* 1992, Rivera-Arriaga y Villalobos 2001, Euan-Avila y Witter 2002).

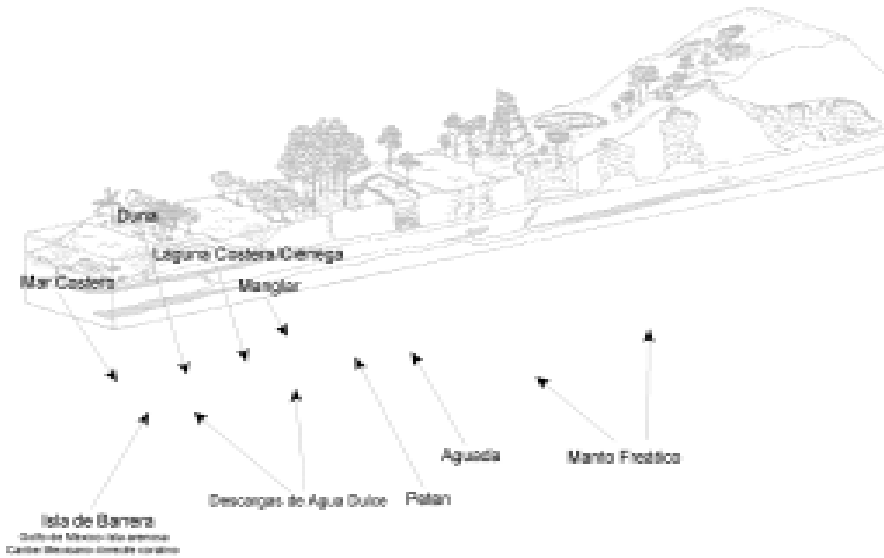
Esta tendencia al deterioro ambiental no es exclusiva de México, por lo que se está tratando de revertir teniendo como marco de referencia los conceptos generales del manejo integral de la zona costera con un enfoque de desarrollo de largo plazo, en el que a través de una serie de herramientas de captura, análisis e integración de información económica, social y ambiental se puedan ofrecer lineamientos que orienten el desarrollo sustentable de las costas mexicanas (figura 1).

Cualquiera que sea la estrategia de desarrollo, ésta debe contemplar acciones que permitan dar seguimiento a las consecuencias en el medio ambiente costero producto de las actividades antrópicas, lo cual permitirá contar con programas que mitiguen o reviertan la causa del problema observado. Para ello, se debe seleccionar un indicador que aporte información no sólo sobre las consecuencias, sino también sobre el origen del problema, orientando actividades que conduzcan a la sustentabilidad de un recurso o ecosistema.

Entre las características e indicadores que han demostrado ser útiles para este propósito en las costas de otros países tanto desarrollados como en vías de lograrlo, han sido los relativos a la eutrofización de los ecosistemas acuáticos costeros. Éste ha sido uno de los principales problemas que se han identificado y sobre los que mayor cantidad en recursos económicos se han destinado no sólo para entenderlo sino también para mitigarlo y solucionarlo (Urban *et al.* 1996)

El proceso de eutrofización consiste en el aumento de la producción de materia orgánica como resultado del incremento en la adición de nutrientes principalmente nitrógeno y fósforo. Este es un proceso natural que ha sido acelerado por las actividades humanas, nombrándosele eutrofización cultural, se le reconoce por una mayor acumulación de la materia orgánica

FIGURA 1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MOSTRANDO LOS PRINCIPALES TIPOS DE ECOSISTEMAS CON ÉNFASIS EN LOS DE LA ZONA COSTERA



producida en forma de algas. Entre los síntomas del proceso de eutrofización cultural que se han utilizado como indicadores de éste problema destacan las concentraciones de Clorofila-a en la columna de agua, la frecuencia, cobertura espacial y toxicidad de los florecimientos de algas nocivas, la reducción de la cobertura de pastos marinos y la disminución en la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua, entre otros (Bianchi *et al.* 1999, Howarth *et al.* 2002).

Las consecuencias de estos síntomas incluyen la pérdida del hábitat con cambios en la biodiversidad, impactos a pesquerías recreativas y comerciales, impactos a las actividades turísticas, e incluso a la salud humana y a la de los ecosistemas en general.

Si bien el proceso de eutrofización está bien documentado para ecosistemas de agua dulce desde hace más de 20 años, en ambientes costeros

es aún pobremente entendido, por lo que existen importantes programas de investigación y monitoreo para las costas de Estados Unidos de América y de la Comunidad Europea; en ambos casos éste proceso se ha incorporado como un elemento de diagnóstico ambiental de los ecosistemas costeros (Bricker *et al.* 1999, ICRAM 2000). En México se carece de este tipo programas y de diagnósticos bajo un contexto espacial de gran escala como lo es el Golfo de México.

Para evaluar el problema de eutrofización y considerarlo como un elemento de diagnóstico que a través de su monitoreo permita evaluar el éxito de las estrategias de manejo en los ecosistemas costeros del Golfo de México, es necesario desarrollar las bases científicas para asegurar la sustentabilidad de este gran ecosistema. Las bases que dan soporte al diagnóstico se fundamentan en la determinación de la variabilidad espacial y temporal de la eutrofización y las variables con las cuales se relaciona.

Para ello, la estrategia inicia con la investigación para determinar los indicadores y los valores de referencia de variables de la condición trófica de los ecosistemas costeros, siguiendo un esquema de variabilidad espacial y temporal a diferentes escalas. A través de ello se podrán proponer los programas de monitoreo *ad hoc*, que proporcionen elementos de decisión a los administradores y funcionarios relacionados con el manejo de los recursos naturales de los ecosistemas costeros.

Sin embargo, debido a las diferencias geológicas, de clima y geográficas entre otras de los ecosistemas costeros, las condiciones de referencia son diferentes de una región a otra. De forma similar, los cuerpos de agua como estuarios, zona marina costera, bahías y lagunas costeras, frecuentemente responden diferencialmente a los aportes de nutrientes que provienen de diferentes fuentes (ríos, escorrentía, descargas subterráneas, entre otros). Esto significa que los criterios deben ser diseñados de forma particular para cada tipo de cuerpo de agua y región donde ellos se encuentran.

En México, la normatividad es deficiente en considerar los riesgos a los ecosistemas acuáticos y a la salud que la eutrofización puede desencadenar. Esto se basa en que de acuerdo con la normatividad que aplica a los ambientes costeros en cuanto a valores de referencia para la vida acuática que se establece en los Criterios ecológicos de calidad del agua (CNA 2000), se asume que todos los cuerpos de agua costera (Costa de Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe) son similares, ya que no hace distinción entre ellos. Adicionalmente, en ésta misma norma, el proceso de eutrofización es subestimado como problema, ya que no incluye variables o indicadores de este proceso (Clorofila-a,

transparencia del agua, comunidad del fitoplancton, mareas rojas, vegetación acuática sumergida-VAS), y que se han reconocido como claves para el diagnóstico y monitoreo de este problema (EPA 1999).

### ÁREA DE ESTUDIO

En el caso particular de la Península de Yucatán, el ambiente costero ha sido reconocido como el recurso natural más valioso, por lo que contar con indicadores para el diagnóstico y monitoreo del proceso de eutrofización de sus ecosistemas costeros cobra importancia desde la perspectiva del tipo de suelo (cárstico), descarga del acuífero (manantiales subterráneos y descargas no puntuales), dominancia de actividades agropecuarias, y desarrollo costero en el que la actividad turística es dominante (Capurro *et al.* 2002).

