

Variaciones estacionales de la estructura comunitaria del fitoplancton en zonas de descarga de agua subterránea en la costa norte de la Península de Yucatán

Cynthia Catalina Álvarez-Góngora, Maria de los Angeles Liceaga-Correa & Jorge Alfredo Herrera-Silveira

Laboratorio de Producción Primaria, Departamento de Recursos del Mar del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados, Unidad Mérida. Carretera antigua a Progreso km 6, C.P. 97310. Yucatán, México; ccalvarez76@gmail.com, liceaga@mda.cinvestav.mx, jherrera@mda.cinvestav.mx

Recibido 11-II-2011. Corregido 20-VII-2011. Aceptado 22-VIII-2011.

Abstract: Seasonal variations of community structures phytoplankton in groundwater discharge areas along the Northern Yucatán Peninsula coast. The highly touristic Yucatán Peninsula is principally constituted with coastal marine environments. Like other coastal areas, this has been affected by the increase of waste water discharge, hydrological modifications and land use changes in the area. The phytoplankton community structure is one of the main components of coastal ecosystems and the most affected in hydrological processes. In order to follow the seasonal variations, the phytoplankton was characterized to follow the hydrological variability in two sites (Dzilam and Progreso) of the Northern Yucatán Peninsula. For this, cruises were carried out monthly during one year, from April 2004 to March 2005, with two samplings per season (dry, rainy and “nortes”). Hydrological variability was associated with seasonality and directly linked to groundwater discharges in the Dzilam area, and waste water discharges in the Progreso area. The highest nutrient concentrations occurred mainly during the rainy season. The phytoplankton community changes observed throughout the year suggested that the hydrological and chemical variability associated with seasonality and anthropogenic impacts have a strong influence. The substitution of diatoms by dinoflagellates as the dominant group in Progreso was the result of seasonal variability itself, but also could have been caused by eutrophic processes; while in Dzilam, the major presence of diatoms could have been favored by groundwater discharges. The results of this study can be used to understand the linkages between stressors from the anthropogenic activities and coastal water quality and changes. *Rev. Biol. Trop.* 60 (1): 157-172. Epub 2012 March 01.

Key words: coastal waters, phytoplankton, hydrological variability, seasonality, Yucatán.

Es reconocido que las variaciones estacionales de las características físicas y químicas del agua, influyen en la estructura de la comunidad de fitoplancton (Rojo *et al.* 2000, Philips *et al.* 2004). Esta estrecha relación entre ambiente y especies, ha contribuido a que se considere al fitoplancton como un indicador ecológico tanto en condiciones naturales como en condiciones de estrés ambiental de origen antropogénico. Las diferentes actividades humanas generan desechos que conducen a cambios en las condiciones naturales de los

sistemas costeros. Las descargas adicionales de nutrientes inorgánicos disueltos al medio costero pueden acelerar el proceso de eutrofización con lo cual se podrían favorecer cambios en la estructura de las comunidades de fitoplancton (Granelí *et al.* 2008, Howarth 2008).

Existe información de la asociación entre los aportes de nutrientes y los cambios de las comunidades de fitoplancton en zonas donde los aportes de agua a la zona costera provienen de ríos (Scharler & Baird 2003, Gobler *et al.* 2006). Sin embargo, son escasos los trabajos

de investigación relacionados con el comportamiento del fitoplancton en ambientes costeros caracterizados por recibir agua y nutrientes vía descargas subterráneas como sucede en los ambientes con suelos de tipo cársico. Estos sistemas costeros en particular, son vulnerables a la eutrofización debido a la porosidad y alto grado de permeabilidad, lo cual favorece la filtración al acuífero rápidamente, contaminándolo y teniendo como destino final las aguas de la zona costera (Tróccoli-Ghinaglia 2001, García-Solsona *et al.* 2010). Para el área de Yucatán existen estudios relacionados con la calidad del agua, vegetación sumergida y fitoplancton (Álvarez-Góngora 2001, Tróccoli-Ghinaglia 2001, Aguayo-González 2003, Álvarez-Góngora 2003, Capurro 2003, Aranda-Cirerol 2004, Herrera-Silveira *et al.* 2004, Tróccoli-Ghinaglia *et al.* 2004, Álvarez-Góngora & Herrera-Silveira 2006, Herrera-Silveira 2006, Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009) y en los últimos dos años se ha incorporado al monitoreo de la región el estudio de las corrientes y su relación con la dispersión de las proliferaciones algales (Enríquez *et al.* 2010). Estos estudios han servido como línea de base en el entendimiento de la variabilidad espacial y temporal del ambiente costero. Sin embargo, debido a la importancia ecológica y económica del área, se ha vuelto una necesidad la continuidad de dichas investigaciones a largo plazo. Se sabe que los compuestos nitrogenados son los que confieren a ciertas localidades costeras, incluyendo Progreso, un carácter eutrófico (Herrera-Silveira *et al.* 2004). Por otra parte, los aportes de agua subterránea en Dzilam, llamadas perturbaciones ambientales, son causales de que el incremento de silicatos y su variabilidad estacional sea de origen natural (Tróccoli-Ghinaglia 2001).

Debido al incremento del desarrollo urbano costero en Yucatán, las características cársicas del suelo y el incremento de actividades como el turismo y la pesca, es de gran interés determinar la existencia de variaciones en la composición de la comunidad del fitoplancton costero, en especial de algunas especies que han causado florecimientos algales nocivos y

que han aumentado su frecuencia de aparición. En el presente estudio se analizaron las variaciones temporales del fitoplancton costero en dos localidades de Yucatán, una asociada con impactos antrópicos que presentan características de eutrofización (Progreso), y otra en donde hay influencia de las descargas de aguas subterráneas en la costa (Dzilam). De esta manera, se espera identificar si estas diferencias hidrológicas y químicas originan los cambios producidos en la comunidad de fitoplancton y de que manera contribuyen con el replanteamiento y/o mejoramiento de los programas de monitoreo ya establecidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: La Península de Yucatán está bordeada por el Mar Caribe y el Golfo de México, comprendiendo una amplia plataforma carbonatada que se extiende hasta 100 millas desde el margen costero y con profundidades menores a 50m. La Corriente de Yucatán que fluye a lo largo de la costa de Quintana Roo y con una velocidad promedio de 0.75 nudos, entra al Golfo de México a través del Canal de Yucatán, que forma en el extremo oriental la Corriente de Lazo (Merino 1994). El clima es de tipo cálido-semiseco con régimen de lluvias en verano y escasas el resto del año. La precipitación anual media es de 760mm, y los vientos dominantes son del sureste y de baja intensidad (0-15km/h). Otros factores que son determinantes en el patrón climático son: las corrientes marinas, los vientos alisios, las ondas y tormentas tropicales (Orellana-Lanza *et al.* 2009). Sin embargo, de noviembre a febrero se presentan periodos caracterizados por moderadas precipitaciones (20-50mm) y vientos intensos (50-90km/h) asociados con frentes polares conocidos como “nortes”. El régimen climático del año está asociado con el patrón de lluvias, se reconocen las temporadas de secas (marzo-mayo), lluvias (junio-octubre) y “nortes” (noviembre-febrero) (Herrera-Silveira 2006).

La superficie cársica de la planicie continental es de una alta permeabilidad, lo cual

promueve la formación de un manto acuífero que descarga sus aguas en la zona costera con altas concentraciones de silicato y nitrato, sin embargo, el flujo del acuífero sufre variaciones estacionales que dependen del patrón meteorológico de la región. El agua filtrada vuelve a aflorar nuevamente hacia la superficie a manera de manantiales u “ojos de agua”, siendo la única fuente de agua dulce con la que cuenta el área y la cual descarga en forma puntual o difusa en la costa (Herrera-Silveira 2006). Se calcula que el volumen anual de descarga del acuífero a la costa es de $8.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}/\text{año}$ (Hanshaw & Back 1980).

