LIMNOLOGIA Y PALEOLIMNOLOGIA DE PETEN, GUATEMALA

Mark Brenner, Michael F. Rosenmeier*
David A. Hodell, Jason H. Curtis*
Flavio Anselmetti**
Daniel Ariztegui***

INTRODUCCION

La *limnología* es el estudio de aguas continentales, incluyendo los lagos, lagunas, ríos, aguadas, manantiales, ojos de agua, etc. La disciplina abarca la investigación de todo aspecto de los llamados cuerpos de agua, como la hidrología, morfometría (e.g., tamaño, profundidad y volumen), atributos físicos como la temperatura, la densidad y las corrientes, la química y la biología. Los componentes biológicos incluyen toda la biota, desde las bacterias, plantas (algas) e invertebrados microscópicos, hasta las plantas superiores y animales más grandes: peces, tortugas, aves y cocodrilos.

La *paleolimnología* es la disciplina que emplea los núcleos de sedimentos lacustres para estudiar las condiciones ambientales del pasado, incluyendo los cambios climáticos e impactos humanos. Los sedimentos se acumulan sobre los fondos de lagos en manera ordenada y normal, en proporciones de aproximadamente 0.5-2.0 milímetros por año. Los sedimentos recientes se depositan encima de la materia más antigua, y se componen de materia orgánica e inorgánica, con origen dentro (autóctono) y fuera (alóctono) del lago. Los depósitos lacustres contienen partículas de suelos, minerales precipitados (e.g., $CaCO_3$, $CaSO_4$), granos de polen, diatomeas y otras algas, restos de plantas carbonizadas (cenizas), hojas, conchas de gasterópodos y ostrácodos, y microfósiles de otras plantas y animales. Las condiciones paleoambientales se pueden inferir por análisis estratigráficos de los materiales preservados dentro de núcleos de sedimento. Por ejemplo, el análisis de polen puede usarse para evaluar cambios en la vegetación. Los cambios estratigráficos en la composición de la comunidad de diatomeas pueden indicar fluctuaciones históricas en el pH del agua o la productividad primaria. Al igual de los arqueólogos, es posible usar isótopos radioactivos, como el radiocarbono (^{14}C) o plomo (^{210}Pb), para establecer la cronología del núcleo de sedimento y determinar cuándo ocurrieron cambios ambientales en el pasado.

Petén, Guatemala, es un lugar de interés especial para los limnólogos tropicales porque el departamento tiene un gran distrito lacustre (Figura 1), con muchos lagos de características diversas (Tabla 1). Además, es una región con una historia muy larga y prolongada de ocupación humana. Esto quiere decir que los sedimentos lacustres de Petén ofrecen la posibilidad de investigar cambios climáticos e impactos antropogénicos sobre el paisaje y los recursos acuáticos, en el norte de Guatemala.

En este trabajo presentamos una síntesis del conocimiento limnológico y paleoecológico de Petén, basada en varios estudios realizados en los últimos 30 años. Discutimos las características limnológicas de los cuerpos de agua en Petén y algunos de los factores que amenazan estos ecosistemas en la actualidad. También revisamos las conclusiones de estudios paleolimnológicos que informan sobre la relación entre los cambios climáticos y la vegetación de la región a través de los milenios, y el impacto de la cultura Maya sobre la selva y los suelos regionales durante los tres mil años pasados.

LIMNOLOGIA DE PETEN

El Departamento de Petén, Guatemala, está situado en una región cárstica, al sur de la Península de Yucatán. Los cuerpos de agua principales en el Distrito Lacustre de Petén Central se alinean en un transecto este-oeste, a una latitud 17° N (Figura 1). La geología regional en Petén se caracteriza principalmente por la roca caliza del período Cretácico (Vinson 1962), que localmente contiene depósitos de dolomita ($Ca\text{-}Mg\text{-}CO_3$) y yeso ($CaSO_4$). Los lagos en Petén se formaron como consecuencia de la disolución de la piedra caliza (carbonatos), y los sistemas acuáticos muestran una variedad de morfometrías (Figura 2). En Petén, la gente denomina "juleques" a los lagos pequeños y profundos. Hay muchos cuerpos de agua someros, como el Lago Petenxil, que tienen

*Departamento de Geología, Universidad de Florida
**Geologisches Institut ETHZ, Zürich, Suiza
***Institut Forel, Universidad de Geneva

profundidades máximas de <10 m (Deevey *et al.* 1980a). Estudios sísmicos, efectuados en los años 1999 y 2002, con la participación de estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala, revelaron que Petén-Itzá, el lago más grande (~100 km^2) y más profundo del distrito, tiene una profundidad maxima de ~160 m (Figura 2). Es una cripto-depresión, y el fondo está ~50 m bajo el nivel del mar actual.

Los cuerpos de agua en Petén que ocupan depresiones someras se llenaron con agua entre 9000 y 8000 años antes del presente. Asimismo, la mayoría de los lagos y cenotes existentes en el norte de la Península Yucatán empezaron a llenarse con agua durante el Holoceno temprano, cuando el clima llegó a ser más húmedo y el nivel del mar subió (Whitmore *et al.* 1996, Leyden *et al.* 1996, Hodell *et al.* 1995, Curtis *et al.* 1996, 2001, Brenner *et al.* 2002). Algunos lagos profundos, i.e., >30 m en el presente, también tenían agua durante el Pleistoceno (>10,500 años antes del presente), cuando el clima era más frío y seco (Deevey *et al.* 1983, Leyden 1984, 1987, Leyden *et al.* 1993, 1994, Brenner 1994, Brenner *et al.* 2002).