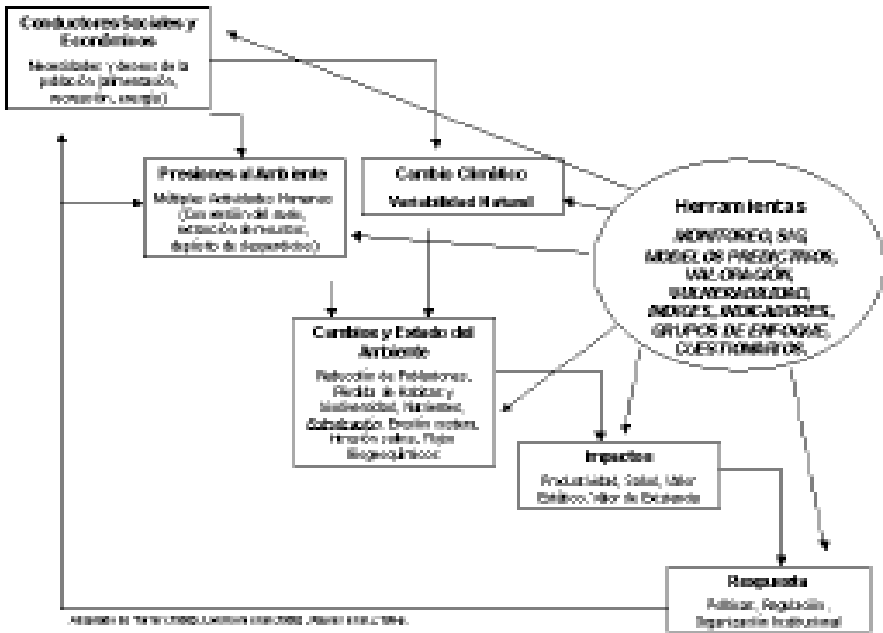
Es importante señalar que de los más de 4 millones de habitantes en la Península de Yucatán, el 90% vive a menos de 100 km de la costa, la tasa de natalidad es mayor (2.2%) al promedio nacional (1.7%), tiene una alta inmigración y se espera que se impulse oficialmente el desarrollo de la costa a través de actividades como el turismo, el transporte marítimo, el desarrollo portuario, la acuicultura y las pesquerías.

Por lo anterior, la población y los asentamientos humanos crecerán, y se seguirán dando cambios en el uso del suelo, continuarán los impactos en ecosistemas como manglares, lagunas costeras, playas, dunas, vegetación sumergida e incluso en los arrecifes de coral. Esto ocasionará problemas de salud, disminución del beneficio económico y descontento social si no se ponen en marcha estrategias de manejo costero que estén sustentadas en el diagnóstico y en indicadores que permitan identificar los problemas y dar seguimiento a las alternativas de solución.

Entre los aspectos ambientales que caracterizan a la Península de Yucatán, destaca que su cuenca hidrográfica presenta particularidades como una topografía muy homogénea, ausencia de ríos y suelos cársticos, lo que favorece la infiltración de agua proveniente de la precipitación hacia el acuífero, el cual descarga en los ecosistemas costeros a través de manantiales y fuentes no puntuales (figura 2), estimándose un aporte de 9-11 millones/m<sup>3</sup>/año/km de costa.

Esta característica es particularmente importante ya que así como el agua se infiltra rápida y fácilmente al acuífero, también lo hacen todo tipo de contaminantes. Si se considera que entre las actividades productivas dominantes de la zona están la industria turística, agropecuaria, salinera y la

FIGURA 2. MODELO CONCEPTUAL DE LAS INTERACCIONES ENTRE COMPONENTES DEL MANEJO INTEGRADO DE LA ZONA COSTERA



urbana, es fácil imaginar que los principales contaminantes son de tipo orgánico (nitrógeno y fósforo), si además se adiciona el hecho de que más del 90% de estas actividades no existen plantas de tratamiento de aguas residuales y en el otro 10% las que existen son deficientes, no es extraño que se observen ya algunos síntomas y consecuencias del proceso de eutrofización en los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán, como la frecuencia de florecimientos algales nocivos, la disminución de la cobertura de pastos marinos, intoxicaciones por consumo de productos del mar, e incluso el cierre de playas a la actividad turística (Merino *et al.* 1992, Reyes y Merino 1991, Herrera-Silveira *et al.* 2002).

Es bajo este contexto que el CINVESTAV-IPN Unidad Mérida, como parte de su Programa de Procesos y Manejo Costero, inició una línea de investiga-

ción sobre el análisis del proceso de eutrofización en los ecosistemas costeros de Yucatán, con miras a entender las causas y consecuencias de este proceso en un contexto de calidad del agua, y desarrollar indicadores y programas de monitoreo acordes con la problemática ambiental de la zona, que permita diagnosticar la condición actual y la vulnerabilidad de los diferentes ecosistemas costeros de la Península de Yucatán al proceso de eutrofización, así como dar soporte a las políticas de manejo del agua y por lo tanto medir el éxito de las acciones de conservación, rehabilitación/restauración o saneamiento.

Por lo anterior, este capítulo presenta resultados concernientes al diagnóstico de la calidad del agua de los ecosistemas costeros a través de indicadores del estado trófico de diferentes tipos de ecosistemas de la Península de Yucatán. De esta manera, se pretenden identificar las variables y procesos clave relacionados con la eutrofización y proveer el soporte técnico para la implementación de las políticas de manejo del agua costera.

#### APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

La aproximación metodológica ha tenido que considerar diferentes aspectos desde los geohidrológicos de la zona, hasta los de tipo e intensidad de actividades humanas en las costas. La zona de estudio incluye lagunas costeras, bahías y zona marina, denominada costa, en localidades desde Campeche hasta Chetumal, cubriendo un amplio espectro de tipos e intensidad de usos (cuadro 1, figura 3).

Las campañas de muestreo en todas las localidades consisten en al menos un ciclo anual con visitas mensuales, mientras que en otros, los resultados son de más de 10 años de monitoreo. En cada sitio se colectaron muestras en al menos 15 estaciones cubriendo áreas de 20 hasta 900 km<sup>2</sup>. En los muestreos se han empleado tanto técnicas y equipo convencional como no convencional, en específico el uso de un equipo de mapeo sinóptico de variables hidrológicas conocido como "DataFlow IV" (Madden y Day 1992). Esto obedece a que en esta región del Golfo de México, donde las descargas de agua dulce a los ecosistemas costeros es predominantemente subterránea, la determinación de la heterogeneidad espacial es difícil de establecer, por lo que nuevas tecnologías tienen que ser utilizadas.

Las variables medidas han incluido características físicas y químicas del agua (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nitrato, nitrito, amonio, fosfato y silicato) siguiendo las técnicas y recomendaciones de Parsons *et al.*

CUADRO 1. SE PRESENTAN LOS SITIOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN DONDE SE HA COLECTADO INFORMACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS, QUÍMICAS Y DE CLOROFILA -A (V/F-Q-CLA), ASÍ COMO DE LAS COMUNIDADES DE FITOPLANCTON Y/O VEGETACIÓN ACUÁTICA SUMERGIDA (V/FT-VAS)

SITIO	SISTEMA Y REGIÓN	V/F-Q-CLAV/FT, VAS		INTENSIDAD DE USO			
				U	T	P	PT
Campeche	C/G	X		+	+	-	+
Celestún	LB/G	X	X	+/-	+/-	+	-
Laguna Celestún	LB/G	X	X	-	+/-	+	-
Sisal	C/G	X	X	+/-	-	+/-	+/-
Progreso	C/G	X	X	+	+	+	+
Laguna Chelem	LB/G	X	X	+	-	-	+
Dzilam	C/G	X	X	+	-	+	+
Bocas de Dzilam	LB/G	X	X	-	-	-	-
Río Lagartos	LB/G	X		+/-	+/-	+	+/-
Holbox	LB/G	X		+/-	+/-	+	+/-
Cancún	C/C	X	X	+	+	-	+
Nichupte/Bojorquez	LB/C	X		+	+	-	-
Isla Mujeres	C/C	X	X	+	+	+/-	+
Playa del Carmen	C/C	X		+	+	-	+
Bahía de la Ascensión	LB/C	X	X	-	-	+	-
Chetumal	LB/C	X		+	+/-	-	+/-