Muestreros y análisis de laboratorio:

Se realizaron muestreos mensuales entre abril 2004 y abril 2005 en dos puertos del estado de Yucatán (Dzilam y Progreso), para su análisis se agruparon por época climática de la zona (secas, lluvias y nortes) (Fig. 1). En cada localidad se estableció un transecto perpendicular a la costa de 12Km de largo distribuyendo estaciones de muestreo desde 100m de la costa y posteriormente a cada kilómetro. En cada estación se tomaron datos de temperatura, salinidad y concentración de oxígeno disuelto *in situ* en superficie con una sonda multiparamétrica YSI 85 (YSI Incorporated, Ohio, USA). Se tomaron muestras de agua en superficie, se almacenaron en botellas de plástico tipo Nalgene de 1L y se

colocaron en una nevera plástica a 5°C para el posterior análisis de nutrientes. Se tomaron además 500mL para el análisis de fitoplancton y se les agregó 2.5mL de Lugol con base acetato de sodio para su preservación. Los análisis de nutrientes y de clorofila se realizaron en el Laboratorio de Productividad Primaria del CINVESTAV por medio de técnicas espectrofotométricas (nitritos, nitratos, amonio, fosfatos, silicatos) referidas en Parsons *et al.* (1984). El análisis del fitoplancton se realizó en el Laboratorio de Plancton del CINVESTAV, siguiendo la técnica de Utermöhl, referida por Hasle (1978). Las muestras se sedimentaron por 24 horas en cámaras Utermöhl de 50mL (Hydro-Bios Kiel, Germany) y se observaron en un microscopio invertido Axiovert 100 (Zeiss, Germany) con el objetivo 10x (NA 0.25). Se contaron 50 campos, y la manera en cómo se ubicaron mediante el uso de números al azar como coordenadas X-Y de la platina, y con un error de conteo del 30%. La ubicación taxonómica por género y especie de los grupos de fitoplancton se realizó utilizando los criterios de clasificación de Sournia (1986), Round *et al.* (1990), Chrétiennot-Dinet *et al.* (1993) y Tomas (1994). También se obtuvieron datos de abundancia, biomasa y frecuencia de especies. Para la verificación de nombres científicos de las especies se consultó la base de datos internacional de Guiry & Guiry (2011).

El análisis de la información hidrológica, consistió en determinar diferencias significativas entre las variables hidrológicas y químicas de las épocas climáticas a través de un análisis de varianza no paramétrico utilizando la prueba de significancia de Kruskal-Wallis ($p=0.05$; Boyer *et al.* 1997) con el software Statgraphics Plus versión 5.1 para Windows. Con los datos de fitoplancton se estimó la riqueza de especies, diversidad de Shannon, equitabilidad de Lloyd y Gelardi descritos en Krebs (1972). La asociación de las especies de fitoplancton con las variables hidrológicas y químicas se determinó con un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) y se consideró la frecuencia de las especies (>30%) como criterio base (ter

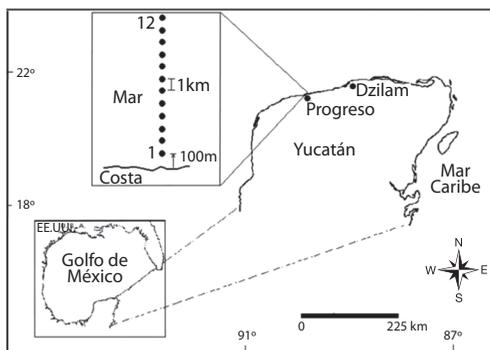


Fig. 1. Áreas de estudio y transecto de muestreo en la costa norte de Yucatán.

Fig. 1. Study and sampling areas in the North coast of Yucatan.

Braak 1986). Se utilizó el software MVSP versión tres para Windows.

RESULTADOS

El análisis de la variabilidad hidrológica y del fitoplancton en Dzilam y Progreso encontró diferencias significativas entre localidades y

entre épocas (Cuadro 1). Los valores y concentraciones medias de las variables hidrológicas se muestran en el cuadro 2.

En Dzilam, se encontró mayor variabilidad de la temperatura en lluvias y menor en nortes (Fig. 2a), mientras que la salinidad aunque fue variable (Fig. 2b) se mantuvo homogénea en las tres épocas (36psu). La concentración de

CUADRO 1

Valores de p y desviación estándar (DS) para la prueba de Kruskal-Wallis (95.0% confiabilidad) de las variables hidrológicas y biológicas en Dzilam y Progreso

TABLE 1

P values and standard deviation (SD) for Kruskal-Wallis test (95.0% confidence level) of hydrological and biological variables in Dzilam and Progreso

Variable	Entre sitios (Dzilam-Progreso)		Entre épocas en el mismo sitio					
	P	DS	Dzilam			Progreso		
			Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Temperatura (°C)	0.0003	2.29115		p=0.0000			p=0.0000	
			DS 1.613	DS 2.682	DS 1.625	DS 1.615	DS 0.987	DS 0.138
Salinidad (psu)	0.0000	0.90065		p=0.0292			p=0.0001	
			DS 1.107	DS 0.778	DS 0.985	DS 0.686	DS 0.523	DS 0.069
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.7607	1.87615		p=0.0000			p=0.0000	
			DS 2.033	DS 1.629	DS 1.445	DS 1.884	DS 1.688	DS 1.065
NH ₄ (μmol/L)	0.4235	2.14377		p=0.5200			p=0.0645	
			DS 2.189	DS 2.069	DS 1.496	DS 2.816	DS 1.542	DS 2.131
NO ₂ (μmol/L)	0.0232	0.49278		p=0.2775			p=0.0000	
			DS 0.524	DS 0.607	DS 0.375	DS 0.400	DS 0.383	DS 0.138
NO ₃ (μmol/L)	0.1754	1.31859		p=0.0238			p=0.9141	
			DS 1.646	DS 1.062	DS 1.234	DS 0.932	DS 1.118	DS 1.959
PO ₄ (μmol/L)	0.0304	0.58820		p=0.0059			p=0.0005	
			DS 0.657	DS 0.610	DS 0.413	DS 0.587	DS 0.417	DS 0.442
SiO ₄ (μmol/L)	0.0393	8.57266		p=0.7496			p=0.0000	
			DS 8.521	DS 7.313	DS 10.21	DS 7.194	DS 9.368	DS 5.274
Cl-a (mg/m ³)	0.9592	0.57934		p=0.0231			p=0.0470	
			DS 0.603	DS 0.627	DS 0.501	DS 0.604	DS 0.459	DS 0.408
Riqueza (# especies)	0.0156	3.731		p=0.0048			p=0.0179	
			DS 3.345	DS 3.452	DS 3.979	DS 4.048	DS 2.947	DS 4.353
Abundancia (Cel/l)	0.0002	1.7832		p=0.0138 (diatomeas)			p=0.562 (diatomeas)	
			DS 22.80	DS 9.780	DS 25.99	DS 46.98	DS 10.94	DS 51.75
				p=0.2512 (dinoflagelados)			p=0.1032 (dinoflagelados)	
			DS 20.45	DS 10.19	DS 16.28	DS 9.427	DS 37.24	DS 2.759
Diversidad (bit/ind)	0.0000	0.74265		p=0.0022			p=0.0060	
			DS 0.685	DS 0.688	DS 0.684	DS 0.567	DS 0.891	DS 0.770
Equitatividad	0.0142	0.18989		p=0.5945			p=0.3435	
			DS 0.156	DS 0.154	DS 0.153	DS 0.223	DS 0.295	DS 0.142

