

Fluctuación diaria del nivel hidrostático en petenes de la cuenca costera noroccidental del estado de Yucatán: efecto del desazolve y la canalización de manantiales

José Luis Febles Patrón
Eduardo Batllori Sampedro

Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados, Mérida

Se evalúa el efecto del desazolve de manantiales en el petén (islote de vegetación arbórea que se encuentra inmerso en una zona inundable) Elepetén y de un canal en el petén Tzintzín sobre la fluctuación diaria de su nivel hidrostático, como parte de las actividades de restauración que se efectúan en la Reserva Estatal El Palmar-Yucatán. Las observaciones se realizaron en diferentes puntos y en ciclos de 24 hrs durante los que se verificaron el nivel del agua, cada dos horas y su temperatura y salinidad cada cuatro horas. Los tres primeros periodos de observación se llevaron a cabo antes, durante y después del desazolve de manantiales en el Elepetén; el cuarto ciclo se realizó simultáneamente en el Elepetén (sin canal) y el Tzintzín (con canal). Los ciclos relativos al desazolve de manantiales se documentaron en condiciones similares de marea. Después del desazolve se registró un aumento en el nivel hidrostático del Elepetén que significó un mayor flujo de agua hacia la ciénaga y una disminución en la salinidad de la misma, principalmente durante la pleamar. El efecto del canal en el Tzintzín está representado por una menor respuesta hidráulica del manantial a la marea y un abatimiento del nivel hidrostático en el petén. Esta situación provoca, principalmente en bajamar extrema, la entrada de agua de la ciénaga al manantial elevando la salinidad y temperatura del agua. La mayor energía hidráulica obtenida en el Elepetén después del desazolve de manantiales (indicado por un mayor flujo de agua), podría relacionarse posteriormente con una mayor productividad de la comunidad biótica y un desarrollo más acelerado del suelo. Por el contrario, el abatimiento en el nivel hidrostático del Tzintzín y la entrada de agua más salada al manantial, podrían ocasionar la erosión del suelo y la pérdida de especies endémicas de peces. En base a este estudio, se recomendó no abrir los antiguos canales de los petenes de la zona y cerrar los canales de los petenes Dzúlá, Tzintzín, Lagartero y Bolón, abiertos durante las acciones de restauración.

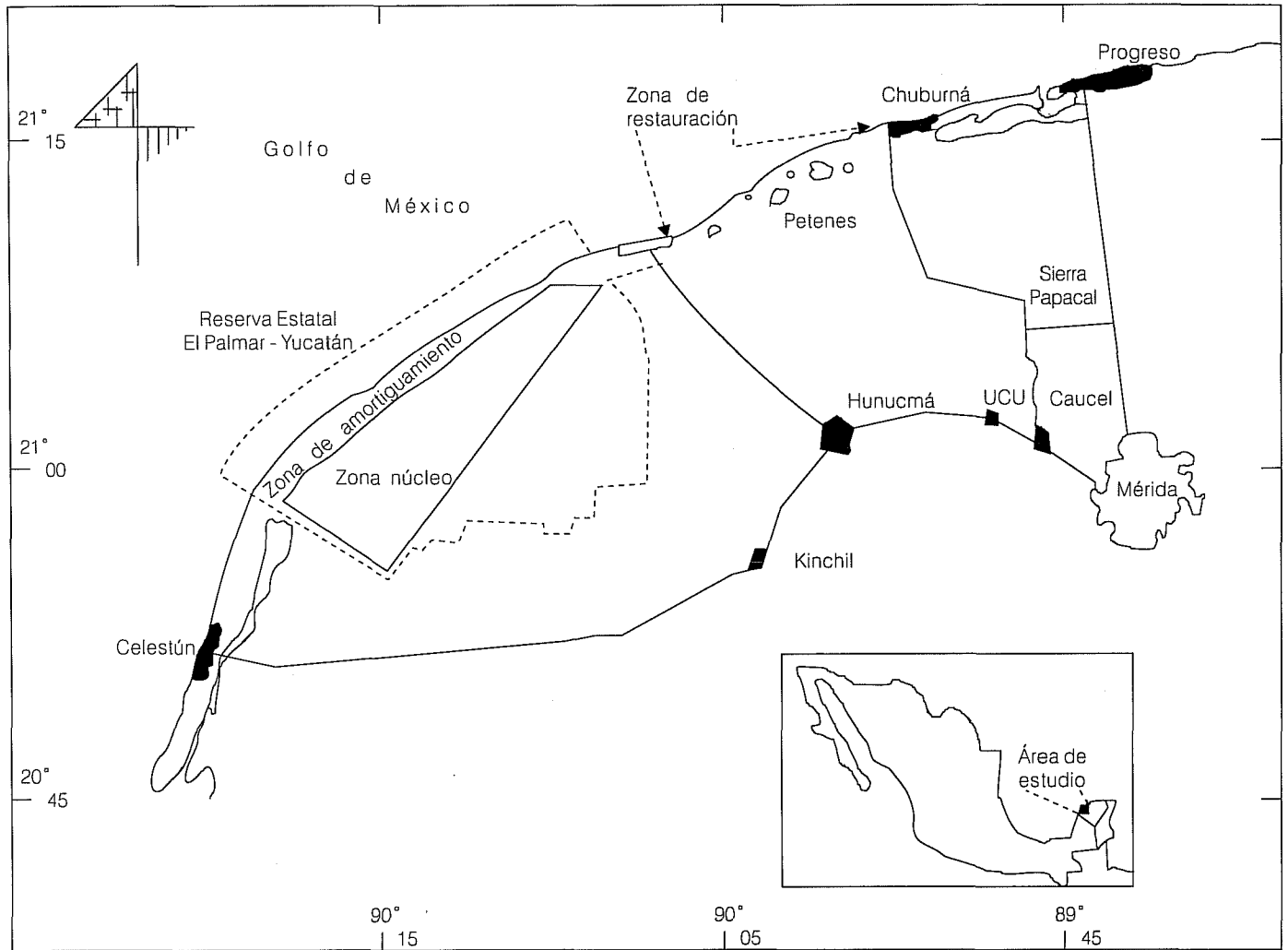
Palabras clave: petén, manantial, desazolve, canalización, nivel hidrostático, Elepetén, Tzintzín, zona de restauración de la Reserva Estatal El Palmar-Yucatán.

Introducción

La península de Yucatán presenta una hidrología particular por su naturaleza cárstica y su origen geológico. Si bien estas características no permiten escurrimientos superficiales existe un acuífero subterráneo que desemboca en las zonas costeras y litorales en forma de manantiales y cenotes. Esta afluencia de agua provoca la transformación de las depresiones geológicas costeras en ciénagas, marismas y lagunas costeras (Perry *et al.* 1989).

En el lindero oriental de la Reserva Estatal El Palmar-Yucatán dentro del área de restauración localizada entre los puertos de Sisal y de Chuburná, existe una zona de marisma con una superficie estimada en 5 200 ha (ilustración 1) y una longitud aproximada de 26 km y un ancho variable de 1 a 2 km. Limita al este con la carretera Chuburná-Sierra Papacal y al oeste con la carretera Sisal-Hunucmá. En esta zona el huracán Gilberto abrió dos bocas en la barra arenosa —la de La Carbonera y la de Chuburná que actualmente es utilizada como puerto de abrigo— que permiten un apor-

1. Localización del área de estudio



te de agua de mar y de sedimentos marinos a la ciénaga, alterando las características fisicoquímicas del área. También se presentan aportes de agua salada, procedentes del puerto de abrigo de Yucalpetén, que se infiltran a través de las alcantarillas de la carretera a Sierra Papacal.

Batllori (1991) menciona que en esta zona las altas salinidades han provocado, principalmente en el manglar de cuenca, una pérdida de 260 ha por año en el lapso de 1979 a 1984, y agrega que esta perturbación ha llegado a la Reserva Estatal El Palmar-Yucatán donde se ha cuantificado un deterioro de más de 70 ha de manglar, al poniente de Sisal, que es necesario controlar. El principal flujo de agua en la ciénaga de Sisal se lleva a cabo a través de sus diversos manantiales y de las bocananas al mar. Sin embargo, en varios puntos

el aporte de agua dulce ha disminuido drásticamente e incluso ha desaparecido debido a procesos de azolvamiento, mientras se han incrementado las comunicaciones permanentes al mar.

Dos ejemplos del impacto que ocasionan ciertas actividades humanas en los ecosistemas costeros de Yucatán son la construcción de la carretera que une Mérida con Progreso, así como la dársena de Yucalpetén en Progreso, construida entre 1967 y 1968.

Zizumbo (1986) afirma que la construcción de la dársena ha ocasionado una entrada permanente de agua de mar y un azolve progresivo de los manantiales costeros. El aporte constante de agua salada proveniente del mar, el casi nulo aporte de agua dulce, la alta evaporación y la poca profundidad de la laguna, han ocasionado cambios en la salinidad (alta y

constante todo el año) y con ello la muerte y migración de la biota acuática original. Por otro lado, el autor menciona que la alta evaporación registrada en la zona tiende a concentrar la salinidad dentro de la laguna, por lo que las fuentes de agua dulce adquieren mayor importancia en el mantenimiento de las aguas a niveles de salinidad que permitan el desarrollo de vida.

Entre las acciones del Plan de Manejo Integral de la Zona Costera del Estado de Yucatán (CECE, 1991), encaminadas a la recuperación de la ciénaga que corre a lo largo del litoral, destaca el desazolve de fuentes de agua dulce, como los manantiales que se encuentran en los petenes de la zona, con la finalidad de aumentar el flujo hacia el sistema.

