

**FLUJOS DE AMONIO, NITRITO, NITRATO Y FOSFATO
A TRAVES DE LA INTERFASE SEDIMENTO-AGUA,
EN UNA LAGUNA TROPICAL**

**AMMONIUM, NITRITE, NITRATE AND PHOSPHATE FLUXES
ACROSS THE SEDIMENT-WATER INTERFACE
IN A TROPICAL LAGOON**

David Valdés
Elizabeth Real

Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN
Unidad Mérida, Departamento de Recursos del Mar
Apartado postal 73, 97310, Cordemex
Mérida, Yucatán, México

Recibido en septiembre de 1993; aceptado en enero de 1994

RESUMEN

Se realizó un estudio en los sedimentos de la Laguna Chelem, situada en el litoral del Golfo de México, al norte de la Península de Yucatán (México), midiendo la concentración de nutrientes en el agua intersticial. El amonio tuvo un máximo de 1,045 μM , con valor medio de $459 \pm 281 \mu\text{M}$; el nitrito alcanzó 5.3 μM , con valor medio de $1.8 \pm 1.8 \mu\text{M}$; el nitrato se encontró en concentraciones de hasta 34.7 μM , con valor medio de $8.2 \pm 10.3 \mu\text{M}$, y el fosfato presentó un máximo de 1.1 μM , con valor medio de $0.4 \pm 0.4 \mu\text{M}$. Usando la ecuación de la primera ley de Fick, se calculó el flujo de los nutrientes mencionados, a través de la interfase agua-sedimento. En todos ellos, el flujo promedio de las catorce muestras de la laguna fue del sedimento hacia el agua, siendo de 182 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ para el amonio, 0.5 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ para el nitrito, 1.9 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ para el nitrato y 0.03 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ para el fosfato. Con el fin de conocer las tasas de desnitrificación, se realizaron incubaciones de los sedimentos en condiciones anaeróbicas, con agua de la laguna enriquecida con nitrato. Este proceso se llevó a cabo activamente en cinco de las catorce estaciones muestreadas y la tasa mayor fue la de la estación 8, con 16.07 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$. La muestra de esta estación también presentó el contenido de materia orgánica más elevado (9.2%) y el mayor flujo de nitrato (del agua al sedimento). Las estimaciones de los flujos netos, con base en las áreas de cada una de las zonas de la Laguna Chelem, indicaron un importante aporte de los sedimentos hacia la columna de agua, de los cuatro nutrientes estudiados, sobre todo del amonio.

Palabras clave: nutrientes, flujos, sedimento, laguna, desnitrificación.

ABSTRACT

The sediments of Chelem Lagoon, on the coast of the Gulf of Mexico, north of the Yucatán Peninsula, were studied measuring the nutrient concentrations in the interstitial water. The average values were: ammonium $459 \pm 281 \mu\text{M}$, peaking up to 1,045 μM ; nitrite $1.8 \pm 1.8 \mu\text{M}$, with a maximum of 5.3 μM ; nitrate $8.2 \pm 10.3 \mu\text{M}$, reaching 34.7 μM ; phosphate $0.4 \pm 0.4 \mu\text{M}$, with a maximum of 1.1 μM . Fluxes were estimated with Fick's first law equation. In all cases, the mean flux of the 14 samples from the lagoon were from the sediment to the water column; these values were 182 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ for ammonium, 0.5 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ for nitrite, 1.9 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ for nitrate and 0.03 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ for phosphate. In order to determine denitrification rates, incubations of the sedi-

ments were carried out under anaerobic conditions with water from the lagoon enriched with nitrate; denitrification was found to be active in five of the 14 samples, with the highest rate in sample No. 8 ($16.07 \mu\text{mol/m}^2\text{h}$), which had the greatest content of organic matter (9.2%) and the highest nitrate flux (from the water to the sediment). The calculation of the net flux in the Chelem area showed an important supply from the sediment to the water column of the four nutrients studied, greatest in ammonium.

Key words: nutrients, fluxes, sediment, lagoon, denitrification.