CUADRO 2

Valores y concentraciones medias de las variables hidrológicas en Dzilam y Progreso (SAL-salinidad, OD-oxígeno disuelto, Cl-a-clorofila-a)

TABLE 2

Values and mean concentrations from hydrological changes in Dzilam and Progreso (SAL-salinity, OD-dissolved oxygen, Cl-a-chlorophyll-a)

Sitio	Época	T (°C)	SAL (psu)	OD (mg/l)	NH ₄ (μmol/L)	NO ₂ (μmol/L)	NO ₃ (μmol/L)	PO ₄ (μmol/L)	(SiO ₄) (μmol/L)	Cl-a (mg/m ³)
Dzilam	Nortes	24	36	7.7	3.5	1.6	0.4	1.3	15	0.8
	Secas	27	36	6.1	3.9	1.5	0.5	1.1	15	1.0
	Lluvias	28	36	6.4	3.7	1.0	0.6	1.0	16	1.0
Progreso	Nortes	26	36	8.5	3.7	1.5	0.1	1.4	25	0.8
	Secas	28	37	6.1	3.5	1.6	0.5	1.0	17	0.9
	Lluvias	29	36	6.5	4.7	1.5	0.3	1.4	13	1.1

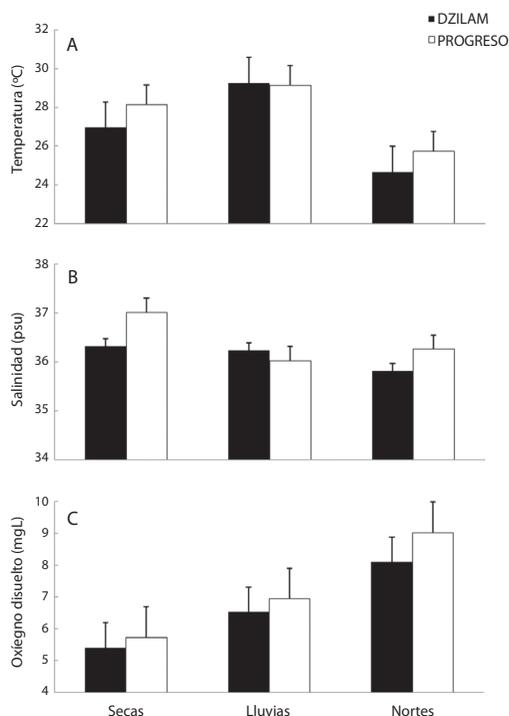


Fig. 2. Variación temporal de la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en Dzilam y Progreso.

Fig. 2. Temporal variability of temperature, salinity and dissolved oxygen in Dzilam and Progreso.

oxígeno disuelto mostró mayor variabilidad en nortes y menor en secas (Fig. 2c). El amonio tuvo mayor variabilidad en nortes y menor en secas (Fig. 3a), mientras que el nitrito se encontró más variable en secas y menor en lluvias y nortes (Fig. 3b), donde la más alta concentración (1.6μmol/L) se dió en nortes y la más baja (1μmol/L) en lluvias. El nitrato fue más variable en lluvias y menor en secas (Fig. 3c) mientras que el fosfato mostró poca variabilidad en las tres épocas (Fig. 4a). Los silicatos mostraron mayor variabilidad en lluvias y menor en secas (Fig. 4b), y se encontró la más alta concentración (16μmol/L) en lluvias y la más baja (15μmol/L) en nortes y secas. La clorofila-a tuvo mayor variabilidad en lluvias y nortes y menor en secas (Fig. 4c) la más alta concentración (1mg/m³) se midió en secas y lluvias y la más baja (0.8mg/m³) en nortes. Se reconocieron 42 especies de dinoflagelados y 43 diatomeas, y se encontró mayor variabilidad de la riqueza de especies en lluvias y nortes y menor en secas (Fig. 5a) mientras que la abundancia de fitoplancton total tuvo mayor variabilidad en nortes y menor en secas y lluvias (Fig. 5b). La diversidad mostró mayor variabilidad

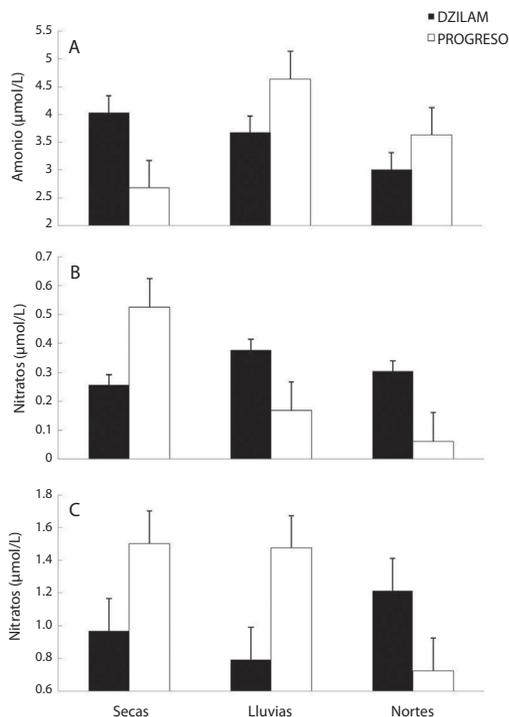


Fig. 3. Variación temporal del amonio, nitritos y nitratos en Dzilam y Progreso.

Fig. 3. Temporal variability of ammonium, nitrites and nitrates in Dzilam and Progreso.

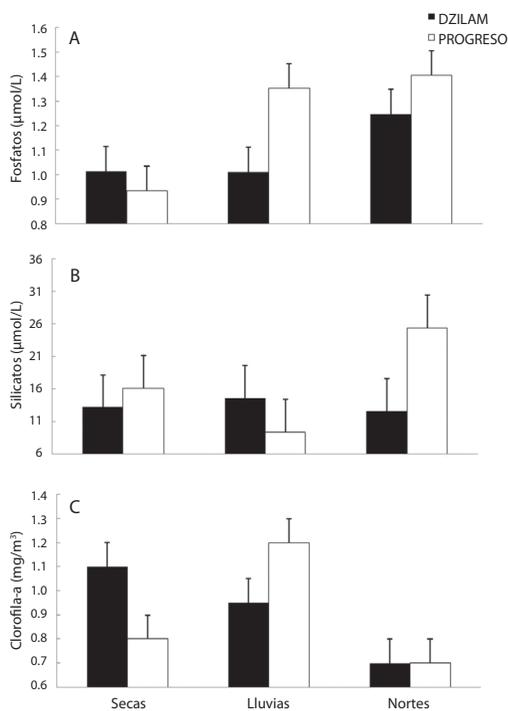


Fig. 4. Variación temporal del fosfato, silicato y clorofila-a en Dzilam y Progreso.

Fig. 4. Temporal variability of phosphate, silicate and chlorophyll-a in Dzilam and Progreso.

en lluvias y nortes y menor en secas (Fig. 5c); mientras que la equitatividad tuvo mayor variabilidad en lluvias y nortes y menor en secas (Fig. 5d). Con respecto a los cambios en los grupos de fitoplancton, las diatomeas mostraron una mayor variabilidad en lluvias y menor en secas y nortes (Fig. 6a) mientras que los dinoflagelados mayor en lluvias y nortes y menor en secas (Fig. 6b).