El desazolve de los manantiales consiste en la extracción de cualquier partícula u objeto como troncos, hojas y lodo, que impida emerger a la superficie el flujo de agua proveniente del subsuelo.

Las acciones de restauración realizadas hasta la fecha en la zona de influencia oriental de la Reserva Estatal El Palmar-Yucatán son la construcción de un bordo de alivio al poniente de la boca la Carbonera en Chuburná Puerto, la canalización de un borbollón de

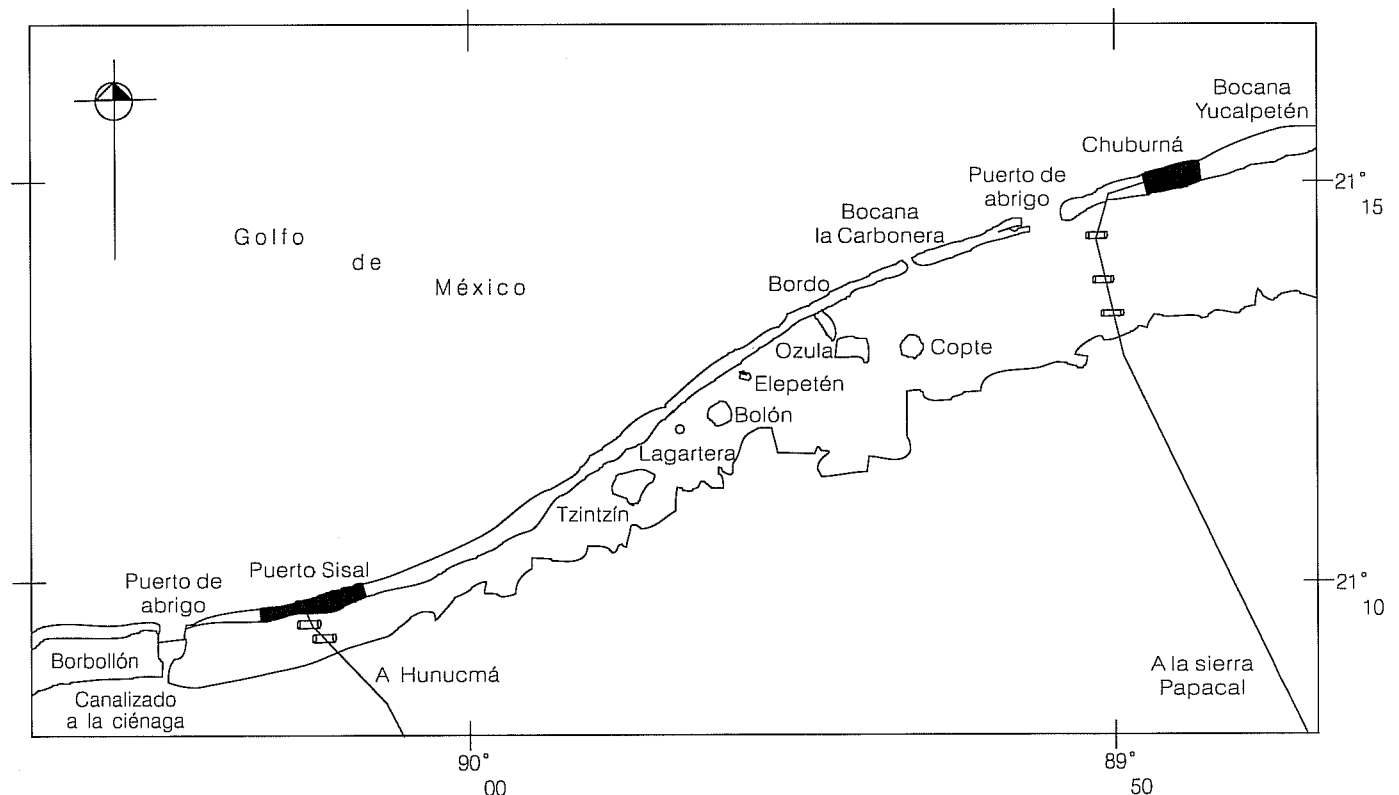
agua dulce dentro del puerto de abrigo de Sisal hacia la ciénaga baja, y el desazolve y canalización del manantial de los petenes Dzúlá, Tzintzín, Bolón y Lagartero (ilustración 2).

Durante el desazolve y canalización del petén Dzúlá en febrero de 1992, se observó que al disminuir el nivel del manantial, al momento de la baja mar, recibía agua de la ciénaga y con ello incrementaba su salinidad de 2 hasta 14 o/oo, misma que descendió gradualmente conforme la marea aumentaba y el manantial comenzaba a verter hacia la ciénaga.

Posteriormente, durante el desazolve y la canalización del manantial del petén Tzintzín en julio de 1992, se registró una corriente en dirección a la ciénaga. Sin embargo, cinco meses después se observó que la dirección de la corriente se había invertido, es decir, entraba agua de la ciénaga al manantial del petén incrementándose su salinidad hasta en 14 partes por mil (Batllori, *et al.* en preparación).

Como se desconoce el efecto que ocasionan el desazolve de manantiales y la canalización del agua hacia la ciénaga en la hidrodinámica de petenes, se sugirió no abrir los canales sino únicamente desazolver los manantiales. En este estudio se observa el

2. Zona de restauración



efecto del desazolve de manantiales en el Elepetén sin canalizar el agua a la ciénaga y el efecto de un canal de drenaje en el Tzintzín, sobre la fluctuación diurna del nivel hidrostático de los mismos.

Área de estudio

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen modificada por García (1978), el clima predominante en el área de estudio corresponde al subtipo de clima seco muy cálido *BSo (h')w''(x')* que ocupa una pequeña extensión colindante con la línea de costa de la porción noroccidental de la entidad, entre las localidades de Sisal y de Telchác Puerto. Esta zona climática se distingue por ser de las menos calurosas durante el verano por su muy ligero descenso térmico en la estación invernal que la define como una zona cálida isotermal. Se caracteriza porque además de que su monto anual de precipitación es escaso y se concentra predominantemente en la época de lluvias regulares de junio a septiembre, también registra una importante aportación pluvial en la época de *nortes* de octubre a enero, la cual disminuye el notable contraste estacional que se da en los climas con régimen de lluvias típicamente de verano. En el área que le corresponde la temperatura media anual varía entre 25.5 y 26.5°C y la precipitación total en el año de entre 450 y 580 mm aproximadamente, con un porcentaje de lluvia invernal entre 10.5 y 12 mm. La variación anual de las temperaturas medias mensuales oscila entre 4 y 5°C. En esta zona la evaporación excede a la precipitación pluvial por lo que se considera como una región semiárida (Duch, 1988). Ver cuadro 1.

Entre la duna costera y la planicie cárstica el acuífero yucateco se confina por una capa de calcita precipitada por evaporación que es prácticamente imper-

meable (su porosidad es < 1%) y actúa como una barrera que impide el movimiento del agua subterránea hacia el mar (Perry *et al.*, 1989), de esta manera los manantiales costeros de las áreas palustres (petenes) representan los principales accidentes del acuitardo costero (Marín, 1988).

Algunos petenes presentan un gran manantial en su parte central, en otros sólo se manifiestan pequeños afloramientos de agua dulce a través del suelo y algunos carecen de estos afloramientos (Durán, 1987). Los petenes ubicados en el área de Sisal presentan al menos un manantial; asimismo, se encuentran surcados por antiguos canales en avanzado estado de azolvamiento. Antes de la llegada de los europeos, los mayas en la península de Yucatán ocupaban los petenes para habitaciones y para hacer huertas (Barrera, 1982).

Con la llegada de los europeos a Campeche y Quintana Roo empezó la explotación del palo de tinte *Hae-matoxylon campechianum*, entre otros productos, para satisfacer mercados europeos y recientemente, la caza de los cocodrilos por la piel y la carne de la cola (Olmsted y Durán, 1989). Es por esto que los petenes están comunicados entre sí por veredas o por largos y angostos canales rectilíneos, trazados en el fondo de la ciénaga misma.

Las características edáficas y de la comunidad vegetal de los petenes son el resultado de la expresión de un fenómeno geohidrológico típico de la costa yucateca: los manantiales. Asimismo, del comportamiento de los manantiales depende la hidrodinámica de los petenes con manantial, la cual determina de manera importante las condiciones hidrológicas del petén, y a su vez, influencia las características bióticas de la comunidad (Trejo-Torres, 1993).

En la comunidad vegetal de los petenes, el relativo bajo número de especies vegetales y el fuerte dominio de algunas de ellas muy probablemente se encuentran relacionados con la existencia de factores limitantes del medio. El hidromorfismo del suelo restringe la posibilidad de desarrollo a aquellas especies capaces de soportar el exceso de humedad. Por otra parte, la posible ocurrencia de agua salada o salobre, por la intrusión de agua salina a través del manantial, podría constituir otro factor limitante para el establecimiento y desarrollo de muchas especies vegetales.

Una vez establecidas aquellas especies favorecidas por estos factores limitantes para otras, la abundancia de ciertos recursos como la disponibilidad continua de agua y los suelos orgánicos con gran cantidad de nutrientes disponibles, explican la prevalencia y el buen desarrollo de las especies establecidas tanto en altura como en el diámetro de los fustes (Trejo-Torres, 1993). La exuberancia de la vegetación única-

1. Principales características térmicas y pluviales en los puertos de Sisal y de Progreso. Subtipo climático: *BSO(h')w''(x')*

		Sisal	Progreso
Temperatura media	Anual	25.7	25.5
	Mensual más alta	27.7 mayo	27.1 junio
	más baja	22.7 enero	22.9 enero
Precipitación media	Anual	576.3	444.0
	Mensual más alta	106.7 septiembre	84.1 septiembre
	más baja	4.3 agosto	8.1 marzo
Lluvia invernal (%)		11.4	10.4

mente se explica por la constante y abundante humedad aportada por el manantial del petén.