Los lagos en Petén están sellados y reciben la mayoría de su agua de precipitación directa, drenaje superficial y de infiltración subterránea (Deevey *et al.* 1980a). Los lagos pierden agua principalmente por evaporación y drenaje profundo, y contienen agua con valores de ^{18}O, muy altos en comparación con la lluvia, lo que es un indicador de la importancia de evaporación en el balance hídrico (Curtis *et al.*1998, Rosenmeier et al. 2002a, 2002b, Brenner *et al.* 2002). El ^{18}O se concentra en los cuerpos de agua por la preferencial evaporación del isótopo ligero (^{16}O). Generalmente, las influencias y afluencias superficiales (ríos) no son muy importantes para la hidrología, porque los cuerpos de agua en Petén están efectivamente cerrados.

Figura 1. a) Mapa de la Península Yucatán indicando el distrito lacustre de Petén, Guatemala (caja negra) y la ubicación de varios lagos discutidos en el texto. b) Mapa de los principales cuerpos de agua en Petén.

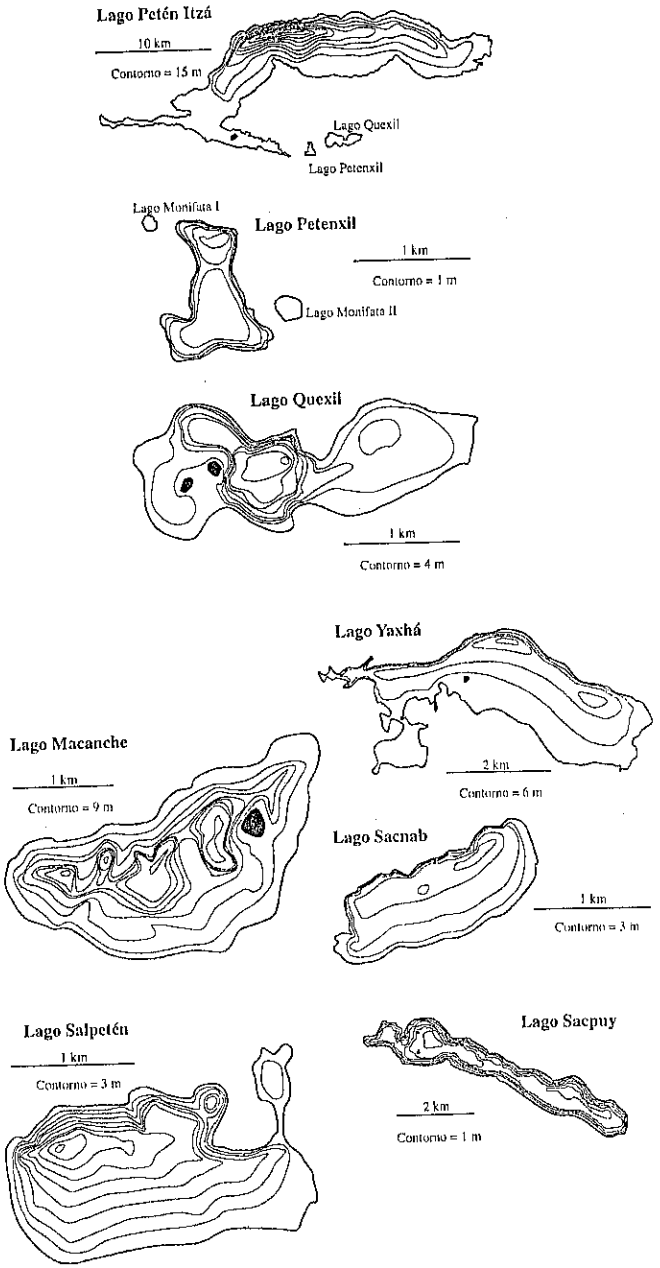

Figura 2. Mapas batimétricos de varios lagos en Petén, Guatemala. Mapas de los lagos Quexil, Yaxhá, Sacnab, Petenxil, Macanché, y Salpetén son modificaciones de mapas que aparecen en Deevey *et al.* (1980a). Las partes negras dentro de los lagos representan islas.

Los lagos en el distrito tienen la propensidad de cambiar de nivel (5-10 m) rápidamente, como consecuencia de las fluctuaciones climáticas. Alternativamenete, los cambios bruscos en el nivel del agua pueden ser causados por alteraciones del drenaje subterráneo. Durante el siglo veinte, hubo períodos de niveles altos en las décadas de 1930 y 1980: se inundaron las orillas y dañaron propiedades, especialmente alrededor del Lago Peten-Itzá (Penados 1980, Basterrechea Diaz 1988a). Hemos encontrado restos de gastéropodos acuáticos en los suelos de las cuencas (depósitos lacustres) y éstos evidencian que hubo períodos previos durante el Holoceno en que los niveles de los lagos eran mucho más altos que en la actualidad (Rosenmeier et al. 2002a).

Los lagos en Petén muestran una gran diversidad en lo que se refiere a características químicas (Deevey *et al.* 1980a, Basterrechea Diáz 1988b). Hay algunos pequeños cuerpos de agua cerca de La Libertad, como los de los lagos Chilonché y Chimáj, que son deformaciones superficiales y contienen aguas diluidas, con bajas concentraciones de iones y conductividad (Brenner *et al.* 1990). Los lagos de las sabanas tienen pocas concentraciones de iones porque están localizados en regiones con suelos hidromórficos y arcillosos (Simmons *et al.* 1959), que tienen poca capacidad por intercambio de cationes. Más por el norte, los lagos manifiestan conductividades altas y una variedad de propiedades químicas (Tabla 1).