En Progreso, la variabilidad de temperatura fue mayor en lluvias y menor en secas (Fig. 2a), mientras que la salinidad fue mayor en nortes y menor en secas (Fig. 2b). El oxígeno disuelto tuvo mayor variabilidad en lluvias y nortes y la menor en secas (Fig. 2c) donde la más alta concentración (8.5mg/L) se midió en nortes y la más baja (6.1mg/L) en secas. La variabilidad del amonio fue mayor en secas y

menor en lluvias y nortes (Fig. 3a) donde la más alta concentración (4.7μmol/L) se dio en lluvias y la más baja (3.5μmol/L) en secas. El nitrito mostró mayor variabilidad en lluvias y menor en nortes (Fig. 3b) mientras que el nitrato tuvo mayor variabilidad en nortes y menor en secas y lluvias (Fig. 3c). El fosfato fue más variable en secas y lluvias y menos variable en nortes (Fig. 4a), la más alta concentración (1.4μmol/L) se dio en nortes y lluvias y la más baja (1μmol/L) en secas. Se encontró la mayor variabilidad de los silicatos en lluvias y nortes y la menor en secas (Fig. 4b) donde la más alta concentración (25μmol/L) se presentó en nortes y la más baja (13μmol/L) en lluvias. La clorofila-a mostró mayor variabilidad en nortes y menor en secas y lluvias (Fig. 4c), la más alta concentración (1.1mg/m³) se registró en

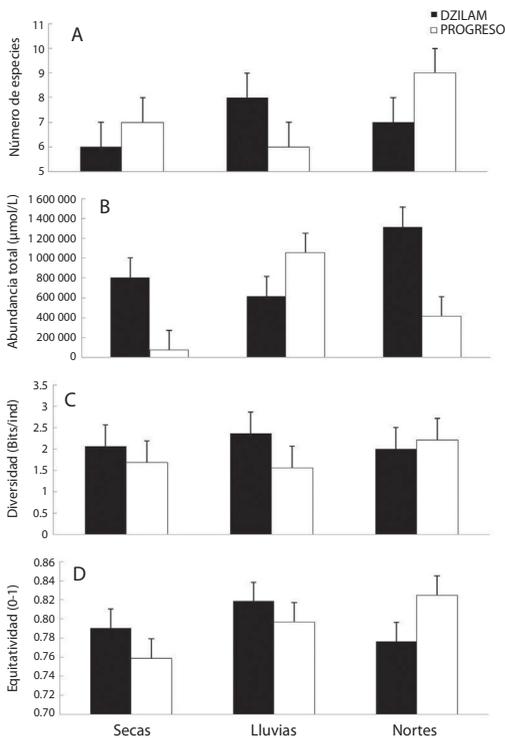


Fig. 5. Variación temporal de la riqueza, abundancia, diversidad y equitatividad del fitoplancton en Dzilam y Progreso.

Fig. 5. Temporal variability of richness, abundance, diversity and evenness from phytoplankton in Dzilam and Progreso.

lluvias y la más baja ($0.8\text{mg}/\text{m}^3$) en nortes. Se reconocieron 21 especies de dinoflagelados y 14 de diatomeas y se encontró que la riqueza de especies fue más variable en nortes y menos en secas (Fig. 5a). La abundancia de fitoplancton total se encontró con mayor variabilidad en lluvias y menor en secas y nortes (Fig. 5b) mientras que la diversidad mostró mayor variabilidad en lluvias y menor en secas (Fig. 5c). La equitatividad fue más variable en secas y lluvias y menor en nortes (Fig. 5d). Con respecto a la abundancia de grupos fitoplanctónicos, la variabilidad de las diatomeas fue igual en las tres épocas (Fig. 6a) mientras que los dinoflagelados mostraron una mayor variabilidad en la época de nortes y menor en secas y lluvias (Fig. 6b).

El análisis de correspondencia canónica mostró una asociación de las variables hidrológicas con el fitoplancton (Cuadro 3). En Dzilam, los ejes explican el 72% de la variabilidad. Al eje I se asoció la salinidad, temperatura, nitritos, fosfatos y clorofila-a; las especies que se relacionaron con estas variables fueron: *C. closterium*, *L. gracilis*, *N. longissima*, *P. oceanicum* y *S. trochoidea*. Al eje II el oxígeno disuelto, amonio, nitratos y silicatos (*G. toxicus*, *P. sulcata*, *P. bahamense*, *T. frauenfeldii* y *T. Nitzschioides*) (Fig. 7). En Progreso, los ejes explican el 83% de la variabilidad. Al eje I se relacionó el oxígeno disuelto, amonio, nitritos, silicatos y clorofila-a (*D. caudata*, *L. gracilis*, *P. belizeanum*, *P. minimum*, *P. brochii*, *P. bahamense* y *S. Trochoidea*). Al eje II la temperatura, salinidad, nitratos y fosfatos (*C. closterium*, *C. furca*, *N. longissima* y *O. Aurita*) (Fig. 8).

DISCUSIÓN

En Dzilam el microfitoplancton está compuesto mayormente por diatomeas y las condiciones ambientales se asocian a características naturales propias de sitios con descargas de agua subterránea (altas concentraciones de silicatos), mientras que en Progreso la composición está dada mayormente por dinoflagelados y las características que prevalecen son de sitios con tendencia a ser eutróficos (mayores concentraciones de amonio, nitritos y nitratos). Esto concuerda con observaciones que han sido reportadas por otros estudios en la misma zona (Tróccoli-Ghinaglia 2001, Aranda-Cirerol 2004, Herrera-Silveira *et al.* 2004, Álvarez-Góngora & Herrera-Silveira 2006, Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009). En los estudios arriba mencionados, la prevalencia de diatomeas en Dzilam es evidente, mientras que en Progreso prevalecen los dinoflagelados, incluso algunos de tipo nocivo (Álvarez-Góngora 2003). Sin embargo, en comparación con el estudio previo de Álvarez-Góngora (2001) en la misma área, la composición de la comunidad si cambió en Progreso, puesto que antes era mayor la prevalencia de diatomeas que de dinoflagelados. Esto se sugiere que

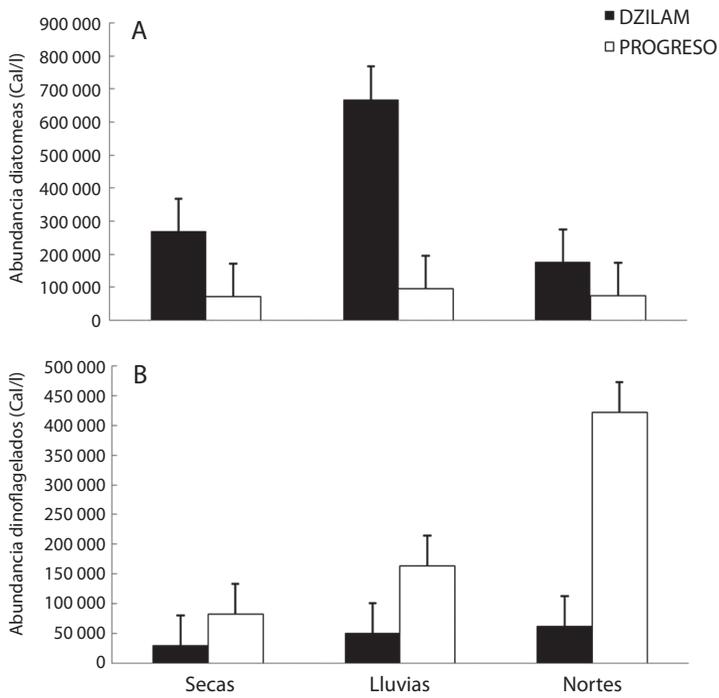


Fig. 6. Variación temporal de abundancia de las diatomeas y dinoflagelados en Dzilam y Progreso.
Fig. 6. Temporal variability of abundance from diatoms and dinoflagellates in Dzilam and Progreso.