En general, los suelos de los petenes son de naturaleza orgánica y son conocidos como histosoles. Son suelos que se desarrollan sobre depósitos profundos de materiales de sedimentación palustre típicos de estas áreas inundables. Estos suelos se mantienen siempre húmedos aun cuando no se inundan, ya que sus niveles freáticos se encuentran muy cercanos a la superficie. También presentan contenidos de materia orgánica muy elevados, por lo regular superiores al 20%, que se forman debido a la acumulación de residuos de tejidos vegetales y animales sobre la superficie rocosa o de cualquier otro suelo mineral (Duch, 1988).

El petén Elepetén se ubica geográficamente entre las coordenadas 21° 12' 00" de latitud norte y 89° 56' 50" de longitud oeste entre Sisal y Chuburná, a 14.2 km de Sisal y a 534 m de la playa; presenta un diámetro de 0.25 km. El petén Tzintzín se encuentra entre las coordenadas geográficas 21° 11' 31" de latitud norte y 89° 57' 10" de longitud oeste, a 9 km al noreste de Sisal y a 700 m de la línea de costa; tiene un diámetro de 1 km en dirección este-oeste y de 0.7 km de norte a sur (ilustración 2).

Métodos

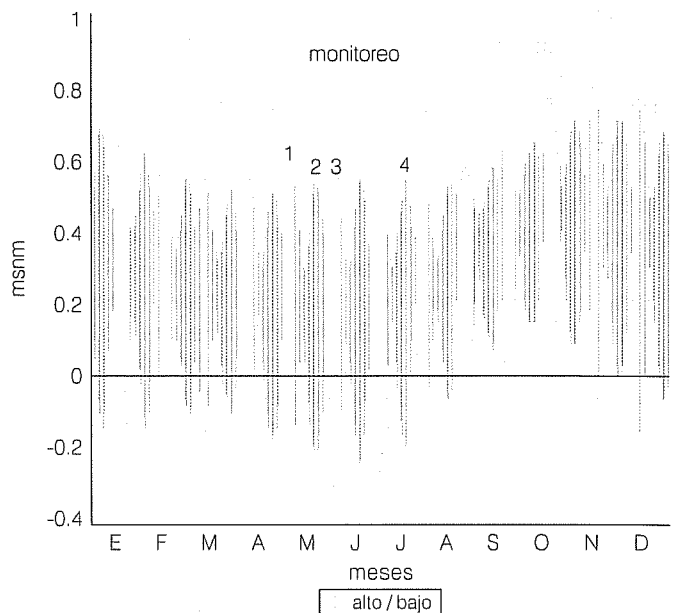
Para conocer el efecto del desazolve en el nivel hidrostático del Elepetén se acordó mantener cerrado el antiguo canal y desazolver dos manantiales ubicados en el centro del petén. Se realizaron tres monitoreos en ciclos de 24 hrs como sigue:

- Antes del desazolve del 6 al 7 de mayo de 1993
- Durante el desazolve del 22 al 23 de mayo de 1993
- Después del desazolve, del 4 al 5 de junio de 1993

Los monitoreos se realizaron en condiciones similares de marea viva para evitar la influencia de ésta en la interpretación del efecto del desazolve de manantiales. Posteriormente, del 18 al 19 julio de 1993, se realizó un monitoreo simultáneo en los petenes Elepetén (no canalizado) y Tzintzín (canalizado) en condiciones de marea viva, para evaluar el efecto del canal en el petén Tzintzín.

De acuerdo a la metodología utilizada por Batllori, *et al.* (1993) y Trejo-Torres (1993), se atravesó el Elepetén de norte a sur y se ubicaron 10 estaciones de muestreo de tal manera que la 1 y la 10 correspondieran a la ciénaga y la 5 y la 6 a los manantiales. En donde fue necesario se cavaron pocetas hasta interceptar la tabla de agua y se instalaron balizas de madera gra-

3. Marcha anual de la marea en el puerto de Progreso (1993); (1) antes, (2) durante y (3) después del desazolve de manantiales en el Elepetén. (4) Monitoreo simultáneo en el Elepetén y el Tzintzín



Fuente UNAM, 1993

duadas con una distancia aproximada de 20 m entre cada estación.

En cada punto de observación se registró el nivel de agua —midiendo con una cinta métrica la distancia que se establecía a partir de una marca fija hasta el espejo de agua— cada dos horas durante un ciclo de 24 horas, antes, durante y después del desazolve de los manantiales. También se realizó un perfil topográfico desde la playa cruzando el petén hasta la ciénaga del lado sur.

Por otra parte, para referir las variaciones observadas en la tabla de agua a un punto fijo, en las balizas se instaló una cota referida al nivel medio del mar. Lo anterior se realizó mediante un nivel automático Roosbach NA-2 tomando como referencia el punto de control más próximo al petén (INEGI, 1991).

En el petén Tzintzín se ubicaron seis estaciones de las cuales la 6 correspondió a la ciénaga y la 1 al manantial, de igual manera que en el Elepetén se cavaron pocetas donde fuera necesario para interceptar la tabla de agua y se instalaron balizas en cada punto. Durante este monitoreo simultáneo se instaló una baliza en el mar para observar la confiabilidad de la predicción de marea utilizada en los monitoreos anteriores.

En el canal del petén Tzintzín se registró la dirección y la velocidad de la corriente cada dos horas calcu-

lando el área transversal de un segmento del canal para estimar el volumen de agua transportada.

La salinidad del agua se registró mediante un refractómetro de mano Atago S-28. Las mediciones se realizaron en cada punto de observación de la tabla de agua cada cuatro horas durante un ciclo de 24 horas antes, durante y después del desazolve en el Elepetén, así como durante el monitoreo comparativo en el Elepetén y el Tzintzín. También se realizó un registro de la temperatura del agua en las estaciones 1 (ciénaga lado norte), 3 y 5 (manantial). Las mediciones se tomaron cada dos horas durante los tres monitoreos mencionados anteriormente en ciclos de 24 hrs, utilizando un termómetro de mano Brannan de escala de -20 a 110°C. (modelo 76 MM IMM). Se realizó una recopilación de algunos parámetros climáticos tales como: precipitación pluvial, presión atmosférica y evaporación, registrados en el Observatorio Meteorológico

co del puerto de Progreso, antes y después del desazolve de manantiales en el Elepetén.

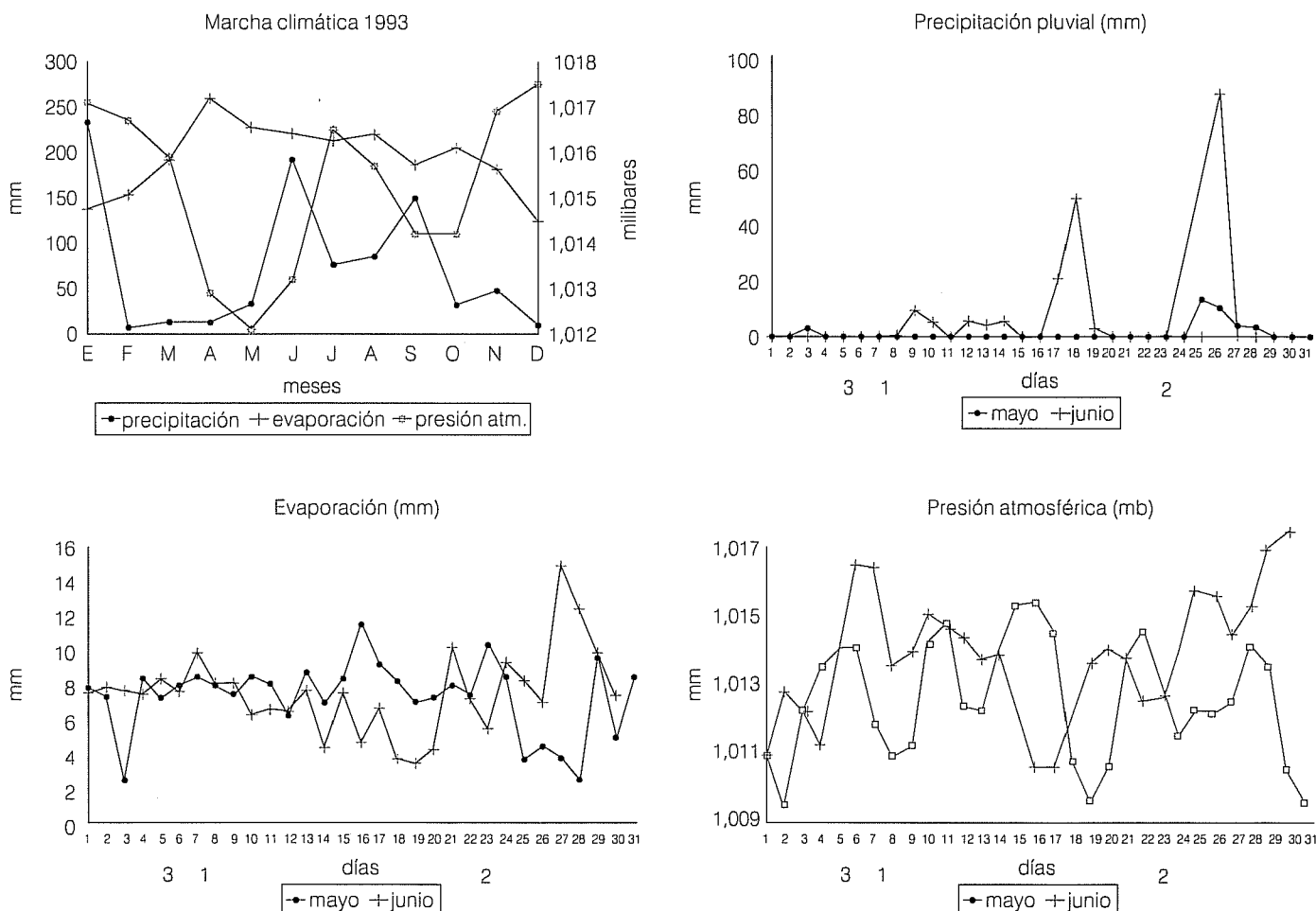
Resultados

Las condiciones climática imperantes durante los monitoreos fueron características del final de la temporada de secas (mayo) y principios de la temporada de lluvias (junio), (ilustración 4).