Las concentraciónes de nutrientes en los lagos de Petén, en general, no son muy altas, especialmente si se considera que se encuentran en una región cárstica dentro de una región tropical (Tabla 1). La concentración del fósforo total fue medida en nueve lagos y los resultados muestran una variación entre 18 y 54 $\mu g\ L^{-1}$. La relación entre nitrógeno y fósforo en el agua de los lagos es alto (N/P>25), lo cual sugiere que el fósforo es el nutriente que puede limitar la productividad primaria en estos sistemas acuáticos (Deevey *et al.* 1980a). Experimentos efectuados con botellas oscuras y transparentes, durante la década de 1970, indican que la productividad fotosintética es moderada y característica de lagos mesotróficos. El promedio en los lagos Yaxhá y Sacnáb fue 252±122 $mg\ C\ m^{-2}\ d^{-1}$, y el valor en el Lago Quexil fue de 198 $mg\ C\ m^{-2}\ d^{-1}$. Los perfiles de temperatura y oxígeno sugieren que los lagos profundos están estrátificados durante la mayor parte del año y que las aguas profundas sufren de anoxia (Deevey *et al.* 1980a). Es posible que el oxígeno entre en el hipolimnio durante las noches, si las aguas superficiales se enfrían; sin embargo, es más probable que la columna de agua se oxigene por circulación durante los meses de diciembre y enero, cuando el clima es más frío (Basterrechea Diáz 1988a).

Muestras recolectadas en ocho lagos de Petén pusieron a la vista aproximadamente 160 especies de algas (Deevey *et al.* 1977, 1980a), las cuales son miembros de los grupos Cyanophyta, Euglenophyta, Pyrrophyta y Chrysophyta, incluyendo muchos Bacillariophyceae (diatomeas) y Chlorophyta, así como los Chlorophyceae, Mesotaeniaceae y Desmidiaceae. El fitoplancton está dominado por tres especies de *Botryococcus*, tres de *Microcystis* y dos de *Melosira*.

Los estudios de zooplancton en diez lagos han producido 32 taxones, que pertenecen a los Copepoda, Ostracoda y Cladocera (Deevey *et al.* 1980a, 1980b). La región se distingue por ser el único lugar donde se encuentra el ostrácodo pelágico *Cypria petenensis*. Esta especie endémica es el único ostrácodo pelágico del

Tabla 1. Concentraciones de iones en mili-equivalentes por litro ($meq\ L^{-1}$) y concentración de fósforo total en microgramos por litro ($\mu g\ L^{-1}$) en las aguas de varios lagos de Petén central. Datos de Deevey *et al.* (1980a) y Brenner *et al.* (1990).

Lago	Ca	Mg	Na	K	HCO_3	Cl	SO_4	*Total	P
Chilonché	0.05	0.03	0.10	0.06	0.18	0.06	0.03	0.49	
Chimáj	0.01	0.03	0.04	0.00	0.08	0.00	0.00	0.16	
Yaxhá	1.58	0.28	0.43	0.16	1.94	0.33	0.23	4.92	36
Sacnáb	1.23	0.46	0.62	0.22	1.77	0.41	0.25	4.97	27
Quexil	1.54	0.24	0.29	0.07	1.72	0.23	0.15	4.24	26
Petenxil	1.84	0.16	0.25	0.02	1.52	0.13	0.71	4.63	30
Sacpuy	0.91	0.27	0.45	0.09	1.24	0.29	0.10	3.35	24
Oquevix	1.35	0.12	0.19	0.04	1.50	0.10	0.03	3.33	18
Bolamchác	1.45	0.23	0.24	0.22	1.86	0.21	0.08	4.29	
**Petén-Itzá	3.34	1.52	0.40	0.11	1.56	0.32	3.19	10.45	
**Macanché	2.30	4.41	0.76	0.28	3.10	0.88	4.02	15.75	32
**Monifata 1	29.41	0.95	0.25	0.06	2.66	0.25	29.86	63.39	54
**Salpetén	42.00	24.44	4.98	0.88	1.17	3.81	68.93	146.35	45

*En algunos casos, el total de $meq\ L^{-1}$ no es equivalente a la suma de las concentraciones individuales, como consecuencia de aproximar los valores individuales durante el calculo. **Aguas dominadas por sulfatos.

Nuevo Mundo. Dentro del grupo de copepodos, las cuatro especies mas esparcidas y abundantes son: *Diaptomus dorsalis, Mesocyclops inversus, M. edax* y *Tropocyclops prasinus mexicanus*. La *Eubosmina tubicen* es la única especie del grupo Cladocera que es importante en el plancton. El estudio de Covich (1976) es el único que investigó los gastéropodos y llevó a cabo una evaluación de los cambios en la comunidad molusca, mediante el análisis de los restos de conchas preservados en núcleos de sedimentos.

A pesar de la importancia del pescado en la dieta de los peteneros, no existe ningún estudio de las dinámicas de poblaciones de peces en los lagos de Petén. Un reconocimiento de la ictiofauna fue hecho por Hubbs en 1935 (no publicado). R.M. Bailey y D.E. Rosen formaron otras colecciones de peces durante las décadas de 1960 y 1970 (no publicados). Los investigadores recolectaron 22 especies de peces en los Lagos Petén-Itzá, Salpetén, Macanché, Yaxhá y Sacnáb (Tabla 2). Todas las especies fueron encontradas en el Lago Petén-Itzá y sus fuentes. Los peteneros comen varias especies de la familia Cichlidae, incluyendo el "blanco" (*Petenia splendida*), un animal que puede pesar entre uno y dos kilos.

Los lagos en Petén también funcionan como hábitat para otros grupos de animales acuáticos que son explotados por humanos, como los moluscos, batracios, tortugas, cocodrilos y aves. A muchos animales terrestres, los lagos les sirven de fuente de agua potable. Este grupo de organismos incluye no sólo animales silvestres, sino también ganado.