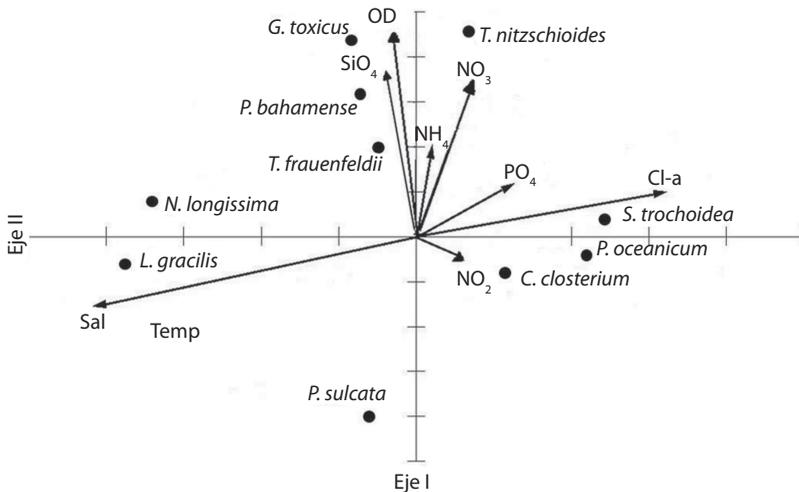


Fig. 7. Proyecciones ortogonales del Análisis de Correspondencia Canónica del fitoplancton y las variables hidrológicas en Dzilam.
Fig. 7. Orthogonal projections from Canonical Correspondence Analysis from phytoplankton and hydrological variables in Dzilam.

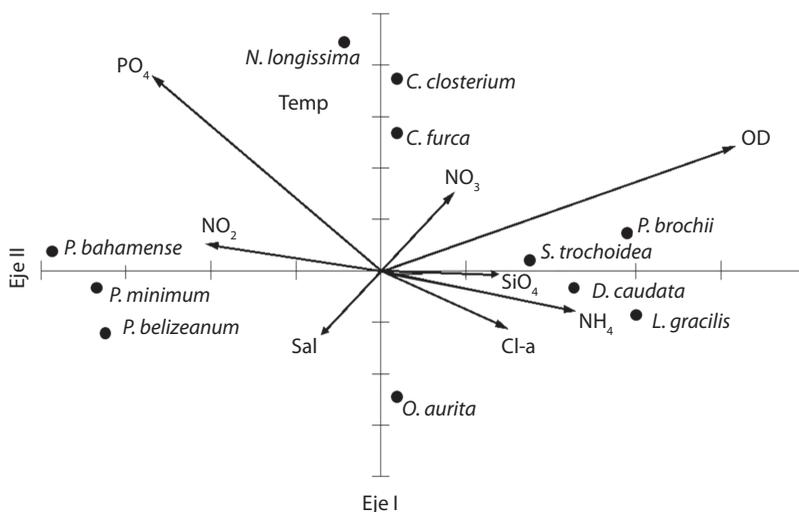


Fig. 8. Proyecciones ortogonales del Análisis de Correspondencia Canónica del fitoplancton y las variables hidrológicas en Progreso.

Fig. 8. Orthogonal projections from Canonical Correspondence Analysis from phytoplankton and hydrological variables in Progreso.

CUADRO 3

Especies de fitoplancton asociadas a las variables hidrológicas y químicas de Dzilam y Progreso

TABLE 3

Phytoplankton species associated to the hydrological and chemical changes in Dzilam and Progreso

Diatomeas	Dzilam	Progreso
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann et J.C. Lewin	x	x
<i>Licmophora gracilis</i> (Ehrenberg) Grunow	x	x
<i>Nitzschia longissima</i> (Brébisson) Ralfs	x	x
<i>Odontella aurita</i> (Lyngbye) C. Agardh	-	x
<i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Cleve	x	-
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschkowsky	x	-
<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i> (Grunow) Grunow	x	-
Dinoflagelados		
<i>Ceratium furca</i> (Ehrenberg) Claparède & Lachmann	-	x
<i>Dinophysis caudata</i> Saville-Kent	x	-
<i>Gambierdiscus toxicus</i> Adachi & Fukuyo	x	-
<i>Prorocentrum belizeanum</i> M. Faust	-	x
<i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) J. Schiller	-	x
<i>Protoperidinium brochii</i> (Kofoid & Swezy) Balech	-	x
<i>Protoperidinium oceanicum</i> (VanHöffen) Balech	x	-
<i>Pyrodinium bahamense</i> Plate	x	x
<i>Scrippsiella trochoidea</i> (Stein) Balech ex Loeblich III	x	x

x: presencia/ -: ausencia

puede ser debido al incremento de las descargas de aguas residuales domésticas, causado por el aumento de la población costera en los últimos diez años.

El análisis de las variables hidrológicas de las dos localidades de la costa de Yucatán sugiere que las diferencias observadas se asocian probablemente con el estado de conservación en el que se encuentra la cuenca de cada zona de estudio. Aranda-Cirerol y colaboradores (2006) reportan que hay más fuentes de contaminación o mayores concentraciones de contaminantes en la cuenca de Progreso y que finalmente son descargadas en forma puntual (manantiales) o difusa (fracturas en la roca). Por otra parte en Dzilam las descargas de agua subterránea producen cambios tanto físicos como químicos en el agua costera receptora, y la magnitud depende de los volúmenes de descarga y las concentraciones de contaminantes filtrados al manto freático, además de la dinámica costera y del patrón climático local (Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009).

La temperatura en Dzilam y Progreso estuvo regida por el patrón climático de la región, se nota un descenso gradual de secas a nortes. Las temperaturas se mantienen en intervalos reconocidos para zonas costeras tropicales (Medina-Gómez 2003, Tróccoli-Ghinaglia *et al.* 2004, Álvarez-Góngora & Herrera-Silveira 2006). En cuanto a la salinidad, las diferencias entre localidades en sus concentraciones medias y variabilidad se asocian por una parte con una mayor descarga de agua subterránea en la zona de Dzilam que favorece bajas salinidades, mientras que en Progreso la alta salinidad se favorece por la menor profundidad media en esta localidad (<6m) favoreciendo la evaporación y concentración de sales en la columna de agua, además de efectos de la Corriente de Yucatán que bañan la plataforma yucateca (Cárdenas-Palomo 2010). Adicionalmente, las características geomorfológicas del área donde se localiza Dzilam, llamada “zona del anillo de cenotes”, favorecen mayores descargas de aguas subterráneas de tipo manantial (Perry *et al.* 1995). Si bien las menores salinidades en Dzilam coinciden con la época de lluvias

y por lo tanto mayores descargas de agua subterránea hacia la costa, en el caso de Progreso las menores salinidades se observaron en la época de nortes, lo que sugiere que en zonas de flujo preferencial como la del anillo de cenotes el tiempo de retardo entre las precipitaciones y la descarga de agua en la zona costera es menor. Cárdenas-Palomo (2010) reporta bajas salinidades en época de lluvias para esta zona, que si bien es más hacia Isla Holbox, aun se ve el efecto de las lluvias en la salinidad. Esta dilución, el tiempo de retardo entre las precipitaciones y su reflejo en la salinidad ha sido observada en otras regiones cársticas (LaPointe *et al.* 1990, Valiela *et al.* 1990) y en esta zona de Yucatán (Álvarez-Góngora 2001, Tróccoli-Ghinaglia 2001, Álvarez-Góngora 2003). En cuanto al oxígeno disuelto, las concentraciones en las dos localidades no indican riesgos de hipoxia, sin embargo, las bajas concentraciones registradas en Progreso se asocian probablemente a la condición eutrófica para este sitio y que coincide con los reportes de otros estudios en la misma área (Herrera-Silveira *et al.* 2004, Aranda-Cirerol *et al.* 2006, Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009). Estacionalmente, en Dzilam se observa sobre-saturación y alta variabilidad durante el periodo de nortes, lo cual probablemente es causado por la turbulencia ocasionada por las descargas. Cabe mencionar que esta localidad se caracteriza por presentar extensas áreas del fondo cubiertas de pastos marinos (Aguayo-González 2003, Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009), lo cual podría contribuir con las altas concentraciones de oxígeno observadas.