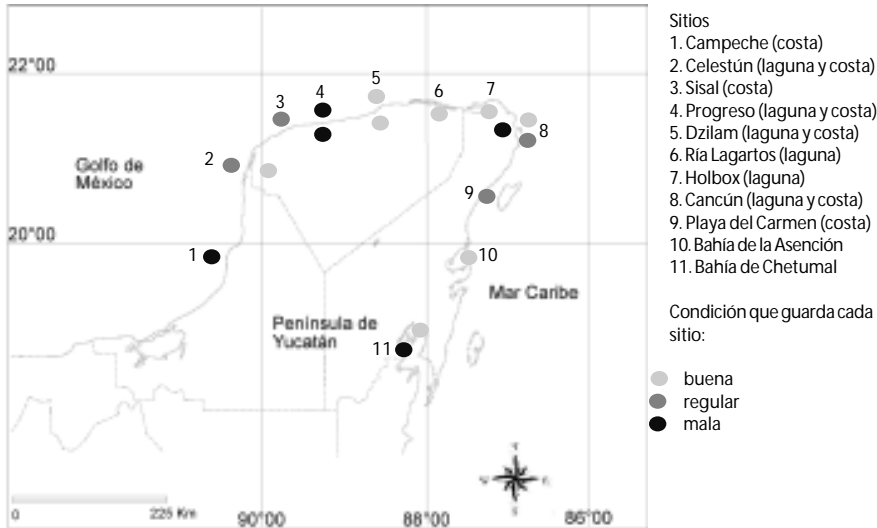
Se identifican los principales usos: Urbano (U), Turístico (T), Pesquero (P), Portuario (PT), así como su intensidad: bajo (-), intermedio (+/-), alto (+). Lagunas y Bahías del Golfo (LB/G), lagunas y bahías del Caribe (L/BC), costa del Golfo (CG), costa del Caribe (CC).

(1984); de la comunidad del fitoplancton (Clorofila-a, composición y densidad por grupos) aplicando las técnicas descritas en Jeffrey *et al.* (1997); y de pastos marinos y macroalgas (cobertura) de acuerdo con Fourqurean *et al.* (2002). Sin embargo, no todas las variables han sido medidas en todas las localidades (cuadro 1), quedando aún mucho por investigar y por lo tanto para implementar los programas de monitoreo *ad hoc*.

Para el análisis de la información de variables físicas, químicas y clorofila-a de la columna de agua, se agruparon los sitios en los sistemas: lagunas/bahías y costa, de las regiones del Golfo y Mar Caribe (cuadro 1, figura 3).



FIGURA 3. LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS SELECCIONADOS PARA EL DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE EUTROFIZACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, CON BASE EN VARIABLES, QUÍMICAS, DE FITOPLANCTON Y VEGETACIÓN ACUÁTICA SUMERGIDA



Esta división obedece a que se han identificado diferencias entre las aguas de estas dos grandes regiones así como entre ecosistemas semicerrados y abiertos (Troccoli 2001, Herrera-Silveira *et al.* 2002)

El análisis de la información consistió en determinar los valores e intervalos de referencia de variables físicas, químicas y clorofila-a de la columna de agua por región. Para ello se siguió la recomendación de EPA (2001), la cual se basa en calcular la mediana del conjunto de datos; ésta tiene en cuenta el orden de los datos más no su magnitud, por ello no es afectada por valores extremos. Como medida de su variabilidad y que a su vez establece los límites superior e inferior dentro de los cuales cualquier dato es considerado como normal, se calcularon los cuartiles inferior y superior.

Para determinar diferencias estadísticas de las variables analizadas entre las regiones se aplicó un análisis gráfico de cajas (figura 4). En estos gráficos se evalúa la existencia de diferencias entre grupos de medianas de una variable dependiente con base en un factor –las regiones–. La línea horizontal de cada

caja corresponde a la mediana y próxima a ésta la media (simbolizada por una cruz). La porción superior e inferior de cada caja representan el 25° y 75° percentiles (cuartiles-intervalo), mientras que los extremos de las barras son el 5° y 95° percentiles. La muesca lateral en las cajas corresponde al 95% del intervalo de confianza de la mediana, por ello, cuando las muescas entre dos cajas no se sobrelapan, se asume que las medianas son significativamente diferentes (Boyer *et al.* 1997).

En relación con el estado trófico de cada tipo de ecosistema y región, éste se obtuvo integrando la información de variables químicas, fitoplancton y VAS, según los datos que se tienen de cada sitio (cuadro 1), y siguiendo los criterios y recomendaciones de los trabajos realizados para el diagnóstico del estado de eutrofización de los estuarios de EE.UU. (Bricker *et al.* 1999) y de aguas costeras oligotróficas (Karydis *et al.* 1983).

## DIAGNÓSTICO

Las medianas y valores intercuartiles que representan el valor de referencia y su intervalos de variación natural para cada tipo de ecosistema y región se pueden observar en el cuadro 2.

La temperatura es mayor en la costa del caribe (C/C) y menor en la del Golfo (C/G); sin embargo, es más variable en las lagunas y bahías del Golfo (L/BG). Se observan diferencias significativas entre regiones (figura 4a), siendo la del Caribe la que en general presenta mayores temperaturas.

La salinidad es mayor en la región C/G y menor en L/BG, aunque este grupo de ecosistemas presenta la mayor variabilidad tanto para salinidades bajas como altas. Los ecosistemas de C/C presentan una variabilidad muy baja. Las diferencias significativas se observan entre los ecosistemas del Golfo y Caribe (figura 4b).

En relación con el oxígeno disuelto los valores de referencia más altos se observan en los ecosistemas del Caribe, con mayor variabilidad en las concentraciones de los sistemas de L/BG. Las diferencias significativas en las concentraciones medianas se observan entre los sistemas del Golfo y Caribe (figura 4c).

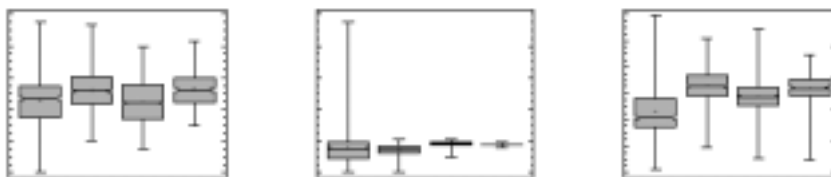
Por lo que respecta a los nutrimentos, la concentración de nitrito es mayor en la región C/G y menor en la C/C, siendo más variable en los ecosistemas de la región L/BG. Las diferencias significativas se observan entre la C/C y las demás regiones (figura 5a). La concentración mediana de nitrato es mayor en la región C/C y menor en la de C/G. Con mayor varia-

CUADRO 2. VALORES DE REFERENCIA (MEDIANA) E INTERVALO DE VARIABILIDAD (CUARTIL INFERIOR Y SUPERIOR) DE VARIABLES FÍSICAS, QUÍMICAS, Y CLOROFILA-A DE REGIONES COSTERAS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN. LAGUNAS Y BAHÍAS DEL GOLFO (LB/G), LAGUNAS Y BAHÍAS DEL CARIBE (L/BC), COSTA DEL GOLFO (CG), COSTA DEL CARIBE (CC).