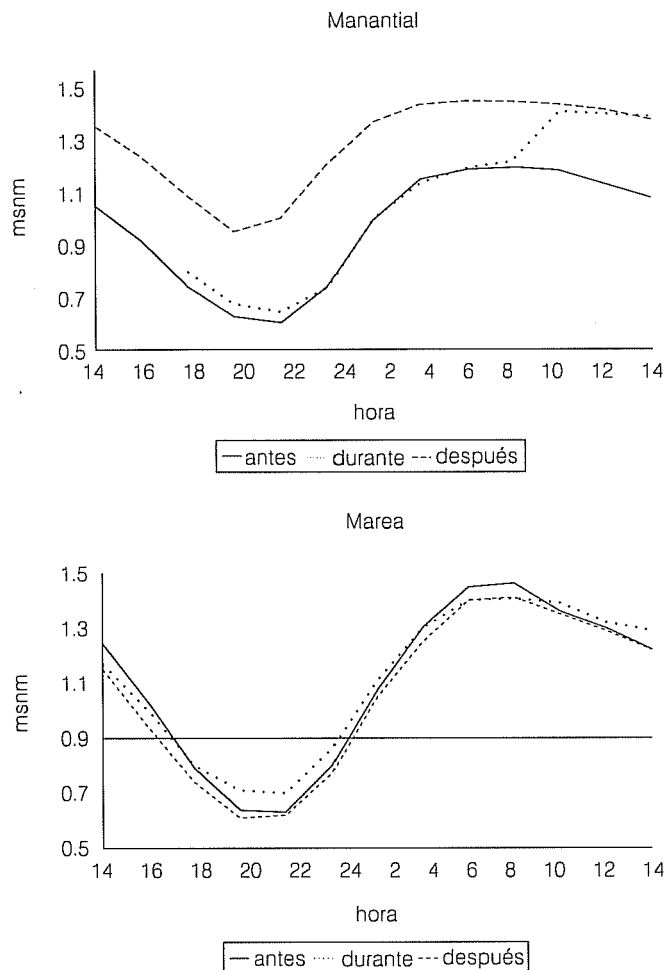
Por su cercanía al mar, la respuesta de los manantiales del Elepetén a la marea es directa y prácticamente inmediata, de tal manera que ambos cuerpos de agua se correlacionaron por su movimiento con un valor r de Pearson de 0.99, 0.95 y 0.96 durante los tres ciclos de 24 horas, respectivamente.

En general, puede decirse que la marea y el nivel de agua en el manantial suben a la misma hora. De acuer-

4. Características climáticas registradas en el puerto de Progreso durante 1993, especialmente en mayo y junio del mismo año; (1) antes, (2) durante y (3) después del desazolve de manantiales en el Elepetén



5. Fluctuación diaria del nivel hidrostático en el petén Elepetén y predicción de marea antes, durante y después del desazolve de manantiales



do con la marea, el rango de oscilación del nivel de agua es mayor en los manantiales y disminuye gradualmente hacia la periferia del petén, siendo menor en la ciénaga circundante.

Durante el desazolve se observó en el manantial (estación 5) un incremento en el nivel de agua de 0.185 m a partir de las ocho de la mañana, a pesar de ser el momento en que la marea comenzó a descender, (ilustración 5). Este ascenso del nivel de agua ocasionó un mayor flujo elevando ligeramente la tabla de agua en el petén. Después del desazolve el nivel de agua en el manantial (E-5) se encontró a mayor altura respecto del nivel registrado antes del desazolve con una diferencia promedio de 0.32 m, no obstante la marea presentó un nivel hidrostático promedio menor, (ilustración 5). El nivel promedio del agua desde el manantial (E-5) hasta la ciénaga norte, (E-1),

fue mayor después del desazolve, (ilustración 6, cuadro 2).

Se realizó un análisis de varianza de la fluctuación diaria del nivel hidrostático en el Elepetén, de la marea y la presión atmosférica registrada antes, durante y después del desazolve de manantiales.

En el Elepetén se observaron diferencias altamente significativas en la ciénaga, E-1, en las estaciones 2 y 3 y en un manantial de $p < 0.001$ a $p < 0.01$, (cuadro 3). No obstante, no existieron variaciones de importancia

2. Nivel hidrostático en el petén Elepetén (msnm).

Antes, durante y después del desazolve de manantiales

		Desviación				
Estación		Promedio	estándar	Máximo	Mínimo	Rango
Ciénaga norte	antes	1.191	0.00893	1.205	1.175	0.03
	durante	1.219	0.01838	1.25	1.19	0.06
	después	1.241	0.019	1.269	1.207	0.062
E-2	antes	1.171	0.011	1.185	1.138	0.047
	durante	1.206	0.00009	1.22	1.193	0.027
	después	1.237	0.012	1.265	1.226	0.039
E-3	antes	1.113	0.015	1.144	1.1	0.044
	durante	1.134	0.007	1.146	1.12	0.026
	después	1.167	0.026	1.205	1.132	0.073
E-4	antes	1.073	0.097	1.197	0.938	0.259
	durante	1.102	0.095	1.2	0.975	0.225
	después	1.159	0.069	1.236	1.032	0.204
Manantial (E-5)	antes	0.968	0.219	1.193	0.605	0.588
	durante	1.053	0.296	1.405	0.645	0.76
	después	1.288	0.176	1.447	0.95	0.497
Pred. marea	antes	0.199	0.296	1.56	-0.27	0.83
	durante	0.199	0.300	1.505	-0.20	0.705
	después	0.161	0.294	1.51	-0.29	0.80

3. Valores de F resultantes del análisis de varianza de una vía para la fluctuación diaria del nivel hidrostático en el Elepetén, predicción de marea y presión atmosférica

Fuente de variación	F	gl	Prob.
Fluctuación del nivel hidrostático			
Manantial (E-5)	5.015	2	0.01
E-4	2.319	2	0.1158
E-3	19.636	2	0.0010
E-2	81.815	2	0.0010
Ciénaga (E-1)	27.976	2	0.0010
Pred. marea	0.137	2	0.8723
Presión atmosférica	2.409	2	0.1071

gl = grados de libertad

4. Nivel hidrostático en el petén Elepetén (msnm). Coeficiente de correlación de Pearson (r)/significancia

Antes del desazolve					
	Ciénaga	E2	E3	E4	Manantial
Ciénaga		-	-	+	-
E2	0.361		-	-	-
E3	-0.309	-0.331		++	+
E4	-0.568	-0.461	0.711		+++
Manantial	-0.546	-0.290	0.657	0.865	

Durante el desazolve					
	Ciénaga	E2	E3	E4	Manantial
Ciénaga		-	-	+	+++
E2	0.583		-	++	++
E3	-0.085	-0.587		-	-
E4	-0.733	-0.804	0.240		+++
Manantial	-0.872	-0.736	0.315	0.881	

Después del desazolve					
	Ciénaga	E2	E3	E4	Manantial
Ciénaga		++	++	++	+++
E2	0.694		++	+	+
E3	0.760	0.761		+++	+++
E4	0.726	0.606	0.920		+++
Manantial	0.784	0.596	0.876	0.967	

-)	no significativo	+) al 95%	++) 99%	+++)	99.9%
----	------------------	-----------	---------	------	-------

en la marea ($p<0.8723$) y en la presión atmosférica ($p<0.1071$), (cuadro 3 e ilustración 5b), y en la presión atmosférica de ($p<0.1071$), (cuadro 3); se obtuvieron elevados coeficientes de correlación lineal en la fluctuación diaria de marea y de presión atmosférica registradas antes y después del desazolve de $r=>0.9$, (ilustraciones 5 y 7).

Este hecho se relaciona con la ausencia de precipitaciones pluviales durante los monitoreos, (ilustración 4); éstas últimas, comenzaron a ser más frecuentes después del muestreo posterior al desazolve, (ilustración 4).

En la ilustración 6 se observa la fluctuación diaria del nivel hidrostático en el petén antes y después del desazolve; el mayor flujo de agua registrado después del desazolve provocó una elevación de la tabla de agua del petén y un mayor escurrimiento de agua hacia la ciénaga.