PALEOLIMNOLOGIA

Hemos usado métodos paleolimnológicos para investigar el impacto de los cambios climáticos y las actividades humanas sobre el medio ambiente de Petén. Un núcleo de sedimento de 19.5 m de largo fue colectado en la parte profunda (~30 m) del Lago Quexil. Este perfil representa aproximadamente 36,000 años de sedimentación. Hasta ahora, este núcleo es el más largo que hemos sacado en Petén, pero las imágenes sísmicas de los depósitos en el Lago Petén-Itzá indican que hay lugares donde hay >80 metros de sedimentación. Es posible que Petén-Itzá haya preservado un registro paleoclimático de varios ciclos glaciales/inter-glaciales y estamos planeando perforarlo. El registro de polen en Quexil indica que no había una selva tropical en la región durante el Pleistoceno tardío, hace 10,500 años (Leyden 1984, Leyden *et al.* 1993, 1994, Brenner 1994, Brenner *et al.* 2002). Los tipos de vegetación que predominaron a finales del Pleistoceno incluían hierbas, pastos y matas. Varias líneas de evidencia, incluyendo los isótopos estables (^{18}O en $CaCO_3$), polen y minerales, indican que el clima en Petén fue relativamente seco y frío a

Tabla 2. Lista de peces encontrados en los Lagos Petén-Itzá, Salpetén, Macanché, Yaxhá, y Sacnáb. Datos de R.M. Bailey and D.E. Rosen (no publicado).

Familia	Nombre científico	Nombre vulgar
Clupeidae	*Dorosoma petenense*	sardina de leche
Characidae	*Astyanax fasciatus*	sardina
Characidae	*Hyphessobrycon compressus*	sardina
Pimelodidae	*Rhamdia guatemalensis*	juilín
Atherinidae	*Melaniris sp.*	cilí
Cyprinodontidae	*Rivulus tenuis*	—
Poeciliidae	*Poecilia mexicana*	pultá
Poeciliidae	*Poecilia petenensis*	aletón
Poeciliidae	*Xiphophorus maculatus*	—
Poeciliidae	*Gambusia yucatana*	—
Poeciliidae	*Gambusia sexradiata*	pultá
Poeciliidae	*Belonesox belizanus*	tuxi/tulxi
Poeciliidae	*Heterandria bimaculata*	—
Cichlidae	*Cichlasoma melanurum*	mojarra
Cichlidae	*Cichlasoma octofasciatum*	—
Cichlidae	*Cichlasoma robertsoni*	xibal
Cichlidae	*Cichlasoma urophthalmus*	bulito/bul
Cichlidae	*Cichlasoma salvini*	consón
Cichlidae	*Cichlasoma friedrichsthali*	consón/guapote
Cichlidae	*Cichlasoma affine*	xixi/xibal
Cichlidae	*Petenia splendida*	blanco
Synbranchidae	*Synbranchus marmoratus*	anguila

finales de la época glacial, entre ~36,000 y 10,500 años antes del presente (AP). Durante el fin del Pleistoceno, el nivel del agua en el Lago Quexil fue muy bajo. Hace ~10,500 años, la selva tropical se extendió en Petén como consecuencia de los cambios climáticos. Hubo condiciones más húmedas y cálidas que permitieron el crecimiento de las plantas tropicales que integran el bosque actual (Lundell 1937), y el incremento de precipitación causó un aumento en el nivel de los lagos en la región.

Análisis del polen en núcleos de varios lagos en Petén indica que la selva tropical surgió hace 10,500 años y persistió por más de 6,000 años (Cowgill et al. 1966, Deevey 1978, Wiseman, 1978, Deevey *et al.* 1979, Leyden 1987, Vaughan *et al.* 1985, Curtis *et al.* 1998, Islebe *et al.* 1996, Brenner 1994, Brenner *et al.* 2002). Los Mayas empezaron a tumbar los árboles para su agricultura hace más de 3,000 años. Los estudios geoquímicos de los núcleos de sedimento muestran que la deforestación prehistórica trajo como consecuencia la erosión de suelos y una rápida acumulación de cieno y arcilla en los lagos (Deevey *et al.* 1979, Deevey and Rice 1980, Binford 1983, Binford *et al.* 1987, Brenner 1978, 1983a, 1994, Brenner *et al.* 2002). Cuando se taló la selva, los suelos ricos en nutrientes fueron expuestos y trasladados a los lagos como coluvio (Deevey *et al.* 1979, Brenner 1978, 1983a, 1983b, Rice *et al.* 1983, 1985). Esta pérdida de nutrientes edáficos, en combinación con la coluviación persistente, contribuyó a la diminución de las cosechas y a la baja producción de proteínas acuáticas. Es posible que estos impactos ambientales contribuyeron al colapso de la población del Maya Clásico, alrededor de los años 850-900 d.C..

Los estudios paleolimnológicos en los Lagos Chichancanab y Punta Laguna, al norte de la Península Yucatán (Figura 1), apuntan a que una sequía prolongada también influyó en el decaimiento cultural (Hodell *et al.* 1995, 2000, 2001, Curtis *et al.* 1996, Brenner *et al.* 2001, 2002). Los cambios en la relación entre evaporación y precipitación fueron inferidos usando los isótopos estables de oxígeno ($^{18}O/^{16}O$) en las conchas fósiles de ostrácodos y gastéropodos. Una sequía muy fuerte ocurrió entre los años 800 y 1000 d.C., cuando la cultura del Clásico colapsó. En esta investigación tratamos de determinar si el impacto de la sequía fue extenso y afectó Petén (Rosenmeier *et al.* 2002a, 2002b). Los datos paleoecológicos de la Península de Yucatán indican que en esta región de agricultura marginal, donde las lluvias son muy estacionales, los cambios climáticos bruscos y no predecibles pueden alterar la producción agrícola y acarrear graves consecuencias para las poblaciones humanas (Brenner *et al.* 2001, Hodell *et al.* 1995, 2000).