REGIÓN VARIABLE	LB/G	LB/C	C/G	C/C
Temperatura °C	27.3 25-29	28.3 26.7-35.1	26.8 24.8-29.1	28.4 26.8-29.9
Salinidad	30.6 18.4-37.4	30.3 24.6-34	36.9 35.4-38.2	34.9 34.7-35.4
Oxígeno disuelto, mg/l	4.4 3.4-5.6	6.5 5.8-7.4	5.7 5-6.4	6.4 5.8-7
Nitrito µmol/l	0.39 0.16-1.04	0.47 0.26-0.86	0.57 0.23-0.97	0.21 0.05-0.42
Nitrato µmol/l	2.6 1.1-7	1.8 0.8-3.7	2.8 1.3-6	1.9 1-9.1
Amonio µmol/l	4.7 2.5-8.5	3.7 2-6.6	3.7 2.1-6.2	2.4 1.9-3.4
Fosfato µmol/l	0.5 0.15-1.1	0.7 0.36-1	0.4 0.3-0.8	0.6 0.4-0.9
Silicato µmol/l	62 23-118	18 10-35	7 4-12	4 3-8
Clorofila-a µg/l	3.8 2.2-6	0.59 0.34-1.1	2.3 1.2-5	0.35 0.25-0.5-

bilidad en los ecosistemas de L/BC (figura 5b). En relación con el amonio, la mayor concentración mediana se registro en los sistemas de L/BG, mientras que la menor lo fue en C/C. La mayor variabilidad se observó en la región C/G, registrándose diferencias significativas entre C/C y los demás tipos de

FIGURA 4. COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MEDIANAS Y VARIABILIDAD DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y OXÍGENO DISUELTOS ENTRE TIPOS DE ECOSISTEMAS DE REGIONES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN. LAGUNAS Y BAHÍAS DEL GOLFO (L/BG), LAGUNAS Y BAHÍAS DEL CARIBE (L/BC), COSTA DEL GOLFO (CG), COSTA DEL CARIBE (CC)



ecosistemas (figura 5c). El fosfato presenta una mayor concentración de referencia y variabilidad en los ecosistemas de L/BC, observándose diferencias significativas entre las regiones del Golfo y el Caribe (figura 6a). Por último, en el caso de los silicatos, el mayor valor de referencia y variabilidad se registró en los sistemas de L/BG, mientras que la menor se obtuvo en los de C/C. Diferencias significativas se observan entre los tipos de sistemas (lagunas/bahías mayores que en costa) (figura 6b).

Por lo que respecta a las concentraciones de clorofila-a (Cl-a), los valores de referencia más altos se observaron en los ecosistemas del Golfo, al igual que la mayor variabilidad. Las diferencias significativas en las concentraciones de Cl-a son entre ecosistemas del Golfo y el Caribe (figura 6c).

En cuanto a otros indicadores de eutrofización como la comunidad de fitoplancton y VAS. El diagnóstico se concentra en cuatro localidades del norte de Yucatán (Celestún, Sisal, Progreso y Dzilam), en donde estas variables han sido medidas regularmente en años recientes.

Respecto al fitoplancton, en Celestún la comunidad es dominada por diatomeas, seguida por dinoflagelados y cianobacterias. Los cambios interanuales se reflejan en un aumento de las especies de dinoflagelados y cianobacterias (figura 7a). Por lo que respecta a Sisal, la abundancia relativa es dominada por el grupo de las diatomeas; sin embargo, se observan cambios interanuales en los que han aumentado los grupos; dinoflagelados y clorofitas (figura 7b). En el caso de Progreso, la comunidad está domina-

FIGURA 5. COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MEDIANAS Y VARIABILIDAD DE NITRITO, NITRATO Y AMONIO ENTRE TIPOS DE ECOSISTEMAS DE REGIONES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN. LAGUNAS Y BAHÍAS DEL GOLFO (L/BG), LAGUNAS Y BAHÍAS DEL CARIBE (L/BC), COSTA DEL GOLFO (CG), COSTA DEL CARIBE (CC).

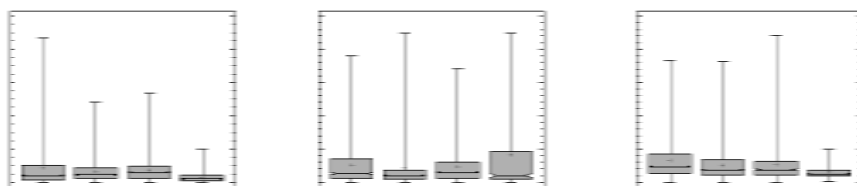
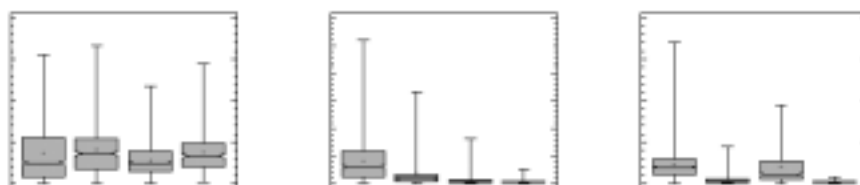


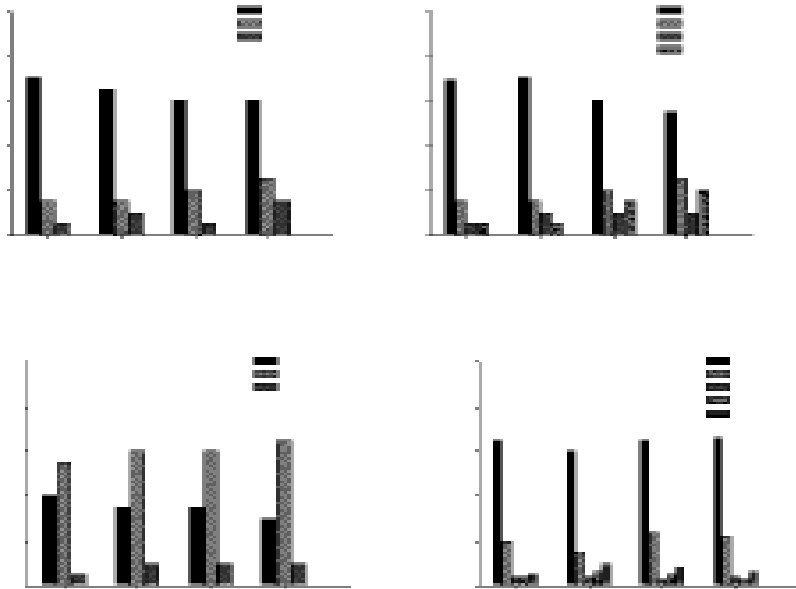
FIGURA 6. COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MEDIANAS Y VARIABILIDAD DE FOSFATO, SILICATO Y CLOROFILA-A ENTRE TIPOS DE ECOSISTEMAS DE REGIONES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN. LAGUNAS Y BAHÍAS DEL GOLFO (L/BG), LAGUNAS Y BAHÍAS DEL CARIBE (L/BC), COSTA DEL GOLFO (CG), COSTA DEL CARIBE (CC)



da por organismos representativos de los dinoflagelados, seguidos por las diatomeas, y no se observan diferencias interanuales significativas (figura 7c). Por lo que respecta a Dzilam, la comunidad está dominada por diatomeas seguida por los dinoflagelados; sin embargo, en esta localidad se observa un mayor número de grupos del fitoplancton como los de cianobacterias, clorofitas y criptofitas, y no se observan cambios interanuales (figura 7d).

Por lo que respecta a la vegetación acuática sumergida, el grupo dominante por su cobertura son los pastos marinos, siendo la especie más frecuente *Thalassia testudinum* (Aguayo 2003). Esta comunidad presenta dife-

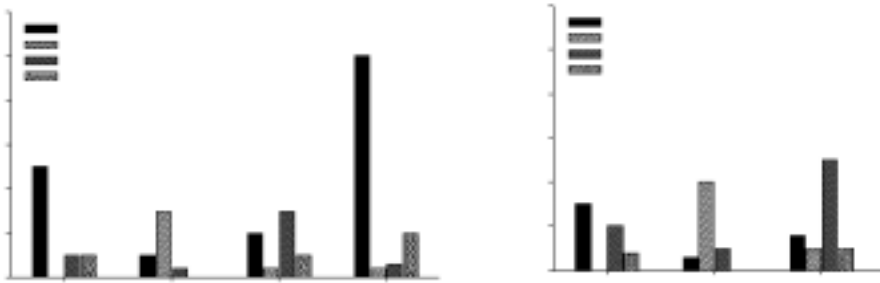
FIGURA 7. COMPOSICIÓN Y CAMBIOS INTERANUALES DE LOS GRUPOS DE FITOPLANCTON EN CUATRO LOCALIDADES DEL NORTE DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN



rencias entre sitios y se han observado cambios interanuales (figura 8). En Celestún el grupo dominante son los pastos, sin embargo, los cambios interanuales reflejan reducción en su cobertura, y aumento de las algas filamentosas. Respecto a la zona de Sisal, el grupo dominante son las algas rojas; interanualmente se observa aumento de este grupo. En la localidad de Progreso, las algas filamentosas es el grupo que domina la cobertura, y se observan cambios interanuales de aumento de ese grupo y reducción de los otros componentes. Por lo que respecta a Dzilam, los pastos marinos dominan la cobertura, sin embargo, se observa una disminución interanual.