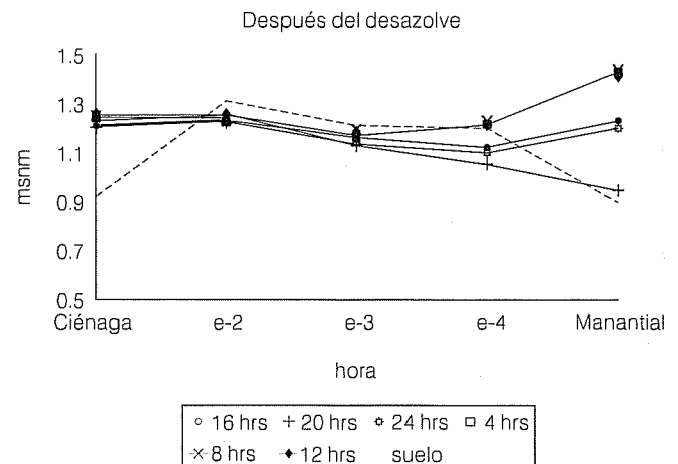
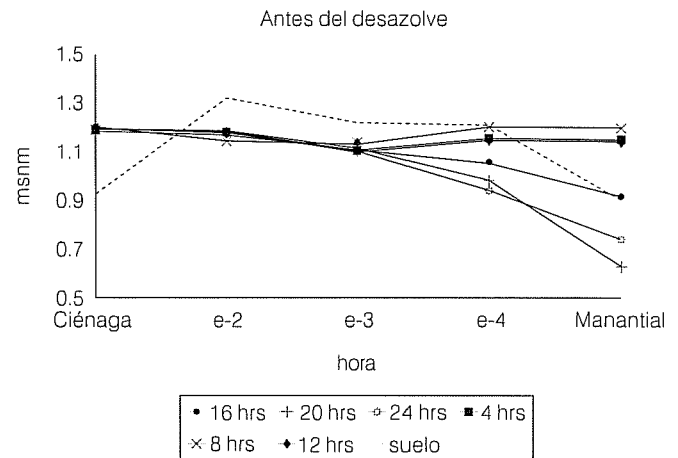
En el cuadro 4 el factor r de Pearson muestra el grado de asociación entre las estaciones debido al flujo del agua; de tal manera que antes del desazolve el manantial únicamente se asocia con la estación más

cercana, (E-4), luego durante el desazolve la relación hídrica entre el manantial y la ciénaga aumenta significativamente aunque de manera inversa, y después del desazolve todas las estaciones se asocian de manera directa y significativa, indicando un mayor flujo de agua hacia la ciénaga.

En general, existe un gradiente de mayor a menor salinidad de la ciénaga al manantial; sin embargo, la salinidad en el interior del petén y en el manantial es baja y constante mientras que en la ciénaga disminuye cuando el manantial desborda agua durante la pleamar y aumenta cuando deja de fluir agua durante la bajamar. Este efecto se pronuncia desde el momento en que se desazolve el manantial y se acentúa después del desazolve, (ilustración 8 y cuadro 5).

En relación a la temperatura del agua, antes de de-

6. Fluctuación diaria del nivel hidrostático en el Elepetén; el desazolve del manantial ocasionó una mayor elevación del nivel hidrostático en el petén



5. Salinidad en el petén Elepetén

Estación		Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mínimo	Rango
E-1	antes	47.6	4.40	55	44	11
	durante	34.1	9.81	43	15	28
	después	23.7	14.8	42	7	35
E-2	antes	26.7	1.61	29	25	4
	durante	27.5	10.71	32	1	31
	después	26.2	10.60	30	0	30
E-3	antes	5.21	1.39	7	4	3
	durante	6.03	1.57	2.9	7.9	5
	después	5.5	1.51	7	2	5
E-4	antes	2.54	0.83	4	2	2
	durante	2.31	0.70	3	1	2
	después	2.5	0.75	3	1	2
	antes	2.5	0.84	4	2	2
	durante	3	0.75	4	2	2
	después	2.6	1.06	3	0	3

sazolver los manantiales, la única relación significativa fue entre la ciénaga y la estación 3 del petén, mientras que después del desazolve el manantial adquiere un coeficiente de correlación altamente significativo con la estación 3 y con la ciénaga, (cuadro 6).

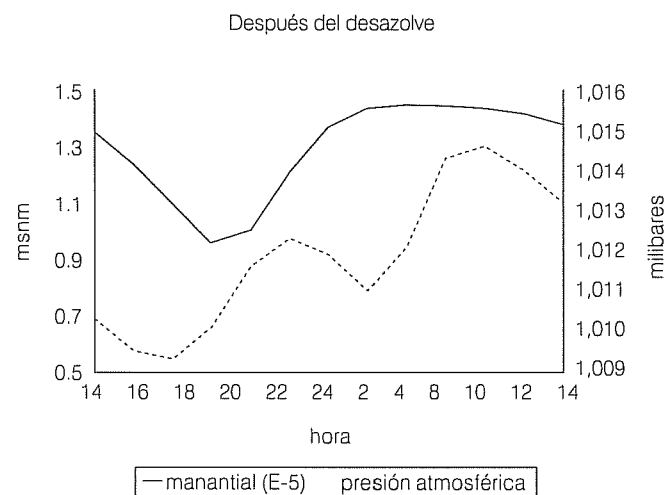
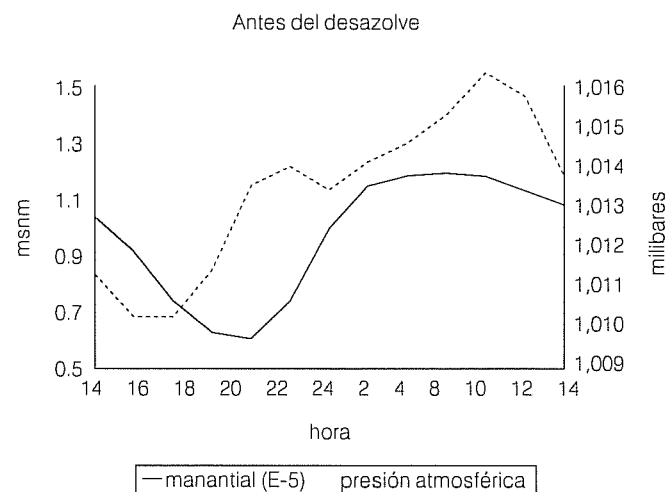
Durante el monitoreo simultáneo en el Elepetén y el Tzintzín se observaron correlaciones altamente significativas, de 0.95 entre los manantiales y de 0.97 entre los manantiales y el mar. La asociación entre el mar *in situ* y la predicción de la marea a través del factor de Pearson fue de 0.87, lo cual indica que existe una alta confiabilidad al emplear la predicción de marea en la

6. Correlación lineal de la temperatura del agua en la ciénaga, interior y manantial del Elepetén

Antes del desazolve			
Estación	Ciénaga	E3	Manantial
Ciénaga	----	+	-
E3	0.82	----	-
Manantial	0.40	0.37	----
Después del desazolve			
Estación	Ciénaga	E3	Manantial
Ciénaga	----	+	+
E3	0.81	----	+
Manantial	0.70	0.78	----

-) no significativo +) significativo al 95%

7. Influencia de la presión atmosférica en la fluctuación diaria del nivel de agua en el manantial (E-5) del Elepetén

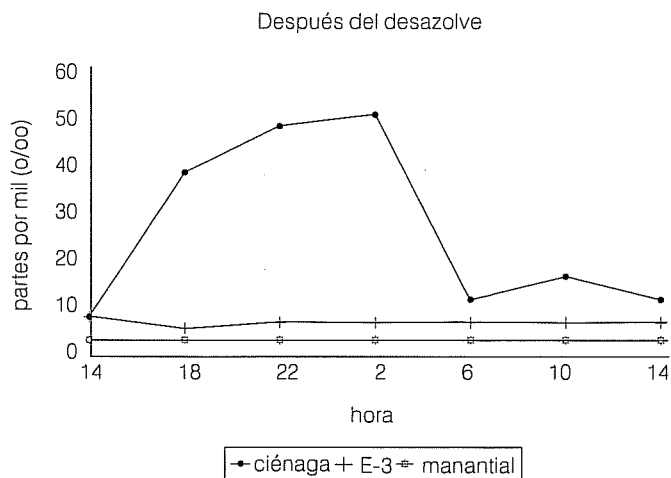
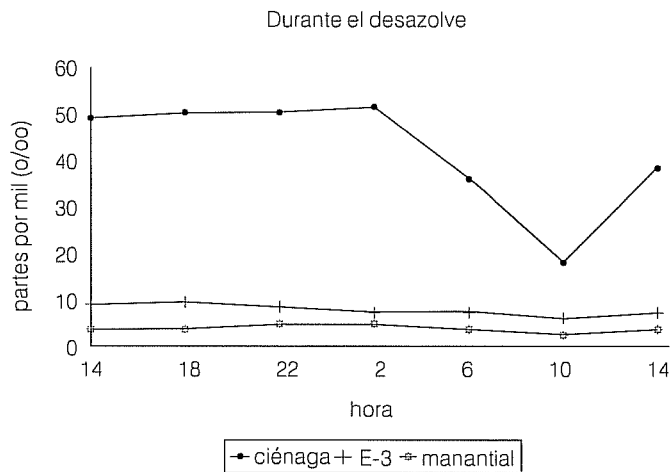
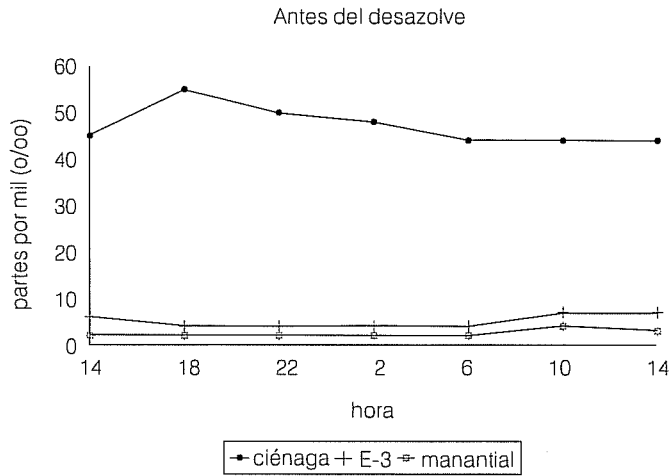


interpretación de los resultados obtenidos en el Elepetén.