Con respecto a la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos, se ha observado que en las aguas costeras existen diferentes fuentes de estos (zonas de afloramiento, aporte de ríos, resuspensión/remineralización desde los sedimentos, descargas de aguas residuales de las actividades humanas, etc.), lo cual dificulta determinar la contribución relativa de cada una de ellas en la dinámica costera y su efecto en el fitoplancton (Gobler & Boneillo 2003). En Dzilam las mayores concentraciones de silicatos indican que es una zona con mayores

aportes de agua subterránea pero que éstas no están contaminadas al menos por fuentes de aguas residuales cercanas a la costa (Valiela *et al.* 1978, D'elia & Porter 1981, Valiela *et al.* 1990, Tróccoli-Ghinaglia 2001). La presencia de fosfatos y formas reducidas de nitrógeno, los cuales no forman parte de la composición típica del acuífero, probablemente ingresan al sistema por dos vías: la de resuspensión producida por la turbulencia de la descarga o por percolación de las descargas subterráneas vía descomposición de materia orgánica de la cama de pastos de esta localidad (Aguayo-González 2003). Las descargas de agua subterránea presentan marcada variación estacional que depende del flujo, nivel de marea y la turbulencia causada por el viento (Nuttle & Portnoy 1992). Por esa razón, el ACC mostró la presencia del componente de descarga en las tres épocas, caracterizado por la presencia de altas concentraciones de nitrato, silicato y baja salinidad lo que coincide con las características de descargas subterráneas en zonas cársticas (Matson, 1993). Este componente también fue estudiado por Tróccoli-Ghinaglia durante el 2001 en el Puerto de Dzilam, en donde se reportó que los silicatos de este sitio provienen netamente de las descargas y en Progreso de fracturas de roca en el suelo y descargas no puntuales en el margen costero. En este sentido el efecto de la turbulencia causada por las descargas, no sólo implica el aporte de nutrientes más abundantes para el fitoplancton, en este caso compuestos nitrogenados y silicatos, sino que habría que considerar el efecto de perturbación generado por la turbulencia que estas producen en la columna de agua (Hambright & Zohary 2000). Esto genera un incremento de la biomasa del fitoplancton en la columna de agua por la resuspensión de especies bentónicas del fitoplancton, además de los nutrientes transportados desde el sedimento hacia la superficie, originados de la remineralización de la materia orgánica en la cama de pastos marinos (Aguayo-González 2003).

En Progreso las mayores concentraciones de amonio y fosfatos en la columna de agua, indican que es muy probable que el exceso de

nutrientes esté llegando a la zona vía descarga de aguas residuales de la cuenca asociada a este puerto. Esta condición eutrófica fue reportada en la misma localidad por Tróccoli-Ghinaglia (2001), Aranda-Cirerol (2004) y recientemente por Herrera-Silveira & Morales-Ojeda (2009) donde se aplicaron tres métodos (TRIX, Canadian Index y Assets) para determinar las condiciones tróficas de la costa norte de Yucatán. Como resultado de este estudio, Progreso es catalogado como sitio de condiciones de calidad de agua de media a baja, mientras que Dzilam es considerado en nivel de prístino a bueno. La población humana permanente en el puerto de Progreso es de 53 958 habitantes (INEGI 2010), y se incrementó a casi el doble durante los periodos vacacionales (abril, julio y agosto). La zona urbana y turística del puerto de Progreso y las poblaciones aledañas a este no cuentan con sistemas de drenaje, y la disposición de sus aguas residuales es a través de fosas sépticas y pozos de absorción que descargan libremente hasta el acuífero sin ningún tipo de tratamiento, llegando por último a la zona costera a través de grietas o fisuras de la roca. Diferentes estudios han demostrado que el uso de fosas sépticas contamina el agua subterránea y reduce la calidad del agua de los ecosistemas costeros (Giblin & Gaines 1990, Corbett *et al.* 2000).

Estacionalmente, las mayores concentraciones de nutrientes se registraron principalmente en la época de lluvias, lo que indica que la dinámica de nutrientes en la zona costera de estos dos puertos de Yucatán está fuertemente asociada al patrón climático, lo cual tiene importantes implicaciones con las previsiones actuales de cambio climático global. El amonio y los fosfatos se presentaron también en altas concentraciones en la época de nortes, probablemente como consecuencia de la resuspensión de sedimentos, la cual se ve favorecida por el oleaje que los vientos provocan durante este periodo del año, lo cual coincide con lo reportado por Aranda-Cirerol y colaboradores (2006) para esta misma área de la costa.

Las concentraciones promedio de clorofila-a en la costa norte de Yucatán de acuerdo

a diversos reportes y estudios, varían de $1\text{mg}/\text{m}^3$ en condiciones normales hasta a $28\text{mg}/\text{m}^3$ en condiciones de proliferación algal (Álvarez-Góngora *et al.* 2001, Álvarez-Góngora 2003, Tróccoli-Ghinaglia *et al.* 2004, Aranda-Cirerol *et al.* 2006, Herrera-Silveria & Morales-Ojeda 2009), los promedios de clorofila-a de Dzilam y Progreso de este estudio están en dicho intervalo. Sin embargo, se registraron altas concentraciones ($>9\text{mg}/\text{m}^3$) en Progreso durante la época de nortes, lo que indica que hubo un considerable aumento de la densidad fitoplanctónica. Esto pudo deberse a parches aislados de fitoplancton o a proliferaciones costeras no registradas. Es de importancia mencionar que en Yucatán, y especialmente estas dos localidades, se han visto afectadas por este tipo de fenómenos, algunos de ellos de tipo nocivo como los ocurridos en 2001 y 2003 (Álvarez-Góngora *et al.* 2001). Las aguas de surgencia de Cabo Catoche, los aportes de agua subterránea en la región del anillo de cenotes y las condiciones de eutrofización en algunas zonas de la costa norte de Yucatán se han identificado como las principales causas de estas proliferaciones (Álvarez-Góngora 2003, Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009, Enríquez *et al.* 2010).

La densidad total de fitoplancton fue muy variable en ambas localidades, en Progreso la densidad fue dada mayormente por dinoflagelados, mientras que en Dzilam por diatomeas y algunas especies de dinoflagelados oceánicos. Cabe mencionar que en este estudio, como se menciono en los resultados, se obtuvo un listado de especies de fitoplancton bastante extenso, pero que al aplicar el criterio recomendado por ter Braak (1986) para realizar el análisis de correspondencia canónica, se incluyeron las especies más frecuentes, y se eliminaron las especies raras o con una frecuencia menor a 30%, con el fin de reducir el error en este análisis. Los cambios observados en el fitoplancton a lo largo del año en las dos localidades sugieren que la variabilidad hidroquímica asociada al patrón climático y el impacto de actividades antrópicas tienen fuerte influencia en ellos. En cuanto al número de especies identificadas se

registró mayor riqueza en Dzilam, sin embargo tomando en cuenta el fitoplancton total (diatomeas+dinoflagelados), se observó que el 32% es común para ambas localidades, lo que sugiere que el patrón de corrientes local favorece esta conectividad hidrológica, y coincide con lo reportado por Tróccoli-Ghinaglia (2001) en la misma área. La diversidad y equitatividad están relacionadas con la intensidad de las perturbaciones costeras causadas por las diferentes actividades y aportes de nutrimentos que se dan hacia la zona costera (Hambricht & Zohary 2000). La menor diversidad promedio se registró en Dzilam durante secas probablemente, debido al efecto de los manantiales explicada por la hipótesis de perturbaciones intermedias, en la cual la turbulencia, nutrientes y flujo de agua promovida por las descargas subterráneas resuspenden, fertilizan y dispersan nutrientes y células de fitoplancton (Margalef 1974, Lindenschmidt & Chorus 1998, Hambricht & Zohary 2000). Por lo tanto, al ser nula o muy escasa la influencia de los manantiales en secas esto se ve reflejado en la baja diversidad.