Uno de los retos en la investigación y monitoreo de los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán, es el que se refiere a la variabilidad espacial de las características hidrológicas, debido a la forma en la que el

FIGURA 8. COBERTURA DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA SUMERGIDA Y CAMBIOS INTERANUALES EN LOCALIDADES DEL NORTE DE YUCATÁN. CELESTÚN (CEL), SISAL (SIS), PROGRESO (PRO) Y DZILAM (DZI)



agua dulce penetra en los ecosistemas costeros (descargas subterráneas) y a las diferencias que tienen estas descargas respecto a las de los ríos, en términos de su baja temperatura y carga de sedimentos (Herrera-Silveira 1994).

Para ello, se ha utilizado un equipo de mapeo sinóptico de calidad del agua que permite por una parte coleccionar gran cantidad de información, así como hacerlo en lapsos de tiempo muy breves, ya que el equipo está diseñado para detectar diferentes variables (temperatura, salinidad, transparencia y fluorescencia) a través de un sistema de flujo continuo y con la embarcación en movimiento. Si bien se cuenta con información para la mayoría de los sitios que se citan en el cuadro 1, aquí se presenta el análisis de una localidad que tiene importancia no sólo por sus ecosistemas costeros sino por su ubicación geográfica y repercusiones económicas, se trata de los polígonos del Parque Marino Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, en las costas de Quintana Roo (Herrera-Silveira *et al.* 2002b).

Los datos de los recorridos utilizando el "Dataflow IV", se presentan en las figuras 9, 10, 11 y 12. En este caso la frecuencia de muestreo fue de cada 10 segundos (aproximadamente cada 50 m), y corresponden a los años 2001 y 2002.

Lo primero que se observa es la alta variabilidad espacial que hay en algunas de las características, lo que demuestra que las aguas costeras de estos sitios (zonas arrecifales) consideradas como ambientalmente estables,

son más heterogéneas espacialmente de lo que se pensaba.

La temperatura fluctuó entre 21.6 °C y 36.34 °C (figura 9). El sitio con mayor variabilidad a nivel microescala espacial fue Punta Cancún, mientras que el de menor variabilidad fue Punta Nizuc. En relación con la salinidad ésta varió entre 28.2 y 36.8 (figura 10), presentando mayor heterogeneidad espacial a microescala espacial el polígono de Punta Nizuc. Por lo que respecta a la transparencia, la variación fue de 1.01 a 4.29 en un intervalo que va de 0 (aguas totalmente opacas) a 5 (aguas de transparencia completa) (figura 11). Esta variable fue más heterogénea en el polígono de Isla Mujeres y se observan diferencias interanuales. En relación con la fluorescencia como una medida de la Clorofila-a *in vivo*, esta variable se registró en un intervalo de 0.09 a 0.59 (figura 12), del intervalo 0 a 5 unidades de fluorescencia *in vivo*, con lo cual se confirma la tendencia oligotrófica de esas aguas. Sin embargo, su heterogeneidad espacial es muy alta principalmente en el polígono de Isla Mujeres, en esta misma localidad se observan diferencias interanuales.

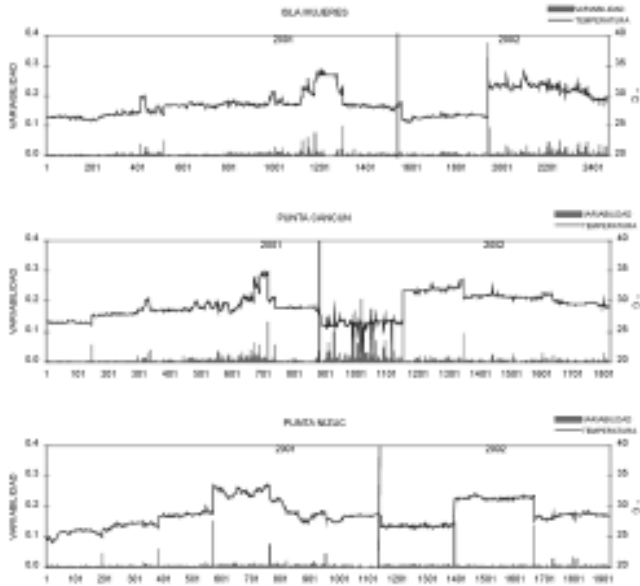
En cuanto al diagnóstico de la condición trófica de los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán, los resultados reflejan la condición inducida o cultural en cada sitio y no la natural de éste proceso. En la figura 3 se puede observar que sistemas como lagunas y bahías que presentan condiciones mesotróficas o eutróficas naturales, su estado como resultado del diagnóstico es clasificado como bueno, no así, el de sitios que a pesar de encontrarse en mares de naturaleza oligotrófica, sus síntomas de acuerdo con los indicadores de eutrofización los coloca en un estado clasificado como malo, habiendo un estado intermedio tipificado como regular.

Los resultados indican que los sistemas costeros de la Península de Yucatán se encuentran amenazados por la eutrofización cultural. Se observa, que este proceso está presente tanto en lagunas y bahías como en la costa.

En los ecosistemas costeros del Golfo de México, se observa que en el caso de Campeche las concentraciones de fosfatos, amonio y de clorofila-a son los síntomas más evidentes que dan como resultado que se le considere en un estado inicial de eutrofización, por lo que su condición es mala. En Celestún, la laguna se encuentra en buen estado de acuerdo con las características del agua a pesar de su condición mesotrófica natural. Sin embargo, en la costa los síntomas de eutrofización se observan en la comunidad del fitoplancton y en los pastos marinos, por lo que su estado mesotrófico permite clasificar a este ecosistema como un sitio en condición regular. Por lo que corresponde a Sisal, las concentraciones



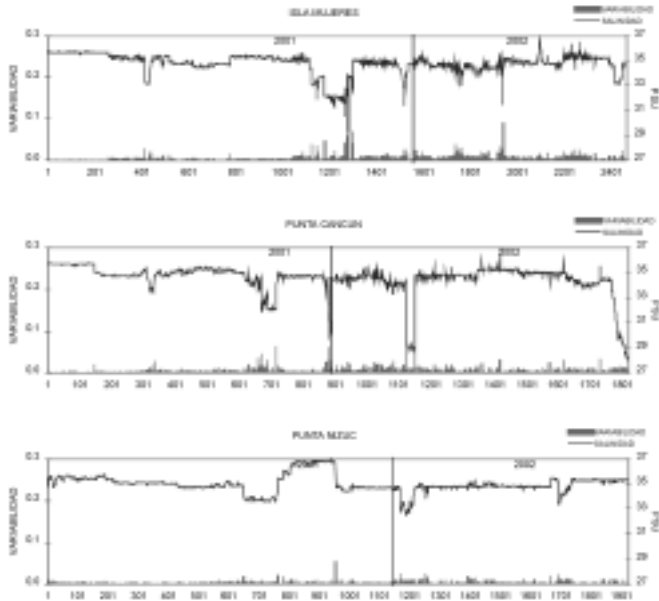
FIGURA 9. COMPARACIÓN TEMPORAL DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL A MICROESCALA DE LA TEMPERATURA EN LOS POLÍGONOS DEL PARQUE MARINO COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC



de amonio, fosfato, silicato y clorofila-a de la columna de agua, son los síntomas que indican un estado mesotrófico de esta localidad, por lo que su condición es regular. En el caso de Progreso, las condiciones hidrológicas, de fitoplancton y vegetación sumergida ocasionan que la laguna y la costa se encuentren en estados iniciales de eutrofización por lo que son clasificados en mala condición. En cuanto a la zona de Dzilam, si bien es un área reconocida como de alta productividad biológica, la información colectada de diferentes componentes indica que no hay síntomas de eutrofización cultural en la costa ni en la laguna, por lo que su condición es buena. En relación con el sistema lagunar hipersalino de Ría Lagartos y al marino-estuarino de Holbox, los indicadores de eutrofización cultural en estos sitios son bajos, por lo que se les clasifica en buena condición.