INTRODUCCION

Las lagunas costeras tropicales se caracterizan por mantener una alta producción primaria durante todo el año, para lo cual necesitan aporte constante de nutrientes, que son proporcionados en su mayor parte por los ríos que acarrean elementos esenciales provenientes del continente y, en forma paralela, por los sedimentos que, tanto en época de lluvias como de sequía, son una fuente permanente de ellos (Mee, 1979). En las zonas cársticas, como la Península de Yucatán, hay ausencia de ríos, pero si en las tierras adyacentes a la laguna llueve periódicamente, se presentan manantiales en la zona costera que también introducen fertilizantes (Kaplan *et al.*, 1979; Valiela *et al.*, 1978; Valdés *et al.*, 1988; Matson, 1993). En tales condiciones de bajo aporte continental de nutrientes, otras fuentes de estos elementos, como los sedimentos, cobran importancia.

Diversos autores han realizado estudios para evaluar las aportaciones de nitrógeno y fósforo de los sedimentos en lagunas y estuarios, tanto en zonas templadas (Fisher *et al.*, 1982; Nixon, 1981) como tropicales (Arenas y de la Lanza, 1990; Corredor y Morell, 1989) y todos concuerdan en que los procesos microbianos remineralizan la materia orgánica que se ha depositado en los sedimentos, y enriquecen de ese modo las aguas intersticiales con formas solubles de nitrógeno (amonio, nitrito y nitrato) y fósforo (fosfatos). Estos iones son transportados hacia las aguas sobrenadantes tanto por el proceso de difusión (que es originado por el gradiente de concentración entre sedimento y agua; Berner, 1980), como por procesos físicos y biológicos (de la Lanza y Rodríguez, 1990; Arenas y de la Lanza,

INTRODUCTION

Tropical coastal lagoons characteristically support high primary production throughout the year. They need a constant input of nutrients which are provided, for the most part, by rivers that carry these essential elements from the continent and, in a parallel way, by sediments that are a permanent source of them in both the dry and rainy seasons (Mee, 1979). In karstic zones, like the Yucatán Peninsula, there are no rivers, but if it rains periodically in the lands adjacent to the lagoon, the water circulates underground, surfacing in the coastal zone through springs which also provide nutrients (Kaplan *et al.*, 1979; Valiela *et al.*, 1978; Valdés *et al.*, 1988; Matson, 1993). Under these conditions of low continental supply, other sources of nutrients, like the sediments, become important.

Many authors have evaluated the nitrogen and phosphorus contributions of the sediments in lagoons and estuaries, in temperate zones (Fisher *et al.*, 1982; Nixon, 1981) and in tropical zones (Arenas and de la Lanza, 1990; Corredor and Morell, 1989); all of them agree that microbial processes remineralize the organic matter that has been deposited in the sediments, enriching the interstitial waters with soluble forms of nitrogen (ammonium, nitrite and nitrate) and phosphorus (phosphates). These ions are transported to the water above by the process of diffusion (that is due to the concentration gradient between sediment and water; Berner, 1980), as well as by physical and biological processes (de la Lanza and Rodríguez, 1990; Arenas and de la Lanza, 1990), restoring to the water column the phosphorus and nitrogen needed for primary production.

1990), y reintegran a la columna de agua el fósforo y nitrógeno necesarios para la producción primaria.

Por otro lado, el conocimiento de las tasas de transformación de la materia orgánica en inorgánica permite saber si existe un equilibrio entre la entrada y la salida de material orgánico. Cuando la comunidad bacteriana del sedimento no es capaz de mineralizar toda la materia orgánica depositada, ésta se va acumulando y surgen condiciones de anoxia y eutroficación de las aguas, que conllevan otros problemas (como los del Lago Maryut en el delta del Nilo, la bahía de La Habana, el Puerto Houston-Galveston y el estuario del Coatzacoalcos; GESAMP, 1990).

AREA DE ESTUDIO

La Laguna Chelem, localizada en la costa norte de la Península de Yucatán y bañada por las aguas del Golfo de México (Fig. 1), es una típica laguna costera del tipo III-A (Lankford, 1977), ya que presenta una barrera arenosa producida por el transporte litoral, carencia de ríos y clima cálido, muy seco o semiárido, así como marea diurna, con un intervalo de 0.6 m. Tiene una superficie aproximada de 15 km² y su profundidad varía entre 0.5 y 1.0 m, excepto en la zona de la dársena, donde tiene 3.0 m ya que es dragada periódicamente. La laguna es cruzada en su parte oriental por la vía del ferrocarril y la carretera Mérida-Progreso, las cuales limitan la circulación del agua; además, en la zona central fue construida la carretera Progreso-Chelem que, aunque tiene puentes que permiten el paso del agua en ambos sentidos, también afecta la circulación. Por otro lado, en la última década se han incrementado las industrias (astilleros y empacadoras), desarrollos turísticos y asentamientos humanos, cuyas actividades introducen nutrientes a la laguna, ya que depositan sus aguas negras en pozos superficiales de absorción, a poca distancia del cuerpo de agua. Debido a que en esta región la evaporación es mayor que la precipitación, la salinidad en el interior de la laguna es por lo general mayor que en el agua de mar adyacente, y se han registrado valores