Los análisis multivariados de ordenación han sido usados para explorar las asociaciones entre variables ambientales y las especies de cada localidad y llegar a interpretaciones ecológicas de los datos de campo y generar nuevas hipótesis (Muylaert *et al.* 2000, Komarkova *et al.* 2003). Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que hay una fuerte asociación de algunas especies con variables hidrológicas específicas en cada localidad. En Dzilam las bajas salinidades del agua con altas concentraciones de silicatos, indica la presencia de agua subterránea y se asocia con especies de diatomeas de gran tamaño ($>30\mu$), por lo que este nutriente no es limitante, lo cual ha sido reportado por Tróccoli-Ghinaglia (2001) en esta localidad. Es importante señalar que las especies asociadas a las descargas de agua subterránea se caracterizan por ser resistentes a los cambios de salinidad en la zona de mezcla. Por otra parte, en Progreso la presencia y asociación del amonio, nitritos y fosfatos sugiere la influencia de aguas contaminadas con aguas residuales que se percolan por las

grietas y fisuras del sustrato rocoso (Aranda-Cirerol 2004) y se asocia con especies nocivas y de tipo oportunistas. Estas especies se han asociado a procesos de origen antropogénico en esta zona (descargas de aguas residuales y actividades en la costa) y por su rápida adaptación al medio se conocen como oportunistas, lo cual podría favorecer el desarrollo de proliferaciones algales nocivas como se mencionó anteriormente y que fueron causados por estas mismas especies (Álvarez-Góngora *et al.* 2001).

Otra observación importante es que las especies nocivas identificadas y que fueron incluidas en el conjunto de especies analizadas, mostraron una estrecha relación con el componente de las descargas subterráneas en Dzilam y con el componente de descargas de aguas residuales en Progreso. Este tipo de asociaciones ya había sido reportado por Tróccoli-Ghinaglia (2001) y Álvarez-Góngora (2003), quienes mencionan que estas especies son consideradas como indicadores de ambos componentes en la costa de Yucatán. Complementado con resultados de los trabajos realizados por Herrera-Silveira & Morales-Ojeda (2009) y Enríquez *et al.* (2010), se ha llegado a la conclusión que la presencia de estas especies nocivas y su asociación a los componentes antes mencionados, favorecen a corto y largo plazo, la presencia más frecuente de proliferaciones algales y su dispersión hacia otros puntos de la zona costera donde no se han registrado actualmente. Incluso las proliferaciones marinas ocasionadas periódicamente por *S. trochoidea* en el área de Dzilam-Holbox-Cabo Catoche, se ven favorecidas por la Corriente de Yucatán y la surgencia de Cabo Catoche, lo cual ha sido reportado recientemente por Enríquez *et al.* (2010) y de cómo su dispersión en la plataforma yucateca depende del ángulo con que entra la corriente por el Canal de Yucatán.

Las diferencias observadas entre las localidades, sugieren que la sustitución de especies de diatomeas por dinoflagelados como grupo predominante del fitoplancton en la zona costera, es resultado de la propia variabilidad estacional, pero también podría estar siendo favorecido por procesos eutróficos

(Álvarez-Góngora & Herrera-Silveira 2006). Aunque el componente de eutrofización no fue abarcado en este documento, los estudios realizados en esta misma zona permiten llegar a esta conclusión (Aranda-Cirerol 2004, Herrera-Silveira *et al.* 2004, Aranda-Cirerol *et al.* 2006, Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009). El fitoplancton costero de Dzilam y Progreso difiere en composición y abundancia en respuesta a la interacción de condiciones regionales como la variabilidad impuesta por los cambios estacionales de temperatura y precipitación, y las condiciones locales como los aportes de nutrientes y dinámica costera.

AGRADECIMIENTOS

Al CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, por el apoyo logístico brindado durante la realización de este trabajo, al CONACyT, por el financiamiento otorgado con recursos del proyecto FOMIX CONACYT-Yucatán (Ref M0023-2005-4/21336). A Karen Steidinger por su invaluable ayuda en la corroboración de especies identificadas, a Javier Ramírez y Jorge Trejo por su ayuda en el trabajo de campo y laboratorio, respectivamente.

RESUMEN

La zona costera es el principal ambiente marino en la Península de Yucatán (SE, México). Sin embargo, se ha visto afectada con el incremento de las descargas de aguas residuales, modificaciones hidrológicas y cambios de uso del suelo. El fitoplancton es una de las comunidades más afectadas por la variabilidad hidrológica. Se caracterizó la estructura de la comunidad de fitoplancton en función de la variabilidad hidrológica en dos sitios (Dzilam y Progreso) a lo largo de la costa Norte de Yucatán. Se realizaron muestreos mensuales durante un año, de abril 2004 a marzo 2005, mediante dos muestreos por época (secas, lluvias y nortes). La variabilidad hidrológica se asocia al patrón climático y está ligado a los aportes de agua subterránea en Dzilam y a las aguas de desecho en Progreso. Estacionalmente, las mayores concentraciones de nutrientes se produjeron principalmente en época de lluvias. Los cambios observados en el fitoplancton a lo largo del año sugieren que la variabilidad hidrológica y química asociada a la estacionalidad y a los impactos antropogénicos tienen una fuerte influencia. La sustitución de diatomeas por dinoflagelados como grupo dominante en Progreso es el resultado

de la variabilidad estacional en sí, pero también podría verse favorecido por procesos eutróficos. En Dzilam la mayor presencia de diatomeas es favorecida por las descargas de agua subterránea. Estos resultados pueden utilizarse para comprender los vínculos entre los factores de estrés de las actividades antropogénicas y la calidad del agua.

Palabras clave: zona costera, fitoplancton, variabilidad, agua subterránea, Yucatán.