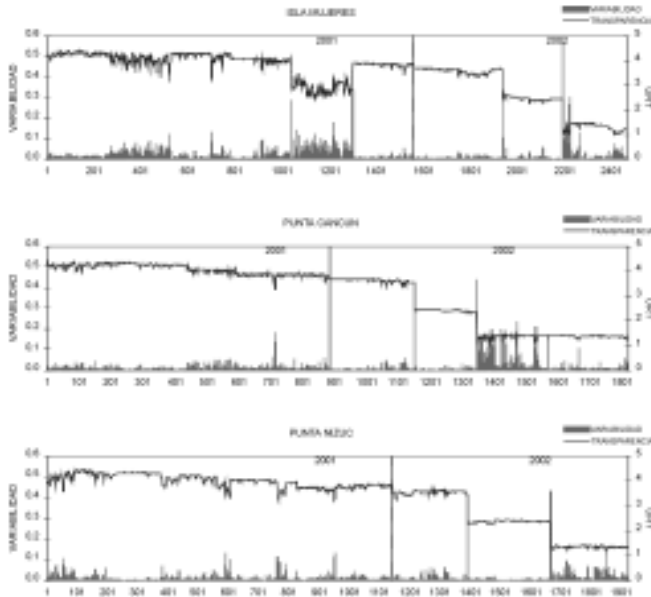
Respecto a los ecosistemas del Caribe, algunos de ellos presentan síntomas de eutrofización cultural. En la zona de Cancún que incluye Isla Muje-

FIGURA 10. COMPARACIÓN TEMPORAL DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL A MICROESCALA DE LA SALINIDAD EN LOS POLÍGONOS DEL PARQUE MARINO COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC



res hay condiciones en el agua y los pastos marinos que indican síntomas de eutrofización iniciales como en la laguna de Bojórquez y la laguna de Makax en Isla Mujeres, mientras que en las zonas costeras de mayor afluencia turística como Punta Nizuc y algunos sitios de Isla Mujeres su condición es regular. Por último, algunas áreas de estos mismos polígonos y el 90% del área de Punta Cancún se considera que están en buena condición. La costa de Playa del Carmen, presenta síntomas iniciales de eutrofización y se le considera que está en una condición regular. El área de bahía de Ascensión presenta condiciones hidrológicas y de pastos marinos que se pueden considerar como buenas; sin embargo, hay zonas aledañas al margen continental, a las áreas de pesca y al centro de población que presentan síntomas iniciales de cambio de estado trófico natural. Por último, la bahía de Chetumal es un sitio que presenta tanto buenas como malas condiciones respecto a los indicadores

FIGURA 11. COMPARACIÓN TEMPORAL DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL A MICROESCALA DE LA TRANSPARENCIA EN LOS POLÍGONOS DEL PARQUE MARINO COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC

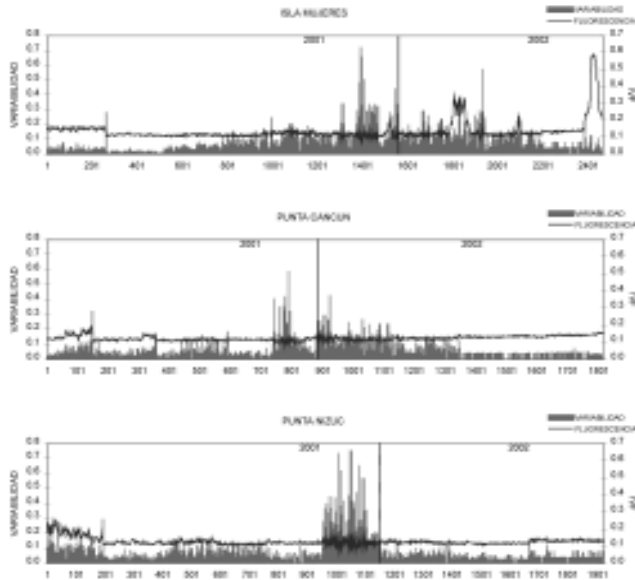


de eutrofización cultural. En áreas cercanas a la ciudad de Chetumal y desembocadura del río Hondo las condiciones de nutrientes, oxígeno disuelto y clorofila-a reflejan un estado de eutrofización inicial, mientras que hacia el interior las variables en general reflejan un buen estado.

## DISCUSIÓN

El análisis de los resultados indica que los síntomas del proceso de eutrofización en los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán se reflejan tanto en diferentes componentes de los ecosistemas costeros, como en diferentes escalas espaciales y temporales, por lo que la investigación y monitoreo de largo plazo son las estrategias que podrán seguir definiendo las condiciones de los ecosistemas bajo el análisis de los mejores indicadores

FIGURA 12. COMPARACIÓN TEMPORAL DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL A MICROESCALA DE LA FLUORESCENCIA EN LOS POLÍGONOS DEL PARQUE MARINO COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC



de cada tipo de ecosistema.

Las principales causas de la eutrofización de los ecosistemas costeros de Yucatán se relacionan con los efluentes de aguas residuales provenientes de desarrollos urbanos, turísticos, de la acuacultura, y de forma muy importante con la falta de sistemas de tratamiento de las aguas residuales de la industria agropecuaria (Reyes 2001; Herrera-Silveira *et al.* 2002). Sin embargo, las modificaciones en la hidrología e hidrodinámica de los ecosistemas costeros por obras de infraestructura portuaria tienen un impacto severo en los cambios de su estado trófico. Si bien todas estas causas no son particulares para los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán, en esta región del Golfo de México el problema de manejo se intensifica por la forma en que llega el agua dulce contaminada a la zona costera, por descargas no puntuales de agua subterránea haciendo muy difícil el saneamiento (Herrera-

Silveira *et al.* 2000, Medina-Chan 2003).

Por otra parte, la alta variabilidad espacial y temporal de los resultados indica la importancia de desarrollar valores de referencia específicos de los indicadores de eutrofización para cada tipo de ecosistema con base en series de tiempo, por lo que la normatividad en materia de calidad del agua costera debe ser revisada y adecuada. La sugerencia es que sea a nivel de los estados donde se desarrollen los criterios específicos; ésto es una estrategia aplicada en EE.UU. y en la Comunidad Europea (EPA 2001b, ICRAM 2000). El cuadro 2 es un punto de referencia que puede ser utilizado para definir los criterios “ad hoc” para cada tipo de ecosistema. Se sugiere que el marco conceptual y metodológico considere el concepto de cuenca hidrológica superficial y el subterráneo integrarlo a las características ecológicas que definen el funcionamiento de cada tipo de ecosistema, con lo cual la ecohidrología podría usarse como fundamento teórico de referencia.

Por lo que respecta al análisis de la variabilidad espacial a microescala, se puede observar en los resultados (figuras 9, 10, 11 y 12), que a pesar de lo relativamente pequeño que son los polígonos del Parque Marino de Cancún, el registro de las variables hidrológicas monitoreadas por el “DataFlow IV” es capaz de detectar diferencias espaciales, estacionales e interanuales, indicando que la estrategia de muestreo, así como el uso de este tipo de tecnología son apropiadas para determinar la variabilidad espacial de microescala. Adicionalmente, el tipo y cantidad de datos que se generan se presta para llevar a cabo análisis geoespaciales y probar hipótesis relacionadas con los procesos que influyen en la distribución espacial de variables físicas, químicas y biológicas. Por ejemplo, se podría identificar la extensión de la influencia de las descargas de agua dulce (pluma estuarina, pluma de sedimentos, alcance espacial de contaminantes), así como identificar el tamaño de los parches de fitoplancton, e incluso determinar la extensión de florecimientos algales nocivos; por otra parte, apoyaría la selección de sitios para el monitoreo.