La población Maya que ocupó Petén durante el período Clásico disminuyó rápidamente después del 900 d.C. (Rice y Rice 1990). Pasada la conquista europea, la población indígena bajó más. Durante la primera parte del siglo XVIII, sólo ~3000 personas vivieron en la región. El número de habitantes creció a sólo ~25,000 a principios de la década de 1960 (Cowgill y Hutchinson 1963, Schwartz 1990). La evidencia palinológica puede usarse para mostrar que la selva creció otra vez, con la diminución de impactos antropogénicos. Los suelos se estabilizaron y la coluviación se redujo a consecuencia del restablecimiento de la selva. Ahora tenemos un proyecto para estudiar los detalles del proceso de reforestación. Entre las preguntas más importantes que deben plantearse para la investigación destacan las siguientes: ¿Cuándo empezó la recuperación de la selva? y ¿Cuánto tiempo abarca el proceso de reforestación? Hasta ahora, la cronología de reforestación es equívoca, porque hay problemas en la datación de sedimentos en esta región cárstica (Leyden *et al.* 1994). Algunos estudios paleolimnológicos sugieren que la reforestación comenzó después del Colapso Clásico, cerca del 900 d.C. (Deevey *et al.* 1979, Vaughan *et al.* 1985, Leyden *et al.* 1987). Otras investigaciones realizadas en los lagos de las sabanas indican que la recuperación de la selva se pospuso hasta el ~1600 d.C. (Brenner *et al.* 1990).

Durante las décadas pasadas más recientes, los altos incrementos proporcionales de inmigración fueron los responsables del crecimento rápido de la población en Petén. El número de habitantes en el departamento, en un cálculo probablemente excesivo, es de 500,000. Una consecuencia del aumento en la población es la destrucción de la selva para la agricultura y la explotación de madera. Schwartz (1990) ha calculado que aproximadamente 40-50% del paisaje fue deforestado o perturbado en 1985. Al final de esta década, es posible que un 60% de la vegetación haya sufrido impactos antropogénicos. Como la situación durante el tiempo de los antiguos Mayas, mucha de la colonización de la región se dirige a las cuencas donde hay fuentes de agua y otros recursos lacustres. Los estudios paleolimnológicos proveen una comprensión de los impactos ambientales que pueden repercutir en la expansión de poblaciones y en las actividades de agro-ingeniería. Utilizamos esta perspectiva histórica para describir los problemas ambientales que afrontan los ecosistemas acuáticos del Petén actual y para pronosticar futuras dificultades. Recomendamos algunas maneras de monitorear los lagos y de mitigar algunos impactos negativos en las cuencas.

IMPACTOS RECIENTES EN LAS CUENCAS DE PETEN Y LAS PERSPECTIVAS PARA EL FUTURO

Las cuencas de Petén han sufrido un incremento en la proporción de deforestación durante las décadas recientes. Entre las consecuencias que podemos anticipar, mencionaremos una aceleración en coluviación y una deficiencia de nutrientes en los suelos ribereños. Los suelos de las colinas y pendientes muestran buen drenaje y son los preferidos para la agricultura (roza-tumba-quema). También son muy propensos a la erosión rápida. Sería prudente elaborar programas para protección de las selvas ribereñas y para prevenir la erosión.

Los datos paleolimnológicos, en combinación con otras evidencias, como la de los microfósiles (conchas de gastéropodos) encontrados en los suelos alrededor de los lagos, indican que el nivel del agua, dentro de los cuerpos de agua en Petén, ha fluctuado mucho durante el transcurrir de los milenios. Es probable que dichas fluctuaciones vayan asociadas con los cambios en la cantidad de precipitación o el drenaje subterráneo, pero también es posible que la deforestación antropogénica influya sobre la hidrología de las cuencas. Por ejemplo, durante el Período Clásico, la región alrededor del Lago Salpetén se deforestó por completo y el nivel del lago era muy alto (Rosenmeier *et al.* 2002a). Es posible que la pérdida de vegetación haya contribuido a la elevación del nivel debido a una reducción en la transpiración de las plantas y a una diminución en la retención de húmedad en los suelos. Es factible que la tala del bosque haya repercutido en un incremento en el volumen del agua que llegó al lago como drenaje. En todo caso, los lagos de Petén han sido propensos a fluctuar rápidamente durante el siglo pasado y es probable que la deforestación, dentro de las cuencas en el futuro, va a exagerar esta tendencia. Es muy posible que los niveles suban otra vez en las décadas venideras, por lo que sería recomendable disuadir a la gente de levantar edificaciones en las orillas de los lagos.

Podemos anticipar otros resultados de la colonización en las cuencas de Petén. Uno es el de la eutroficación cultural de los lagos. Se denomina eutroficación al proceso de enriquecer las aguas con nutrientes, especialmente fósforo (P) y nitrógeno (N), que son los elementos esenciales para la producción primaria en los ecosistemas acuáticos. Las fuentes de nutrientes incluyen los desperdicios humanos y los de otros animales, abono para agricultura y los suelos erosivos. Algunas veces, el incremento moderado en la entrega de nutrientes puede ser visto como benéfico, si redunda en un aumento de la producción en los niveles altos del sistema trófico: peces, por ejemplo. En cambio las altas concentraciones de sales nutritivas pueden acarrear consecuencias nocivas como, por ejemplo, la proliferación de algas (especialmente cianofitas), una reducción en la cantidad de oxígeno en el agua (anoxia) y, potencialmente, mortandad de peces.