On the other hand, the transformation rate of organic into inorganic matter tells us if there is an equilibrium between the input and the output of the organic material. If the bacterial community of the sediment is not able to mineralize all the organic matter, it will accumulate, creating anoxic conditions and, possibly, eutrophication of the waters, leading to other problems (such as those at Lake Maryut in the Nile Delta, Havana Bay, the Houston-Galveston port and the Coatzacoalcos Estuary; GESAMP, 1990).

STUDY AREA

Chelem Lagoon, located on the north coast of the Yucatán Peninsula in the Gulf of Mexico (Fig. 1), is a typical coastal lagoon of type III-A (Lankford, 1977), since it presents a sand barrier produced by littoral transport; there are no rivers and the climate is warm, very dry or semiarid; the tide is diurnal, with a range of 0.6 m. It has an area of about 15 km² and the depth varies between 0.5 and 1.0 m, except in the harbor, where a depth of 3.0 m is maintained by periodical dredging. The eastern lagoon is crossed by the railroad and the Mérida-Progreso highway, which limit the water circulation; in the central zone, the Progreso-Chelem highway also affects the water circulation. Moreover, in the last decade, industries (shipyards and packing plants), tourist developments and human settlements have increased considerably, whose activities introduce nutrients into the lagoon since they deposit their sewage in absorption wells constructed at the surface, near the body of water. As evaporation is greater than precipitation, the salinity in the lagoon is generally greater than in the adjacent sea, and salinities as high as 65‰ have been reported in the dry season. Very low salinities (10‰) have also been found after the passage of a hurricane (Valdés *et al.*, 1992).

METHODS

Sediment sampling was performed by boat on October 20, 1992, with a Ponar-type

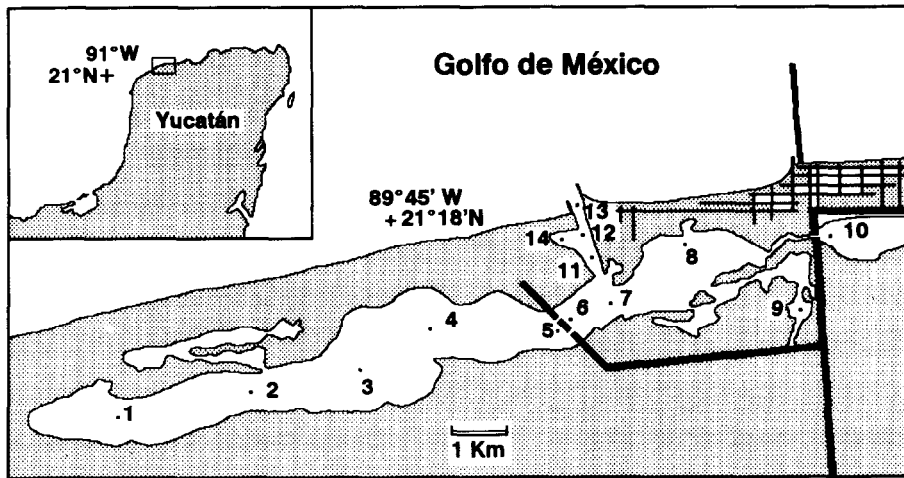


Figura 1. Laguna de Chelem, ubicación y estaciones de muestreo.
Figure 1. Chelem Lagoon, location and sampling stations.

de hasta 65‰ en época de sequía. También se han encontrado salinidades muy bajas (10‰), después del paso de un huracán (Valdés *et al.*, 1992).