Este tipo de información y análisis facilita la interpretación de las relaciones entre parámetros de calidad del agua y las características de la zona o cuenca de drenaje. Así mismo, facilita el seguimiento del éxito de las acciones de manejo y saneamiento del agua, además de que podría orientar el diseño de nuevos experimentos y planteamiento de nuevas hipótesis.

El análisis de resultados entre tipos de ecosistemas y regiones, indica que las lagunas y bahías son más variables hidrológicamente (figuras 4, 5 y 6); ésto es resultado de la interacción entre las descargas de agua dulce y su condición semicerrada, lo que favorece gradientes salinos tanto de tipo

estuarino como hiperhalino, y por lo tanto los procesos de importación/exportación y almacenamiento de nutrientes son altamente variables (Smith *et al.* 1999).

Un aspecto a resaltar es que si bien los resultados de salinidad y concentración de silicatos indican que los ecosistemas de la Península de Yucatán en la región del Golfo de México tienen mayor influencia de las aguas subterráneas, las concentraciones de nitrato y fosfato en los ecosistemas del Caribe son mayores (figuras 5 y 6), sugiriendo que los aportes de agua subterránea en estos ecosistemas llevan una mayor carga de nutrientes, poniendo en mayor riesgo de eutrofización a los ecosistemas de esta región. Estas observaciones abren preguntas que deberían ser abordadas de forma inmediata por la investigación, y se refieren al origen de los nutrientes, la trayectoria del agua del acuífero, y efectos de corto y largo plazo en diferentes componentes del ecosistema utilizando novedosas aproximaciones metodológicas como el uso de isótopos estables y tecnológicas como de equipos que midan estrés fisiológico (Ralph y Burchett 1995, Fourquaran *et al.* 1997, Durako y Kunzelman 2002). Estas nuevas aproximaciones brindan la oportunidad de llevar a cabo un diagnóstico y monitoreo que tenga como finalidad el manejo adaptativo de los recursos naturales.

Por lo que toca a las variables de fitoplancton y VAS, ambas han demostrado su utilidad al reflejar las diferencias hidrológicas en sitios que difieren en cuanto al tipo e intensidad de uso de los ecosistemas costeros (cuadro 1). Es por ello que han sido incluidas en los programas de monitoreo de ecosistemas costeros de diferentes latitudes (Hemminga y Duarte 2000, Livingston 2001).

En el caso de Celestún, la laguna está en buenas condiciones ambientales, sin embargo, la modificación artificial de la hidrodinámica a consecuencia de un puente-dique, podría favorecer la eutrofización acelerada de la zona interna. La zona costera presenta altas concentraciones de nitrato y fosfato, sugiriendo que los aportes de agua subterránea están enriquecidos probablemente por aguas residuales, lo cual podría estar influyendo en el cambio de las comunidades de fitoplancton (figura 7a). La vegetación de pastos marinos se ha visto reducida (figura 8), estos cambios podrían ser variaciones interanuales naturales (Zieman *et al.* 1999) o inducidas por el impacto de actividades pesqueras en zonas de baja profundidad (<2m) que provocan resuspensión de sedimentos y daño físico.

Por lo que respecta a Sisal, la mayor profundidad de la costa (>4m) es una condición que determina la mayor cobertura de algas rojas (figura 8), sin embargo, los cambios en las concentraciones de nutrientes producto de

los aportes de la actividad camaronícola, están teniendo efectos en zonas cercanas a la playa de uso turístico. Esta industria descarga sus aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento a la costa reflejándose en mayores concentraciones de nitrato, amonio, fosfato, silicato, materia particulada y clorofila-a (Reyes 2001), las consecuencias en la comunidad de fitoplancton apuntan a un aumento de dinoflagelados y clorofitas (figura 7b).

En relación a Progreso, la vegetación sumergida está compuesta principalmente de algas filamentosas (figura 8), lo que sugiere un estado de eutrofización más avanzado que los sitios anteriores. Por otra parte, la dominancia de dinoflagelados en el fitoplancton y el registro de especies típicas de florecimientos algales nocivos, es otro síntoma de cambio de estado trófico, esos eventos han sido más frecuentes en años recientes en las costas de Yucatán.

En Dzilam, si bien las condiciones generales del sitio sugieren que se encuentra en buen estado (figuras 7 y 8), habría que investigar y monitorear los factores asociados a los cambios interanuales en la cobertura de pastos marinos, y definir si es el resultado de procesos naturales o antrópicos.

Entre las acciones que se deberían emprender para mejorar o conservar la calidad del agua costera y no estimular el proceso de eutrofización en los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán, están el de contar con las plantas de tratamiento de aguas residuales de tipo convencional o mejorar las existentes, usar humedales naturales o contruidos de acuerdo con la carga orgánica, así como evitar las descargas clandestinas directas a los ecosistemas, y hacer uso de la ingeniería costera para mejorar la hidrodinámica en las zonas donde ésta ha sido severamente alterada

En el ámbito de la investigación queda mucho por hacer. En primera instancia aplicar la aproximación metodológica que aquí se presenta, en localidades donde se carece por completo de información. En el caso del monitoreo, es tiempo de contar con programas de investigación de ecosistemas costeros de largo plazo, como los hay para ecosistemas terrestres. Estos programas que son para ecosistemas específicos ofrecen la oportunidad de que a través de series temporales se determinen los patrones de comportamiento y los procesos que actúan a diferentes escalas de tiempo, y que son responsables del funcionamiento del ecosistema. Por último, para ambos casos (investigación y monitoreo) se sugiere integrar nuevas tecnologías de análisis de toma de datos y análisis de los mismos como por ejemplo, isótopos estables, biomarcadores morfométricos y fisiológicos en pastos marinos y análisis geoespaciales entre otros.

La información más reciente indica que los ecosistemas costeros de la Península

la de Yucatán están hidrológicamente controlados por las descargas de agua subterránea y las interacciones costa-océano, lo que hace ser hidrológicamente heterogéneos, característica que se relaciona con factores locales como:

- a) número y distribución de las descargas subterráneas
- b) frecuencia e intensidad de eventos naturales (“nortes”, huracanes, tormentas)
- c) frecuencia e intensidad de las precipitaciones (pulsos de descargas de agua dulce)
- d) tipo e intensidad de las actividades antrópicas (aguas residuales urbanas, agropecuarias, industriales, de acuicultura, así como modificaciones a la hidrodinámica y cambios en el tiempo de residencia del agua).

Todos estos factores tienen relación con la vulnerabilidad de los ecosistemas al modificar su estado trófico y desencadenar diferentes síntomas de eutrofización. Por lo que en el análisis y monitoreo de este proceso se deben integrar además de las variables físicas y químicas del agua, las características del fitoplancton y de la VAS, considerando aspectos que van desde los fisiológicos hasta los de la comunidad, lo que permitiría definir la salud de los ecosistemas y las medidas para mantenerla o mejorarla.