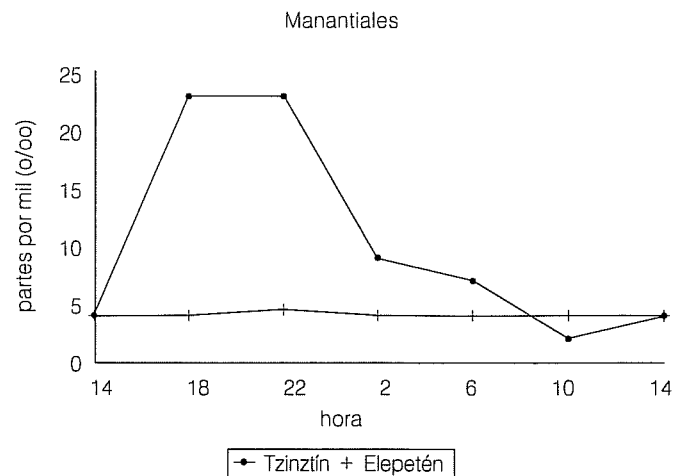
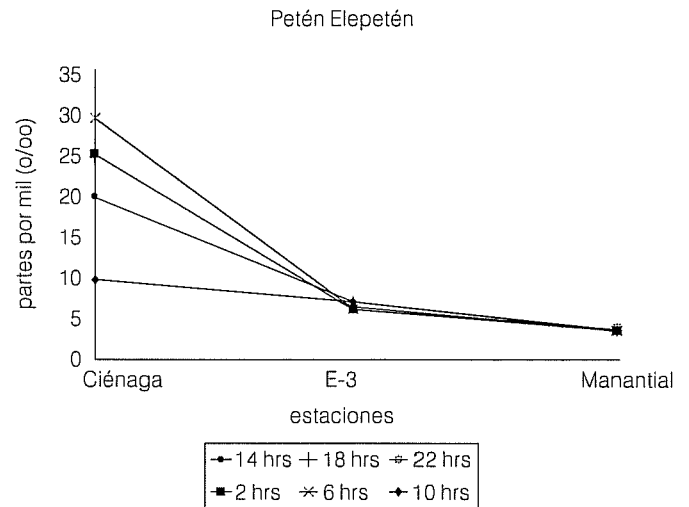
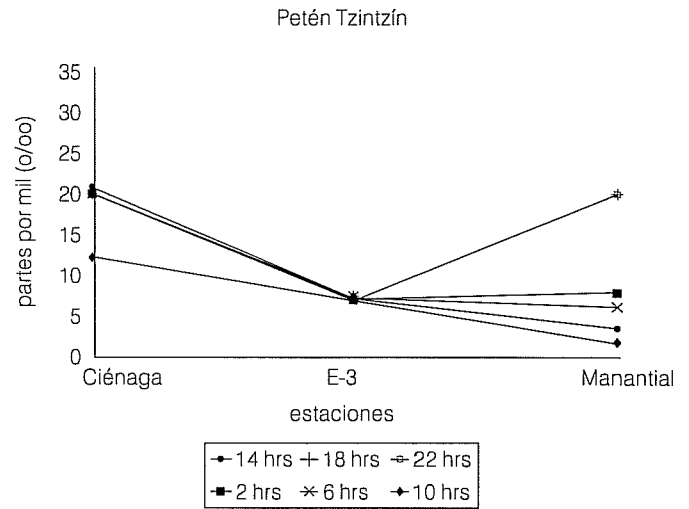
Sin embargo, se presentaron diferencias cuantitativas en el movimiento del agua entre ambos manantiales. La oscilación del nivel de agua en el Elepetén fue de 0.62 m. con un valor medio y desviación estándar de 1.33 msnm y 0.17 msnm respectivamente, mientras que en el Tzintzín la oscilación fue de 0.39 m con un nivel medio y desviación estándar de 1.29 msnm y 0.10 respectivamente.

Estas diferencias muestran que en el petén Tzintzín, debido al canal de drenaje, el movimiento del agua responde de manera menos directa al mar comparándolo con el petén, de tal forma que cuando sube la marea el nivel de agua en el Tzintzín se eleva hasta el

8. Fluctuación diaria de la salinidad en el Elepetén. El mayor flujo de agua dulce obtenido después del desazolve explica el descenso de la salinidad en la ciénaga durante la pleamar



9. Fluctuación de la salinidad: efecto de la canalización en el Tzintzín



nivel del canal y escurre hacia la ciénaga, alcanzando un nivel máximo de 1.4 msnm mientras que en el Elepetén el agua sube hasta 1.55 msnm. Luego, al bajar la marea el nivel en el manantial desciende aún por debajo del nivel de agua en la ciénaga, cambiando la dirección de la corriente en el canal hacia el manantial. El volumen de agua que entró al manantial durante la bajamar explica porqué el nivel mínimo en el Tzintzín fue más alto, 1msnm, que en el Elepetén, 0.94 metros sobre el nivel del mar.

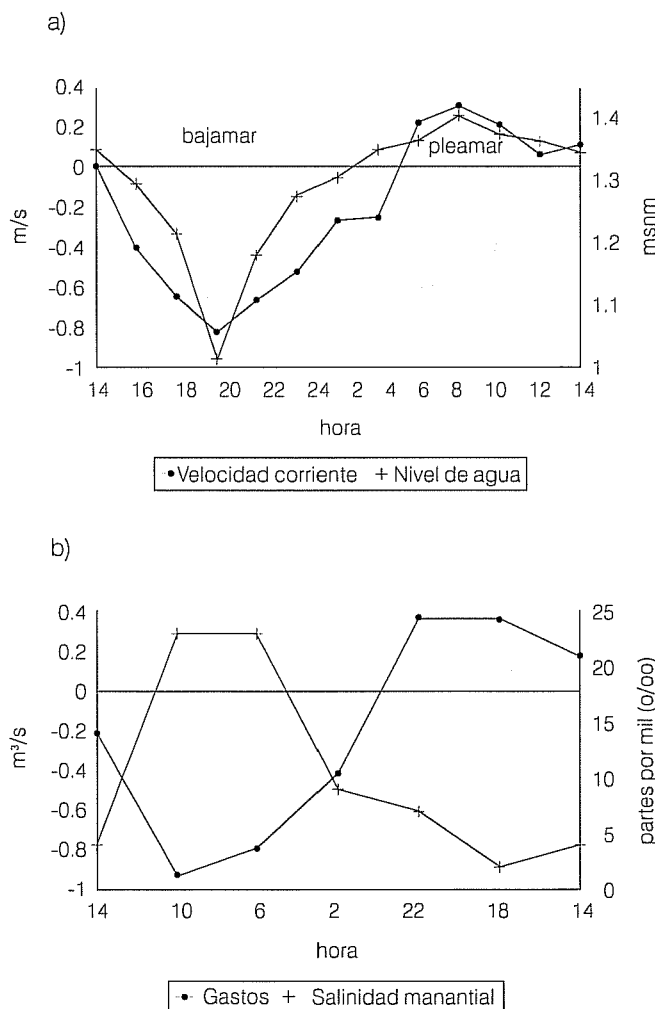
La entrada de agua de la ciénaga elevó la salinidad del manantial hasta 23 o/oo y luego durante la pleamar, cuando el manantial alcanzó su nivel máximo y comenzó a verter agua hacia la ciénaga, la salinidad descendió hasta 2 o/oo con un rango de oscilación de 21; por

el contrario, la salinidad en el manantial del Elepetén fue baja y constante con un rango de 0.5 o/oo.

En la ciénaga del Tzintzín la concentración de sal osciló entre 14 y 25 o/oo y en el Elepetén entre 10 y 30 o/oo durante la pleamar y la bajamar respectivamente, lo cual muestra que en el Elepetén aún sin canal el nivel de agua puede elevarse hasta escurrir hacia la ciénaga endulzándola, (ilustración 9).

Conociendo la velocidad de la corriente y el área transversal en un segmento del canal, se estimó el gasto (volumen de agua por unidad de tiempo, m^3/s) de entrada al manantial, durante la bajamar, y de salida a la ciénaga, durante la pleamar. En las secciones a y b de la ilustración 10, el signo negativo indica entrada de agua al manantial y el positivo salida de agua a la ciénaga. A medida que desciende el nivel de agua en el manantial existe una entrada de agua de la ciénaga aumentando la salinidad en el manantial. El volumen de agua que entró al manantial durante la bajamar fue mayor al que salió a la ciénaga durante la pleamar dentro de un ciclo diario.

10. (a) Velocidad de la corriente en el canal y fluctuación del nivel de agua en el manantial del Tzintzín, (b) variación de la salinidad en el manantial e hidrograma (el signo negativo indica entrada de agua de la ciénaga al manantial)



Discusión

De acuerdo con Kohout (1961) y Todd (1964), son varios los factores que influyen en la fluctuación del nivel de agua subterránea:

- La recarga y descarga natural
- La acción de la marea
- Los cambios en la presión atmosférica

En este sentido, una característica de los afloramientos de los petenes es que funcionan como manantiales *mareales* intermitentes, lo que quiere decir que el nivel hidrostático y el flujo de agua aumenta y disminuye en relación directa con las mareas.