Existen pruebas de que el desarrollo en Petén ha afectado los lagos y el proceso de eutroficación cultural ha comenzado. Por ejemplo, las poblaciones densas de algas ocurren cerca de la orilla del Lago Petén-Itzá, al oeste del camino a Flores, donde las aguas negras, ricas en nutrientes, entran en el lago. Además, las cianobacterias, capaces de fijar el nitrógeno, dominan el fitoplancton en la parte sur del lago (Brezonik y Fox 1974). Por la abundancia de cianofitas se infiere que el lago recibe fósforo antropogénico. Otra prueba la constituye un núcleo de sedimento obtenido en la bahía entre Flores y San Benito. Las medidas estratigráficas de los isótopos estables del nitrógeno (^{15}N) en la materia orgánica indican que las muestras más recientes están enriquecidas en ^{15}N. Es probable que este cambio refleje una presencia de despedicios humanos, rica en ^{15}N (Rosenmeier, en revisión), y que la contaminación en las regiones urbanizadas (e.g. Flores-Santa Elena-San Benito) esté afectando las poblaciones de peces. Cerca de Flores, muchos peces de la familia Cichlidae sufren de úlceras o tumores anormales y se han dado casos de muertes de "blancos" en 2001.

Durante el mes de agosto de 1999, había una impresionante proliferación de algas dentro de los Lagos Macanché y Salpetén. Los residentes aledaños a los lagos nos dijeron que muchos peces mueren cada año, particularmente durante el invierno del hemisferio norte, durante diciembre y enero. Este fenómeno puede ser natural y es factible que ocurra cuando el agua de los lagos profundos empieza a circular; pero también es posible que el impacto sobre las poblaciones de peces sea consecuencia de la eutroficación reciente. Durante el invierno, las aguas superficiales se enfrían y la columna de agua alcanza una condición isotérmica. Al mismo tiempo, las aguas del hipolimnio, que son anóxicas después del período prolongado de estratificación, empiezan a subir por causa de la circulación física. El oxígeno en las aguas superficiales se diluye y es causa de un estrés para los peces. El oxígeno puede disminuir aun más como consecuencia de los iones reducidos, como Fe^{+2} y H_2S, y aumentar la demanda de oxígeno biológico debido a la circulación invernal. La eutroficación cultural puede acrecentar el problema debido al incremento de la demanda de oxígeno biológico y químico, y acelerar una anoxia completa dentro del hipolimnio.

Los problemas de salud pública se vinculan a la eutroficación cultural de los lagos en Petén. El enriquecimento de las aguas es, en cierta medida, una consecuencia de la contaminación por deperdicios humanos y animales, que dispersan en el agua muchos organismos responsables de enfermedades. Entre las enfermedades que se encuentran en las aguas y que se transmiten por el mecanismo "fecal-oral", se incluyen la hepatitis (tipo A), la tifoidea y varias formas de diarrea causadas por agentes que incluyen bacterias (e.g. *E. coli*), amebas, flagelados y ciliados.

La calidad del agua en los lagos de Petén puede protegerse si las cuencas se manejan de manera prudente. Un método eficaz para reducir la contaminación con nutrientes y otros contaminantes es el tratamiento de las aguas negras, que conviene realizar en áreas urbanizadas como Flores, Santa Elena y San Benito. En otros lugares se puede prevenir la contaminación de aguas instalando fosas sépticas o construyendo letrinas. En algunos casos, es recomendable la transferencia del ganado fuera de la cuenca.

Es difícil evaluar la magnitud de los problemas por eutroficación o contaminación en los lagos de Petén sin un programa de monitoreo. Hasta ahora, el muestreo de los lagos no presta mucha atención a las fluctuaciones estacionales en variables como la temperatura, el oxígeno o los procesos biológicos, entre los que pueden incluirse el uso de nutrientes y la productividad primaria. El muestreo de los principales cuerpos de agua debe formar parte de un programa regular, capaz de discernir los cambios en la calidad del agua. Es muy importante establecer tal programa antes de que los lagos sufran mayor impacto antropogénico. De otro modo será difícil conocer las condiciones limnológicas naturales o establecer cuándo ha ocurrido el proceso de eutroficación. Sería ideal efectuar mensualmente el muestreo de cada lago, para establecer las variables limnológicas básicas, como temperatura, oxígeno, nutrientes (N, P), pH, conductividad, claridad (el disco Secchi), clorofila *a*, y composición de la comunidad de fitoplancton. También sería prudente hacer un análisis de las bacterias (coliformas). Es importante obtener muestras no sólo en los lagos que han sufrido impactos recientes, sino también en algunos de los lagos no perturbados. Estos sistemas pueden servir como "controles."

Se deben intentar otros estudios tendentes a garantizar que la gente de Petén pueda aprovechar los recursos sostentibles. Por ejemplo, a pesar de que el "blanco" (*Petenia splendida*) sirva de alimento en Petén, es poco conocido en sus poblaciones naturales, como tampoco se conoce su pesca en los lagos. El manejo de este recurso requiere investigaciones sobre la estructura de las poblaciones en los lagos, la condición de los peces, la situación ecológica, incluyendo la dieta y el grado de explotación del recurso por los peteneros.

El manejo prudente de las cuencas y lagos en Petén requiere de la solidaridad y cooperación de los residentes locales, los científicos y las instituciones gubernamentales. También demanda apoyo financiero para hacer posible la recolección y el análisis de los datos. Cuando los estudios se terminen, habrá necesidad de conseguir y mantener fondos para el monitoreo futuro de los lagos y para garantizar que los ecosistemas gocen de la protección necesaria contra los impactos negativos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda de la Dra. Margaret Dix, el Dr. Michael Dix, y la Dra. Marion Popenoe de Hatch, de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG). Apreciamos mucho los esfuerzos de varios estudiantes y graduados de la UVG que nos acompañaron al campo en 1999 y 2002. Ellos incluyen Lucía Corral, Oscar Juárez, Gabriela Ponce, Rodolfo Valdéz, Julia Quiñónez, Arturo Godoy, Liseth Pérez, Laura Rodríguez, y Jacobo Blijdenstein.