METODOS

Se llevó a cabo un muestreo en lancha, el 20 de octubre de 1992, con una draga tipo Ponar, y se obtuvieron sedimentos de catorce estaciones de la laguna (Fig. 1). Inmediatamente, se llenó un frasco de vidrio con sedimentos de los 5 cm superficiales, que se conservó en la obscuridad y a baja temperatura (10°C) hasta el análisis, que no demoró más de 72 horas. Para los trabajos efectuados en flujo de sedimentos, se recomienda tomar las muestras con nucleador a fin de no alterarlos, o muestrear directamente en el campo el agua intersticial, para tener datos a diferente profundidad y más confiables. En este estudio, a causa de limitaciones materiales, los sedimentos se tomaron con draga, por lo que los resultados deben considerarse como aproximaciones, ya que este método altera los sedimentos y el agua intersticial. Con botella Van-Dorn, se tomaron muestras de agua a una distancia de 0.5 m del fondo y éstas fueron analizadas

dredge, at 14 stations in Chelem Lagoon (Fig. 1). A glass jar was filled with sediment from the top 5 cm and preserved in the dark at low temperature (10°C) until analysis was made, not more than 72 hours later. Reports on the results of flux from sediments recommend that the samples be taken with a corer to keep them undisturbed, or that the interstitial water be sampled directly in the field in order to obtain more reliable data at different depths. In this study, due to limitations, the sediment samples were taken with a dredge; for this reason, the results must be considered approximations, since this method disturbs the sediments and interstitial water. Water samples were taken at 0.5 m from the bottom with a Van-Dorn bottle, for ammonium, nitrite, nitrate and phosphate concentrations, and analyzed with the technique described by Strickland and Parsons (1972). This water was also used for the extraction of interstitial water and for incubations of the sediments to assess the denitrification.

Fick's first law, corrected by porosity (ϕ) and tortuosity of the sediment (Berner, 1980), was used to compute the flux (\mathcal{F}): $\mathcal{F} = -\phi D^* dC/dz$, where dC/dz is the vertical gradient and D the diffusion coefficient. The dif-

mediante las técnicas descritas por Strickland y Parsons (1972), para conocer las concentraciones de amonio, nitrito, nitrato y fosfato en la columna. Esta agua fue usada además para extraer el agua intersticial y realizar incubaciones del sedimento en las determinaciones de desnitrificación.

La primera ley de Fick, corregida por la porosidad (ϕ) y tortuosidad del sedimento (Berner, 1980), fue utilizada para calcular el flujo (\mathcal{F}): $\mathcal{F} = -\phi D^\circ \frac{dC}{dz}$, donde dC/dz es el gradiente vertical de concentración y D° el coeficiente de difusión. Los coeficientes de difusión, con corrección por tortuosidad (D°), usados en los cálculos fueron tomados de Li y Gregory (1974): $\text{NH}_4^+ = 19.8 \times 10^{-6}$, $\text{NO}_3^- = 19.0 \times 10^{-6}$, $\text{NO}_2^- = 19.1 \times 10^{-6}$ y $\text{PO}_4 = 7.25 \times 10^{-6}$ cm^2/s . La porosidad se determinó secando en horno a 90°C , durante 24 horas; la pérdida de peso dio la cantidad de agua presente, que dividida entre el peso húmedo fue tomada como ϕ (Corredor y Morell, 1985).

La concentración de los nutrientes en el agua intersticial se estimó haciendo una extracción con agua de la estación correspondiente. Este método fue dado a conocer por Laima (1992), quien usó solución de KCl para extraer el agua intersticial. Debido a que la salinidad de Laguna Chelem varía en un amplio intervalo de 10 a 65‰ (Valdés *et al.*, 1992), se optó por usar agua del mismo sitio donde se recogieron los sedimentos, para acercarse a las condiciones naturales y hacer menores los cambios en la fuerza iónica, que pudieran a su vez provocar adsorción o desorción de los nutrientes. Las extracciones se llevaron a cabo mezclando, en un matraz Erlenmeyer de 1,000 ml, 250 ml de sedimento con 500 ml de agua de la estación correspondiente (previamente filtrada a través de microfibras de vidrio) y agitando vigorosamente. Enseguida, 50 ml del agua sobrenadante fueron pipeteados y mezclados con 5 ml de CdCl_2 0.33 M (con el cadmio se precipitaron los sulfuros que interfieren en los análisis de los nutrientes). La suspensión se centrifugó durante cinco minutos a 1,000 rpm, el sobrenadante se decantó, se pasó a través de filtro de microfibras de vidrio (Whatman GF/C) y se analizó enseguida, si-

fusion coefficients, with tortuosity correction (D°), used in the calculations were taken from Li and Gregory (1974): $\text{NH}_4^+ = 19.8 \times 10^{-6}$, $\text{NO}_3^- = 19.0 \times 10^{-6}$, $\text{NO}_2^- = 19.1 \times 10^{-6}$ and $\text{PO}_4 = 7.25 \times 10^{-6}$ cm^2/s . The porosity of the sediments was determined by drying each sample in an oven at 90°C for 24 hours; the loss of weight divided by the wet weight was taken as ϕ (Corredor and Morell, 1985).