La influencia del nivel del mar sobre los afloramientos costeros se debe a la presión que ejerce la masa de agua marina sobre el manto freático continental que, a su vez, causa movimientos sincronizados en el nivel de los manantiales costeros en respuesta a las mareas. De esta manera, el aumento en el nivel del mar se manifiesta en una elevación de la carga piezométrica en los cuerpos de agua en que aflora el acuífero. (Marín *et al.*, 1988; Perry *et al.*, 1989; Marín *et al.*, 1990; Batllori *et al.*, 1993).

En relación a la fluctuación diaria del nivel hidrostático en los petenes, durante la pleamar el nivel de agua en los manantiales se eleva formando una cabeza hidrostática que constituye la presión hidráulica de la que depende la velocidad del flujo de agua en el petén.

El flujo puede considerarse de tipo radial ya que va del manantial hacia todo el petén, aunque también está influenciando por sus diferencias topográficas, ya que el agua fluye con mayor velocidad hacia las partes más bajas mientras que las más altas aún no se inundan. En este sentido, existe un desfase en el tiempo que tarda en llegar la onda de agua del manantial hacia cualquier punto del petén en función de la distancia, de tal manera que primero se inundan las partes más cercanas al manantial y de último las más alejadas como la ciénaga circundante (Trejo-Torres, 1993). Es por esto, que la oscilación es menor en la periferia del petén ya que cuando comienza a elevarse el nivel de agua en este lugar, el manantial ha comenzado a descender en respuesta a la bajamarea, perdiendo presión hidráulica.

Durante la bajamar, el nivel de agua en el manantial desciende aún por debajo de la tabla de agua en el petén. La naturaleza orgánica del suelo le confiere la capacidad de funcionar como una esponja, de tal manera que retiene agua y evita que se drene el suelo del petén hacia el manantial; luego, durante la siguiente pleamar el manantial desborda agua hacia todo el petén.

Entendiendo la relevancia que tienen los manantiales en la dinámica hidrológica de los petenes, es posible plantear que la influencia que puede tener la precipitación pluvial en el régimen hidrológico de los petenes con afloramientos de agua, posiblemente no signifique gran cosa, ya que el del manantial puede ser mucho mayor que el de la lluvia.

La recarga que sufre el manto freático continental en la época de lluvias, ocasiona un aumento en el nivel hidrostático y un mayor flujo en los puntos de descarga como son los manantiales costeros (Milanovic, 1981; Marín *et al.*, 1988). Sin embargo, los niveles máximos del acuífero continental en el norte de la península se han detectado al final de la temporada de lluvias (Marín, 1990), por lo que los mayores flujos en los afloramientos costeros deberían ocurrir después de esta temporada, justo en la época de *nortes*.

De acuerdo con Todd (1964), los cambios en la presión atmosférica producen fluctuaciones apreciables en pozos que penetran acuíferos confinados, de tal manera que un incremento en la presión ocasionaría un descenso en el nivel de agua y viceversa. Sin embargo, considerando la alta conductividad hidráulica del acuífero costero noroccidental de Yucatán (Reeve y Perry, 1990) y los elevados coeficientes de correlación obtenidos entre la fluctuación diurna del nivel de agua en manantiales y marea (Batllori, *et al.*, 1993), consideramos que la influencia de la presión atmosférica fue despreciable, al menos en las condiciones de

marea en que se realizaron los monitoreos antes y después del desazolve de manantiales en el Elepetén $p > .1071$, (cuadro 3 e ilustración 7).

Durante los procesos clásicos de sucesión, el flujo hidrológico es desviado y reducido por el desarrollo de la biota, lo que representa el proceso natural de azolvamiento que sufren los manantiales costeros a través del tiempo. Si bien este proceso puede ser acelerado por actividades humanas (Zizumbo, 1986) y por desastres naturales como los huracanes y tormentas, que a su paso derriban gran cantidad de árboles. En estas condiciones de azolvamiento puede existir una reducción significativa del flujo de agua dulce al sistema costero (Barrera, 1982). Los trabajos de Bay (1967) y Heinselman (1970) indican que en los humedales situados en tierras bajas y en contacto con agua subterránea existe una alta diversidad biótica, lo cual se relaciona con un suministro rico en nutrientes. Este ejemplo sugiere que la oportunidad para la diferenciación de nichos se incrementa con la energía hidrológica de los humedales.

La productividad es fuertemente influenciada por muchos factores, por lo que es imposible generalizar. No obstante, de acuerdo con Whigham y Simpson (1977), la productividad parece estar correlacionada positivamente con el régimen del flujo de agua. La proporción de la producción primaria que es depositada como turba es difícil de determinar, pero es de esperarse que al incrementarse la energía de inundación, la proporción de producción exportada también se incrementa. En este sentido, el aumento en la energía hidráulica de los petenes, representado en este caso por un mayor flujo de agua, podría sugerir posteriormente un mejor desarrollo estructural y funcional de la comunidad biótica.

En relación a la canalización de manantiales, MacKinnon, *et al.* (1990) mencionan que los canales artificiales pueden cambiar el nivel freático y modificar la vegetación original. En el Tzintzín, debido al canal de drenaje y en condiciones de fuerte oscilación de marea con niveles mínimos por debajo del nivel medio del mar, principalmente, se produce un abatimiento en el nivel hidrostático tal que permite la entrada de agua de la ciénaga al manantial, elevado la salinidad y temperatura del agua.

Por otra parte, considerando que el suelo del petén se desarrolla por la acumulación de restos vegetales que bajo un régimen hidrológico perhúmedo se descomponen a tasas más lentas de las que se generan, y que el rango de acumulación de turba depende de los rangos de producción, así como de la duración y la profundidad del nivel de inundación, el abatimiento del nivel hidrostático en el Tzintzín podría acelerar la ero-

sión y pérdida del suelo ya que la oxidación del sustrato ocurre rápidamente al exponerse.

Se ha sugerido (Perry, com. pers.) que el cambio climático global, representado por un aumento en el nivel medio del mar, determinará que con el paso del tiempo los manantiales desazolvados se encontrarán debajo del mar; lo cual podría cuestionar el sentido de tales acciones. Sin embargo, es necesario considerar que la descarga de agua subterránea en zonas costeras controla el gradiente de salinidad entre el ecosistema terrestre y el marino, de tal manera que una disminución en la descarga de agua subterránea puede incrementar la salinidad y modificar las características estructurales de los ecosistemas costeros (Johannes, 1980).

Dada la importancia de la descarga de agua subterránea, el mayor flujo de agua dulce hacia la ciénaga, que se obtiene al desazolver manantiales costeros, a corto plazo, puede ser más importante que el efecto de los cambios climáticos y en el nivel del mar a largo plazo (Nuttle y Portnoy, 1992).

El incremento en las entradas de agua y sedimentos marinos a la ciénaga así como la obstrucción de fuentes de agua dulce están ocasionando la pérdida de la vegetación típica de los humedales costeros, los manglares (Zizumbo, 1986; Batllori, 1991). Este proceso ocurre porque el agua salada cambia las características del suelo: de un lodo rico en materia orgánica creada a partir de la vegetación y el agua dulce-salobre a una capa de suelo rígido cubierto de sales y otros minerales precipitados que limitan el intercambio gaseoso entre el suelo y el agua.

Las condiciones antes descritas producen cambios en la respuesta fisiológica de la vegetación con la consecuente desaparición de poblaciones de camarón y otros crustáceos. La pérdida de la heterogeneidad ambiental, se refleja también en una disminución en las poblaciones de pastos, lo cual a su vez se puede relacionar con la pérdida de fauna silvestre y aves acuáticas, algunas de interés comercial y cinegético principalmente.

El impacto socioeconómico resultante puede ser de gran importancia si consideramos el alto valor que representan las ciénagas, manglares y petenes como recursos de subsistencia en la temporada de *nortes* principalmente, cuando resulta muy riesgoso salir a pescar, y los pobladores encuentran en las ciénagas su sustento diario en uno o dos kilos de jaiba, *chivita* o caracol. Por otra parte, es bien conocida la importancia biológica de los humedales costeros en el sustento de poblaciones de peces de interés comercial.

En la medida en que se sigan deteriorando los humedales de la costa se podría modificar la capacidad

de carga de los litorales ante la creciente presión sobre los recursos pesqueros. No obstante, las actividades productivas en la costa como alternativa a la crisis de la economía henequera, que afecta especialmente a esta región y el costo del desarrollo, tienen que contemplar la preservación del medio ambiente (Paré y Fraga, 1994).

Conclusiones

El efecto que ocasiona el desazolve de manantiales sin abrir canales de drenaje, está representando por un aumento en el nivel hidrostático del petén y un mayor flujo de agua hacia la ciénaga, lo cual se refleja de manera inmediata en una fluctuación más homogénea de la temperatura del agua en el petén y en una disminución en la salinidad de la ciénaga.

La existencia de canales en los petenes ocasiona un abatimiento en el nivel hidrostático y una respuesta hidráulica menor de los manantiales a la marea. Por otra parte, en condiciones extremas de bajar el nivel de agua desciende, creando un gradiente hidráulico en el canal, que permite la entrada de agua de la ciénaga incrementando la salinidad y la temperatura del agua en los manantiales. El abatimiento del nivel hidrostático puede ocasionar la erosión y pérdida de suelo en los petenes.