REFERENCIAS

- Aguayo-González, C.M. 2003. Estructura de la vegetación acuática sumergida como bioindicador de la calidad del agua en una zona costera tropical. Tesis de Maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Unidad Mérida, Yucatán, México.
- Álvarez-Góngora, C.C. 2001. Caracterización de la comunidad de fitoplancton y su relación con la hidrología en la zona costera del puerto de Progreso, Yucatán, México. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.
- Álvarez-Góngora, C.C. 2003. Cambios estructurales del fitoplancton costero en relación al régimen hidrológico en cuatro puertos de la Península de Yucatán. Tesis de Maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Unidad Mérida, Yucatán, México.
- Álvarez-Góngora, C.C., N. Yáñez-González, F. Merino-Virgilio, J.A. Herrera-Silveira & G. Alarcón-Daows. 2001. Monitoreo de mareas rojas en Yucatán. Informe final, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Unidad Mérida, Yucatán, México.
- Álvarez-Góngora, C.C. & J.A. Herrera-Silveira. 2006. Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. *Mar. Pollut. Bull.* 52: 48-60.
- Aranda-Cirerol, N. 2004. Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical. Tesis de Doctorado, Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Aranda-Cirerol, N., J.A. Herrera-Silveira & F.A. Comín. 2006. Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatan, Mexico. *Estuar. Coast. Shelf S.* 68: 445-454.
- Boyer, J., J. Fourqurean & R. Jones. 1997. Spatial characterization of water quality in Florida Bay and Whitewater Bay by multivariate analyses: Zones of similar influence. *Estuaries* 20: 743-758.
- Capurro, L. 2003. Un gran ecosistema costero: la Península de Yucatán. *Avance y Perspectiva* 22: 69-75.
- Cárdenas-Palomo, N., J.A. Herrera-Silveira & O. Reyes. 2010. Distribución espacio-temporal de variables fisicoquímicas y biológicas en el hábitat del tiburón ballena *Rhincodon typus* (Orectolobiformes: Rhincodontidae) al norte del Caribe Mexicano. *Rev. Biol. Trop.* 58: 399-412.
- Chrétiennot-Dinet, M.J., A. Sournia, M. Ricard & C. Billard. 1993. A classification of the marine phytoplankton of the world from class to genus. *Phycologia* 32: 159-179.
- Corbett, D.R., L. Kump, K. Dillon, W. Burnett & J. Chaton. 2000. Fate of wastewater-born nutrients under low discharge conditions in the subsurface of the Florida Keys, USA. *Mar. Chem.* 69: 99-115.
- D'elia, W.K. & W. Porter. 1981. Nitrate rich groundwater inputs to Discovery Bay, Jamaica: A significant source of N to local coral reefs? *Bull. Mar. Sci.* 31: 903-910.
- Enríquez, C., I. Mariño-Tapia & J.A. Herrera-Silveira. 2010. Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Cont. Shelf Res.* 30: 127-137.
- García-Solsona, E., J. García-Orellana, P. Masqué, V. Rodellas, M. Mejías, B. Ballesteros & J.A. Domínguez. 2010. Groundwater and nutrient discharge through karstic coastal springs (Castello, Spain). *Biogeosciences* 7: 631-669.
- Giblin, A.E. & A.G. Gaines. 1990. Nitrogen inputs to a marine embayment: the importance of groundwater. *Biogeochemistry* 10: 309-328.
- Gobler, C. & G. Boneillo. 2003. Impacts of anthropogenically influenced groundwater seepage on water chemistry and phytoplankton dynamics within a coastal marine system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 255: 101-114.
- Gobler, C.J., N.J. Buck, M.E. Sieracki & S.A. Sañudo-Wilhelmy. 2006. Nitrogen and silicon limitation of phytoplankton communities across an urban estuary: The East River-Long Island Sound System. *Estuar. Coast. Shelf S.* 68: 127-138.
- Granelí, E., M. Weberg & P.S. Salomon. 2008. Harmful algal blooms of allelopathic microalgal species: The role of eutrophication. *Harmful Algae* 8: 94-102.
- Guiry, M.D. & G.M. Guiry. 2011. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, Ireland (Consultado: 15 abril 2011, <http://www.algaebase.org>).

- Hambright, D. & T. Zohary. 2000. Phytoplankton species diversity control through competitive exclusion and physical disturbances. *Limnol. Oceanogr.* 41: 110-122.
- Hanshaw, B. & W. Back. 1980. Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution. *Geology* 8: 222-224.
- Hasle, G.R. 1978. The inverted-microscope method, p. 88-96. *In* A. Sournia (ed.). *Phytoplankton Manual*. UNESCO, Paris, Francia.
- Herrera-Silveira, J.A., F.A. Comín, N. Aranda-Cirerol, L. Tróccoli & L. Capurro. 2004. Coastal water quality assessment in the Yucatan Peninsula: management implications. *Ocean Coast. Manage.* 47: 625-639.
- Herrera-Silveira, J.A. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotrópicos* 19: 94-108.
- Herrera-Silveira, J.A. & S.M. Morales-Ojeda. 2009. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Mar. Pollut. Bull.* 59: 72-86.
- Howarth, R.W. 2008. Coastal nitrogen pollution: A review of sources and trends globally and regionally. *Harmful Algae* 8: 14-20.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México D.F., México.
- Komárková, J., O. Komárek & J. Hejzlar. 2003. Evaluation of the long term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon-shape reservoir using multivariate statistical methods. *Hydrobiologia* 504: 143-157.
- Krebs, C.J. 1972. *Ecology. The experimental analysis of distribution and abundance*. Harper and Row, Nueva York, EEUU.
- LaPointe, B., J. Connel & G. Garret. 1990. Nutrient couplings between on-site sewage disposal systems, groundwaters and nearshore surface waters of the Florida Keys. *Biogeochemistry* 10: 289-307.
- Lindenschmidt, K.E. & I. Chorus. 1998. The effect of water column mixing on phytoplankton succession, diversity and similarity. *J. Plankton Res.* 20: 1927-1951.
- Margalef, R. 1974. *Ecología*. Omega, Barcelona, España.
- Matson, E. 1993. Nutrient flux through soils and aquifers to the coastal zone of Guam (Mariane Islands). *Limnol. Oceanogr.* 38: 361-371.
- Medina-Gómez, I. & J.A. Herrera-Silveira. 2003. Spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: a multivariate approach. *Estuar. Coast. Shelf S.* 58: 455-465.
- Merino, M. 1994. Upwelling on the Yucatan shelf: hydrographic evidence. *J. Mar. Res.* 13: 101-121.
- Muyllaert, K., K. Sabbe & W. Vyverman. 2000. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium). *Estuar. Coast. Shelf S.* 50: 673-687.
- Nuttle, W.K. & J. Portnoy. 1992. Effect of rising sea on runoff and groundwater discharge to coastal ecosystems. *Estuar. Coast. Shelf S.* 34: 203-212.
- Orellana-Lanza, R., C. Espadas, C. Conde & C. Gay. 2009. Atlas. Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, Yucatán, México.
- Parsons, T., Y. Maita & C. Lally. 1984. *A manual of chemical and biological methods of seawater analysis*. Pergamon, Oxford, Inglaterra.
- Perry, E., L. Marin, J. McClain & G. Velazquez. 1995. Ring of cenotes (sinkholes), Northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chixulub impact crater. *Geology* 1: 17-20.
- Phlips, E.J., S. Badylak & T. Grosskopf. 2004. Factors affecting the abundance of phytoplankton in a restricted subtropical lagoon, the Indian River lagoon, Florida, USA. *Estuar. Coast. Shelf S.* 55: 385-402.
- Rojó, C., E. Ortega-Mayagoitia & M. Álvarez-Cobelas. 2000. Lack of pattern among phytoplankton assemblages. *Hydrobiologia* 424: 133-139.
- Round, F.E., R.M. Crawford & D.G. Mann. 1990. *The diatoms, biology & morphology of the genera*. Cambridge University, Cambridge, Reino Unido.
- Scharler, U.M. & D. Baird. 2003. The influence of catchment management on salinity, nutrient stoichiometry and phytoplankton biomass of Eastern Cape estuaries, South Africa. *Estuar. Coast. Shelf S.* 56: 735-748.
- Sournia, A. 1986. *Atlas du phytoplancton marin: Introduction, Cyanophycées, Dictyochophycées, Dinophycées*

- et Raphidophycées. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, France.
- ter Braak, C.J. 1986. Canonical Correspondence Analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67: 1167-1179.
- Tróccoli-Ghinaglia, L.E. 2001. Cambios estructurales del fitoplancton costero tropical en una zona cársica: perspectivas en escala espacial. Tesis de Doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Unidad Mérida, Yucatán, México.
- Tróccoli-Ghinaglia, L.E., J.A. Herrera-Silveira & F.A. Comín. 2004. Structural variations of phytoplankton in the coastal seas of Yucatan, Mexico. *Hydrobiologia* 519: 85-102.
- Tomas, C. 1994. Identifying marine phytoplankton. Academic, California, EEUU.
- Valiela, I., J. Teal, S. Volkman, D. Shafer & E. Carpenter. 1978. Nutrient and particulate fluxes in a salt marsh ecosystem: Tidal exchanges and inputs by precipitation and groundwater. *Limnol. Oceanogr.* 23: 798-812.
- Valiela, I., J. Costa, K. Foreman, J. Teal, B. Howes & D. Audrey. 1990. Transport of groundwater-borne nutrients from watersheds and their effects on coastal waters. *Biogeochemistry* 10: 177-198.