La información que se ha presentado, refleja que en los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán existen ya consecuencias ecológicas de la eutrofización cultural. Las recomendaciones son que se reconozca que este problema es una realidad y se puedan poner en marcha programas de largo plazo relacionados con la conservación y usos de los recursos naturales de la franja costera, ya que el no actuar ahora en los aspectos de gestión, investigación y monitoreo de la eutrofización de los ecosistemas de la Península de Yucatán, traería entre otras consecuencias impactar en lugar de conservar, remediar en lugar de prevenir, explotar en lugar de aprovechar, haciendo aún más lejana la meta del manejo integrado de la zona costera del Golfo de México.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido el resultado del esfuerzo de un gran número de personas e instituciones. Se agradece la colaboración de los auxiliares y estudiantes del laboratorio de Producción Primaria del CINVESTAV-IPN Unidad Merida, en especial a Javier Ramírez, Arturo Zaldivar, Mireya Aguayo, Israel Medina,



Ivan Medina, Fedro Tapia, José Sima, Manuel Reyes, Reyna Colli, Leonardo Arellano, Jorge Trejo, Octavio Gómez y Gabriel Borges. También la colaboración del personal de la Estación de Investigación Oceanográfica de la Secretaría de Marina en Progreso y a los miembros de las Áreas Naturales Protegidas de Cancún, Contoy y Sian ka'an. Un reconocimiento especial a todos los pescadores que nos han enseñado muchas cosas sobre los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán. El financiamiento ha provenído del CONACYT (PO20COOR; 4147PT; 32356T; SISIERRA-2000-07-06-15), CONABIO (B019; M011; S004) y CINVESTAV-IPN Unidad Merida.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, M. 2003. Variabilidad de la vegetación acuática sumergida de la costa norte de Yucatán como indicador de la calidad del agua costera. Tesis de maestría. CINVESTAV-IPN Unidad Merida, México.
- Bianchi, T.S., Pennock, J.R., and Twilley, R.R. 1999. Biogeochemistry of Gulf of Mexico Estuaries: Implications for management. En: Bianchi, T.S., Pennock, J.R. y R.R. Twilley. *Biogeochemistry of Gulf of Mexico Estuaries*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Boyer, J. N., Fourqurean, J.W. y R.D. Jones. 1997. Spatial Characterization of Water Quality in Florida Bay and Whitewater Bay by Multivariate Analyses: Zones of Similar Influence. *Estuaries* 20(4): 743-758.
- Bricker, S.B., Clement, C.G., Pirhalla, D.E., Orlando, S.P. y D.R.G. Farrow. 1999. National estuarine eutrophication assessment: Effects of nutrient enrichment in the Nation's estuaries. NOAA, *National Ocean Service, Special Projects Office and the National Center for Coastal Ocean Science*. Silver Spring.
- Capurro, F.L., Euán-Avila, J., y Herrera-Silveira, J.A. 2002. Manejo sustentable del ecosistema costero de Yucatán. *Avance y Perspectiva* 21:195-204.
- CNA, 2000. *Ley de aguas nacionales y su reglamento*. Comisión Nacional del Agua. México.
- Durako, M.J., y J.I. Hunzelman 2002. Photosynthetic characteristics of *Thalassia testudinum* measured in situ by pulse-amplitude modulated (PAM) fluorometry: methodological and scale-based considerations. *Aquatic Botany*, 73:173-185. Elsevier.
- EPA 1999. Ecological Condition of Estuaries in the Gulf of Mexico. EPA 620-R-98-004. *U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Gulf Ecology Division, Gulf Breeze, Florida*.
- 2001. Nutrient criteria. Technical guidance manual. Estuarine and coastal waters.

- Environmental Protection Agency. Office of Water. EPA-822-B-01-003. Washington, DC
- 2001b. National coastal condition report. Environmental Protection Agency Office of research and development. EPA-620/R-01/005. Washington, DC.
- Euan-Avila, J.I y G.S. Witter 2002. Promoting Integrated Coastal Management in the Yucatan Peninsula, México. *Journal of Policy Studies*, 12:1-16.
- Fourqurean, J.W., Moore, T.O., Fry, B. y .J.T. Hollbaugh 1997. Spatial and temporal variation in C:N:P ratios 15N 13C of eelgrass *Zostera marina* as indicators of ecosystem processes in Tomales Bay, California USA. *Marine Ecology Progress Series*, 157:147-157.
- Fourqurean, J.W., Durako, M.J., Hall, M.O., and Hefty, L.N. 2002. Seagrass distribution in south Florida: a multi-agency coordinated monitoring program. Pp:497-522. En: Porter, J.W. y K.G. Porter. *The Everglades, Florida Bay and coral reefs of the Florida Keys*. CRC Press, Boca Raton.
- Hemminga, A.A. y C.M. Duarte 2000. *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press, United Kindom.
- Herrera-Silveira, J.A. 1994. Spatial and temporal patterns in a tropical coastal lagoon with groundwater discharges. *Journal of Coastal Research* 10 (3): 738-746.
- Herrera-Silveira, J.A. y Comín, F.A. 2000. An Introductory account of the types of aquatic ecosystems of Yucatan Peninsula (SE Mexico). 213-227pp. En: M. Munawar, S.G. Lawrence, I.F. Munawar y D.F. Malley (eds.). *Ecovision World Monographs Series. Aquatic Ecosystems of Mexico: Status & Scope*. Backhuys Pub. Leiden, Netherlands.
- Herrera-Silveira J.A, Medina G.I y R. Colli 2002. Trophic Status on nutrient concentrations scales and primary producers community of tropical coastal lagoons influenced by groundwater discharges. *Hydrobiología* 476/476:91-98.
- Herrera-Silveira J.A, Medina-Gómez I, Aranda-Cirerol N, Zaldivar JA, Ramírez J, Trejo J. 2002b. Trophic status in coastal waters of the Yucatán Península (SE, México) using water quality indicators. En: Brebia C.A. (ed.). *Environment Problems in Coastal Regions IV*. Wit-Press, Southampton, Boston, pp. 351-359.
- ICRAM. 2000. Qualità Degli Ambienti Marini Costieri Italiani. 1996-1999. *Valutazione Preliminare del Monitoraggio Realizzato in Cnvezione con le Rewgioni Costieri*. Ministero dell' Ambiente. Sevizio Difesa Mare, Italia.
- Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C. y S.W. Wright 1997. *Phytoplankton pigments in oceanography*. Monographs on Oceanographic Methodology, UNESCO, Paris.
- Karydis M., Ignatiades L. y N. Moschopoulou 1983. An Index Associated with Nutrient Eutrophication in the Marine Environment. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 16: 339-344.
- Livingston, R.J. 2001. Eutrophication processes in coastal systems: origin and succession

- of plankton blooms and effects on secondary production in Gulf Coast estuaries. *CRC Press*, Boca Raton.
- Madden, C.J., and Day Jr, J.W. 1992. An instrument system for high speed mapping of chlorophyll and physico-chemical parameters. *Estuaries* 15(3).
- Medina-Chan, I. 2003. Efectos de una construcción en mar sobre la hidrología y estado trófico de la columna de agua: El caso del Puerto de Altura de Progreso. Tesis de Maestría, CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida. México.
- Merino, M., González, A., Reyes, E., Gallegos, M y Czitrom, S. 1992. Eutrophication in the lagoons of Cancún, México. *Science of the Total Environment*. Supplement, pp. 861-870.
- Parsons, T.R. Maita, Y. y C.M. Lalli 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Ralph, P.J. y M.D. Burchett 1995. Photosynthetic response of the seagrass *Halophila ovalis* (R. Br.) Hook. f. to high irradiance stress, using chlorophyll a fluorescence. *Aquatic Botany* 51: 55-56.
- Reyes, E. y M. Merino. 1991. Diel dissolved oxygen dynamics and eutrophication in a shallow, well-mixed tropical lagoon (Cancun, Mexico). *Estuaries* 14(4):372-381.
- Reyes A. R.. 2001. Hidrología y estado trófico de la columna de agua de la zona marina costera de Sisal, Yucatán. Tesis de Maestría. *Instituto Tecnológico de Mérida*, México.
- Rivera-Arriaga, E., and Villalobos G. 2001. The coast of México: approaches for its management. *Ocean & Coastal Management*, 44:729-756.
- Smith, S.V., Marshall J, . Crossland, I. and Crossland, C.J. 1999. Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), *LOICZ Reports & Studies No. 13*, Texel, The Netherlands.
- Troccoli L. 2001. Efecto de los afloramientos de agua dulce en la estructura del fitoplancton: patrones espaciales y temporales Tesis doctoral, Ciencias Marinas, CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, México.
- Urban E.R., Mallory L., and Taylor, C. 1996. Priorities for Coastal Ecosystem. Science. Committee to Identify High-priority Science to Meet National Coastal Needs Ocean Studies Board Commission on Geosciences, Environment, Resources National Researcher Council., Washington, D.C.
- Zieman, J. Fourqurean, J.W., and Frankovich, T. 1999. Seagrass die-off in Florida Bay: long-term in abundance and growth of turtle grass *Thalassia testudinum*. *Estuaries*, 22(2b): 460-470.