REFERENCIAS

Basterrechea Diaz, M. 1988a. Limnología del Lago Petén Itzá, Guatemala. Revista de Biología Tropical 36:123-127.

Basterrechea Diaz, M. 1988b. Caracterización limnológica preliminar de 32 lagunas de Guatemala. Revista de Biología Tropical 36:115-122.

Binford, M.W. 1983. Paleolimnology of the Peten Lake District, Guatemala, I. Erosion and deposition of inorganic sediment as inferred from granulometry. Hydrobiologia 103:199-203.

Binford, M.W., M. Brenner, T.J. Whitmore, A. Higuera-Gundy, E.S. Deevey and B.W. Leyden. 1987. Ecosystems, paleoecology and human disturbance in subtropical and tropical America. Quaternary Science Reviews 6:115-128.

Brenner, M. 1978. Paleolimnological assessment of human disturbance in the drainage basins of three northern Guatemalan lakes. M.S. thesis, Univ. Florida, Gainesville. 128 p.

Brenner, M. 1983a. Paleolimnology of the Maya region. Ph.D. dissertation, Univ. Florida, Gainesville. 249 p.

Brenner, M. 1983b. Paleolimnology of the Peten Lake District, Guatemala II. Mayan population density and sediment and nutrient loading of Lake Quexil. Hydrobiologia 103:205-210.

Brenner, M. 1994. Lakes Salpeten and Quexil, Peten, Guatemala, Central America. P. 377-380, In E. Gierlowski-Kordesch and K. Kelts (eds.), Global Geological Record of Lake Basins , Vol. 1. Cambridge University Press.

Brenner, M., D.A. Hodell, J.H. Curtis, M. Rosenmeier, M.W. Binford, and M.B. Abbott. 2001. Abrupt climate change and pre-Columbian cultural collapse. Pp. 87-103, In V. Markraf (ed.), Interhemispheric Climate Linkages. Academic Press.

Brenner, M., D.A. Hodell, J.H. Curtis, M.F. Rosenmeier, F.S. Anselmetti, and D. Ariztegui. 2002. Paleolimnological approaches for inferring past climate change in the Maya region: recent advances and methodological limitations. In, A. Gómez-Pompa, M. F. Allen, S. Fedick & J. J. Jiménez-Osornio (Eds.), *Three Millennia at the Human-Wildland Interface*. The Haworth Press, New York.

Brenner, M., B.W. Leyden, and M.W. Binford. 1990. Recent sedimentary histories of shallow lakes in the Guatemalan savannas. Journal of Paleolimnology 4:239-252. Brenner, M., M.F. Rosenmeier, D.A. Hodell, and J.H. Curtis. 2002. Paleolimnology of the Maya Lowlands: long-term perspectives on interactions among, climate, environment, and humans. Ancient Mesoamerica 13:141-157.

Brezonik, P.L. and J.L. Fox. 1974. The limnology of selected Guatemalan lakes. Hydrobiologia 45:467-487.

Covich, A.P. 1976. Recent changes in molluscan diversity of a large tropical lake (Lago de Peten, Guatemala). Limnology and Oceanography 21:51-59.

Cowgill, U.M., and G.E. Hutchinson. 1963. Sex-ratio in childhood and the depopulation of the Peten, Guatemala. Human Biology 35:90-103.

Cowgill, U.M., G.E. Hutchinson, A.A. Racek, C.E. Goulden, R. Patrick, and M. Tsukada. 1966. The history of Laguna de Petenxil, a small lake in northern Guatemala. Memoirs of the Connecticut Academy of Sciences 17:1-126.

Curtis, J.H., M. Brenner, D. A. Hodell, R. A. Balser, G. A. Islebe, and H. Hooghiemstra. 1998. A multi-proxy study of Holocene environmental change in the Maya Lowlands of Peten, Guatemala. Journal of Paleolimnology 19:139-159.

Curtis, J.H., M. Brenner, and D.A. Hodell. 2001. Climate change in the circum-Caribbean (late Pleistocene-to-Present) and implications for regional biogeography. P. 35-54, In C.A. Woods and F.E. Sergile, Biogeography of the West Indies: Patterns and Perspectives, 2nd Edition. CRC Press, Boca Raton, FL.

Curtis, J.H., D.A. Hodell, and M. Brenner. 1996. Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya cultural evolution. Quaternary Research 46:37-47.

Deevey, E.S. 1978. Holocene forests and Maya disturbance near Quexil Lake, Peten, Guatemala. Polish Archives of Hydrobiology 25:117-129.

Deevey, E.S., M. Brenner, M.S. Flannery, and G.H. Yezdani. 1980a. Lakes Yaxha and Sacnab, Peten, Guatemala: Limnology and hydrology. Archiv für Hydrobiologie Supplement 57:419-460.

Deevey, E.S., M. Brenner, and M.W. Binford. 1983. Paleolimnology of the Peten Lake District, Guatemala III. Late Pleistocene and Gamblian environments of the Maya area. Hydrobiologia 103:211-216.

Deevey, E.S., G.B. Deevey, and M. Brenner. 1980b. Structure of zooplankton communities in the Peten lake district, Guatemala. P. 669-678, In W.C. Kerfoot (ed.), Evolution and ecology of zooplankton communities. Univ. Press New England, Hanover, NH, 793 p.

Deevey, E.S. and D.S. Rice. 1980. Coluviación y retención de nutrientes en el distrito lacustre del Peten central, Guatemala. Biotica 5:129-144.

Deevey, E.S., D.S. Rice, P.M. Rice, H.H. Vaughan, M. Brenner, and M.S. Flannery. 1979. Mayan urbanism: Impact on a tropical karst environment. Science 206:298-306.