En base a los resultados obtenidos en este estudio se observa que es factible desazolver manantiales con la finalidad de aumentar el flujo de agua dulce al sistema costero; asimismo se sugiere:

- No abrir más canales de drenaje
- Cerrar los canales abiertos en los petenes de la zona

Recibido: junio, 1994
Aprobado: marzo, 1995

Agradecimientos

Al Patronato de la Reserva Estatal de El Palmar por su apoyo económico para la realización de este estudio. A nuestros compañeros de trabajo Jorge Carlos Trejo, Pedro Pablo Dzib y Roberto Tuyub por su participación y apoyo en el trabajo de campo. El monitoreo simultáneo en los petenes Elepetén y Tzintzín no hubiera sido posible sin la participación de un grupo de voluntarios del Programa de Ecoturismo Yucatán de la Reserva de El Palmar en coordinación con la Secretaría de Ecología, Biocenosis y Europe Conservation: Elena Daelli, Lucia Chietti, Daniela Finocchi, Alessandro Guardone, Martina Milanese, Mila Milazzo, Elisa Muccini, Lucio Pisini, Gianbattista Tonani, Monica Varallo, Lorenza Pratali y Maddalena Bgarzi. Al doctor Klaus J. Meyer-Arendt, profesor asociado de Geografía de la Universidad del Estado de Mississippi, por la traducción del resumen al inglés.

Referencias

- Barrera, A. *Los petenes del noroeste de Yucatán: Su exploración ecológica en perspectiva* Biótica, (Vol. 7, Núm. 2. p.p. 163-169) México, 1982.
- Batllori, E. *Programa de manejo hidrológico de la cuenca costera noroccidental de la península de Yucatán*. CINVESTAV-IPN Unidad Mérida. Sección Ecología Humana. Mérida, Yucatán, México, 1991.
- Batllori, E.; J.L., Febles; J.C., Trejo; P.P., Dzib y R., Tuyub. *Efecto de las mareas diurnas en las fluctuaciones de nivel del acuífero cárstico costero de El Palmar, Yucatán, México*. Primera Reunión Nacional Sobre Aguas Subterráneas. Instituto de Geofísica. UNAM. México, 1993.
- Bay, R.R. *Groundwater and Vegetation in Two Peat Bogs in Northern Minnesota*, Ecology, (Núm. 48, p.p. 308-310), USA, 1967.
- Comisión Nacional del Agua. *Registros del Observatorio Meteorológico de Progreso y de la estación climatológica de Sisal*, México, 1993.
- Consejo Estatal de Consultoría Ecológica (CECE). *Programa de manejo integral de la zona costera de Yucatán*, Gobierno del estado de Yucatán, México, 1991.
- García, E. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen*. 3a Edición, (p.p. 153) México DF, 1978.
- Heinselman, M.L. *Landscape Evolution, Peatland Types, and the Environmental in the Lake Agassiz Peatlands Natural Area*, Minnesota. Ecology. Monograph. (Núm.40, p.p. 235-261), USA, 1970.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Historia (INEGI). *Sistema de control geodésico vertical y horizontal en la Reserva Estatal de El Palmar, Yucatán*, México. 1991.
- Johannes, R.E. *The Ecological Significance of the Submarine Discharge of Groundwater*. Marine Ecology Progress (Series 3, p.p.365-373), usa, 1980.
- Kohout, F.A. *Fluctuations of Ground-Water Levels Caused by Dispersion of Salts*. Geophysical Research. (Vol. 66, No. 8 p.p.2429-2434), USA, 1961.
- MacKinnon, J; K., MacKinnon; G., Child y J., Thorsell (Editores). *Manejo de áreas protegidas en los trópicos. Con base en los talleres sobre Manejo de Areas Protegidas en los Trópicos*. Congreso Mundial de Parques Nacionales, Bali, Indonesia, octubre, 1982. UICNPNUMA. 1990.
- Marín, L.; E.C., Perry; A., UReeve; R., Sanborn; M., Villasuso y T. Felger. *Petenes: A Key to Understanding the Hydrogeology of Yucatan, Mexico*. Abstracts: International Symposium on the Hydrogeology of Wetlands in Semiarid and Arid Areas, Seville, Spain, 1988.
- Marín, L.; E., Perry; K., Pope; C., Duller; C., Booth; M., Villasuso. *Hurricane Gilbert : Its Effects on the Aquifer in Northern Yucatan, Mexico*, International Association of Hydrogeologists, Proceedings of the 28th International Geologic Congress. Washington, D.C., 1989.
- Marín, L. *Field Investigations and Numerical Simulation of Ground-Water Flow in the Karstic Aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico*. Thesis. Department of Geology. Northern Illinois University. Dekalb, Illinois, USA, 1990.
- Cuen, R.H. *Hydrology Analysis and Disign*. Prentice Hall (p.p.867), USA, 1989.
- Milanovic, P.T. *Karst Hydrology*. Water Resources Publications. USA, 1981.
- Nuttle, W.K. and J.W. Portnoy *Effect of Rising Sea Level on Runoff and Groundwater Discharge to Coastal Ecosystems*. Estuarine, Coastal and Shelf Science (Núm.34, p.p. 203-212). 1992.
- Olmsted, I. y R. Durán. *Aspectos ecológicos de los petenes en Florida, Campeche y Quintana Roo*. Memorias del Simposio sobre Ecología y Conservación del Delta de los Ríos Usumacinta y Grijalva. (p.p 517-535), 1989.
- Perry, E; J., Swift; J., Gamboa; A., Reeve; R., Sanborn; L., Marín; M., Villasuso. *Geologic and Environmental Aspects of Surface Cementation, North Coast, Yucatan, Mexico*. Geology (Núm. 17, p.p. 818-821), 1989.
- Paré, L. y J. Fraga. *La costa de Yucatán: desarrollo y vulnerabilidad ambiental*. Cuadernos de Investigación Instituto de Investigaciones Sociales, UNAM (Núm 23, p.p. 89-91), 1994.
- Perry, E.; A., Reeve, L., Marín; M. Villasuso, in press, Reply to Comment on *Environmental Aspects of Surface Cementation, North Coast, Yucatan, México :Geology*. Cita-do en: Marín, L. *Field Investigations and Numerical Simulation of Ground-Water Flow in the Karstic Aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico*. Thesis. Department of Geology. Northern Illinois University. Dekalb, Illinois, U.S.A. 1990.
- Perry, E. Comunicación personal., 1994.
- Servicio Mareográfico Nacional. *Calendario gráfico de mareas del Puerto de Progreso, Yucatán. y Tablas de Predicción de Mareas*. Puertos del golfo de México y Mar Caribe. Datos Geofísicos Serie A. Oceanografía. UNAM. Instituto de Geofísica, México, 1993.
- Tood, D.K. *Groundwater*, Section 13. In Chow, V.T. (ed.). *Handbook of applied hydrology: A compendium of water-resources technology*. McGraw-Hill Publishing Company (p.p.13-1,13-55). USA.1964.
- Trejo-Torres, J.C. *Vegetación, suelo e hidrodinámica de dos petenes de la Reserva de Dzilam, Yucatán*. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Biología, FMVZ, UADY. (p.p. 137), México, 1993.
- Whigham, D.F. and R.L., Simpson. *Growth, Mortality and Biomass Partitioning in Freshwater Tidal Wetland Populations of Wild Rice (Zizania Aquatica var. Aquatica)*. Bull. Torrey Bot. lub (Núm. 104, p.p. 347-351), 1977.
- Zizumbo, D. *El Deterioro del Sistema Ecológico Ciénaga de Progreso, Yucatán*. Centro de Investigación Científica de Yucatán . (p.p. 66), México, 1986.

Abstract

Febles-Patron and E. Batllori, "Diurnal Fluctuation in Hydrostatic Level of Petenes on the Northwestern Coast of Yucatan, Mexico: Effects of Dredging and Canalization of Springs". *Hydraulic Engineering in Mexico* (in Spanish). Vol X. Num. 2, pages. 5-19, May-August, 1995.

As part of reclamation of the El Palmar-Yucatan State Reserve, the impact of dredging the springs in the Elepeten peten (isle with abundant vegetation along the Yucatan coast) and an old canal in the Tzintzin peten on the diurnal fluctuation in the local hydrostatic level are evaluated. Observations were made at various points during four 24-hour cycles of water levels (every 2 hours) and temperature and salinity (every 4 hours). The first three observation periods were before, during and after the dredging of the springs in the Elepeten peten. During the fourth observation period samples were collected simultaneously at the Elepeten peten and the Tzintzin peten. The observations were made during similar tide levels. Following the dredging of the spring, a rise in the hydrostatic level was recorded at the Elepeten peten resulting in a major flow of water toward the lagoon and a reduction in salinity, especially during high tide. The reopening of the canal at the Tzintzin peten produced a minor hydraulic response of the spring to the tide level and a lowering of the hydrostatic level in the peten. During low tide, there is an influx of lagoon water to the spring, elevating salinity and temperature. The highest hydraulic energy seen in Elepeten after dredging the springs (greater flow of water) was correlated with a higher biotic productive and a high degree of soil formation. However, the lower hydrostatic level at the Tzintzin peten and the corresponding inflow of brackish water to the spring could induce soil erosion and the loss of endemic species. As a result of this study, the authors recommend that the old canals in the petens remain closed and that the canals in the Dzulá, Tzintzin, Lagartero y Bolon petens, opened during the reclamation project, be closed.

Key Words: peten (hammock), spring, dredging, canalization, hydrostatic level, Elepeten, Tzintzin, reclamation, El Palmar-Yucatan state reserve.