Deevey, E.S., H.H. Vaughan and G.B. Deevey. 1977. Lakes Yaxha and Sacnab, Peten, Guatemala: planktonic fossils and sediment focusing. P. 189-196, In H.L. Golterman (Ed), Interactions Between Sediments and Fresh Water. Dr. W. Junk B.V. Publishers, The Hague.

Hodell, D.A., M. Brenner, and J.H. Curtis. 2000. Climate change in the northern American tropics since the last ice age: implications for environment and culture. P. 13-38, In D.L. Lentz (ed.), Imperfect Balance: Landscape transformations in the Precolumbian Americas. Columbia University Press, N.Y.

Hodell, D.A., M. Brenner, J. H. Curtis, and T. P. Guilderson. 2001. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. Science 292:1367-1370.

Hodell, D.A., J.H. Curtis, and M. Brenner. 1995. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. Nature 375:391-394.

Islebe, G., H. Hooghiemstra, M. Brenner, J.H. Curtis, and D.A. Hodell. 1996. A Holocene vegetation history from lowland Guatemala. The Holocene 6:265-271.

Leyden, B.W. 1984. Guatemalan forest synthesis after Pleistocene aridity. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 81:4856-4859.

Leyden, B.W. 1987. Man and climate in the Maya lowlands. Quaternary Research 28:407-414.

Leyden, B.W., M. Brenner, and B.H. Dahlin. 1998. Cultural and climatic history of Cobá, a lowland Maya City in Quintana Roo, Mexico. Quaternary Research 49: 111-122.

Leyden, B.W., M. Brenner, D.A. Hodell, and J.H. Curtis. 1993. Late Pleistocene climate in the Central American lowlands. American Geophysical Union Geophysical Monograph 78:165-178.

Leyden, B.W., M. Brenner, D.A. Hodell, and J.H. Curtis. 1994. Orbital and internal forcing of climate on the Yucatan Peninsula for the past ca. 36 ka. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 109:193-210.

Leyden, B.W., M. Brenner, T.J. Whitmore, J.H. Curtis, D.R. Piperno, and B.H. Dahlin. 1996. A record of long- and short-term climatic variation from northwest Yucatan: Cenote San Jose Chulchaca. P. 30-50, In S.L. Fedick (ed.), The Managed Mosaic: Ancient Maya Agriculture and Resource Use. University of Utah Press, Salt Lake City.

Lundell, C.L. 1937. The vegetation of Peten. Carnegie Institution, Washington, D.C. 244 p.

Penados C., C.E. 1980. ¿Tendrá solución el problema del Lago Petén-Itza? Petén-Itza 21:9.

Rice, D.S. and P.M. Rice. 1990. Population size and population change in the Central Peten Lake Region, Guatemala. P. 123-148, In T.P. Culbert and D.S. Rice (eds.), Precolumbian population history in the Maya Lowlands. Univ. of New Mexico Press, Albuquerque.

Rice, D.S., P.M. Rice, and E.S. Deevey. 1983. El impacto de los Mayas en el ambiente tropical de la cuenca de los lagos Yaxhá y Sacnab, El Petén, Guatemala. American Indigena 43:261-297.

Rice, D.S., P.M. Rice, and E.S. Deevey. 1985. Paradise lost: Classic Maya impact on a lacustrine environment. P. 91-105, In M. Pohl (ed.), Prehistoric lowland Maya environment and subsistence economy. Peabody Museum Papers 77, Harvard Univ. Press, Cambridge, MA.

Rosenmeier, M.F., M. Brenner, W.F. Kenney, C.M. Taylor, and T.J. Whitmore. In revision. Recent eutrophication of Lake Petén Itzá, Guatemala: human impact on a large tropical lake. Hydrobiologia.

Rosenmeier, M.F., D.A. Hodell, M. Brenner, J.H. Curtis, J.B. Martin, F. Anselmetti, D. Ariztegui, and T.P. Guilderson. 2002a. Influence of vegetation change on watershed hydrology: implications for paleoclimatic interpretation of lacustrine ^{18}O records. Journal of Paleolimnology 27:117-131.

Rosenmeier, M.F., D.A. Hodell, M. Brenner, J. H. Curtis, and T. P. Guilderson. 2002b. A 4000 year record of climate change and human disturbance from the southern Maya lowlands, Peten, Guatemala. Quaternary Research, 57: 183-190.

Schwartz, N.B. 1990. Forest Society: A Social History of Peten, Guatemala. Univ. of Pennsylvania Press, Philadelphia.

Simmons, C.S., J.M. Tarano T., and J.H. Pinto. 1959. Clasificacion de Reconocimiento de los Suelos de la Republica de Guatemala, Ministerio de Agricultura, Guatemala. 1000 p.

Vaughan, H.H., E.S. Deevey, and S.E. Garrett-Jones. 1985. Pollen stratigraphy of two cores from the Peten Lake District. P. 73-89, In M. Pohl (ed.), Prehistoric lowland Maya environment and subsistence economy. Peabody Museum Papers 77, Harvard Univ. Press, Cambridge, MA.

Vinson, G.L. 1962. Upper Cretaceous and Tertiary stratigraphy of Guatemala. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 46:425-456.

Whitmore, T.J., M. Brenner, J.H. Curtis, B.H. Dahlin, and B.W. Leyden. 1996. Holocene climatic and human influences on lakes of the Yucatan Peninsula, Mexico: an interdisciplinary, palaeolimnological approach. The Holocene 6:273-287.

Wiseman, F.M. 1978. Agricultural and historical ecology of the Maya lowlands. P. 63-115, In P.D. Harrision and B.L. Turner II (eds.), Prehispanic Maya Agriculture. Univ. of New Mexico Press, Albuquerque.

brenner@ufl.edu