The nutrient concentrations in the interstitial water were assessed with the extraction technique described by Laima (1992). As the salinity in Chelem Lagoon ranges from 10 to 65‰ (Valdés *et al.*, 1992), water from the same place where the sediment was collected, instead of a KCl solution, was used in the extraction, and in this way approach natural conditions and avoid introducing changes in the ionic strength and composition that could generate adsorption or desorption of the nutrients. The extractions were carried out by mixing, in a 1,000 ml Erlenmeyer flask, 250 ml of sediment with 500 ml of water from the corresponding station (previously filtered through glass microfibre) and shaking vigorously; 50 ml of the top water were immediately pipetted and mixed with 5 ml of CdCl_2 0.33 M (with cadmium the sulfides that interfere with nutrient analysis are precipitated). The suspension was centrifuged for five minutes at 1,000 rpm; the solution was decanted, filtered through glass microfibre (Whatman GF/C) and analyzed immediately with the methods suggested by Strickland and Parsons (1972), for ammonium, nitrite, nitrate and phosphate. The concentration in the interstitial water (C_i) was calculated considering the volumes of the extraction water (V_x) and interstitial water ($V_i = \text{sediment volume} \times \text{porosity}$), and the nutrient concentrations in the water used for the extraction (C_x) and in the extract (C_e): $C_i = \{(V_i + V_x)C_e - V_x C_x\}/V_i$.

Denitrification rates were assessed following the methods described by Andersen (1977), measuring the rate of decrease in the nitrate concentration. This approach may overestimate denitrification rates because nitrate can also be reduced to ammonium or incorporated into organic matter (Seitzinger, 1988).

guiendo las técnicas usadas por Strickland y Parsons (1972), para amonio, nitrito, nitrato y fosfato. La concentración en el agua intersticial (C_i) se calculó considerando los volúmenes de agua de extracción (V_x) y agua intersticial ($V_i = \text{volumen de sedimento} \times \text{porosidad}$), así como las concentraciones de nutrientes en el agua usada para extraer (C_x) y en el extracto (C_e): $C_i = \{(V_i + V_x)C_e - V_x C_x\}/V_i$.

Las estimaciones de la tasa de desnitrificación se hicieron con base en la tasa de disminución de nitrato, siguiendo la metodología descrita por Andersen (1977). Esta evaluación tiene la desventaja de que puede sobreestimar las tasas de desnitrificación, debido a que el nitrato también puede ser reducido a amonio o incorporado a la materia orgánica (Seitzinger, 1988). Las muestras de sedimento se incubaron en el laboratorio, en un matraz bola de tres bocas, con agua de la misma estación (purgada con nitrógeno para eliminar el oxígeno), enriquecida con nitrato (añadiendo solución 10 mM de KNO_3 , hasta elevar su concentración a 15 μM), en condiciones anaeróbicas (atmósfera de nitrógeno mantenida con un globo colocado en una de las bocas), en la obscuridad y a 25°C. Se examinó durante 24 horas la concentración de nitrato en el matraz de incubación, tomando muestras con jeringa y analizándolas con la misma técnica descrita anteriormente. Estos valores se ajustaron contra el tiempo a una ecuación de segundo orden, en la cual el primer coeficiente corresponde a la tasa de cambio de concentración (a tiempo = 0).

Se determinó el contenido de materia orgánica en el sedimento, con la técnica de oxidación con dicromato de potasio, y la granulometría, suspendiendo el sedimento y midiendo densidades con hidrómetro (Holme y McIntyre, 1984).

RESULTADOS Y DISCUSION

Las características más importantes de los sedimentos se muestran en la tabla 1. Los valores promedio de porosidad y materia orgánica fueron 0.5 ± 0.1 y $5.1 \pm 1.8\%$, respectivamente. En el análisis granulométrico, se

The sediment samples were incubated in the laboratory, in a three-mouth round flask, with water from the same station (purged with nitrogen to eliminate the oxygen), enriched with nitrate (adding KNO_3 10 mM solution until raising its concentration to 15 μM), under anaerobic conditions (nitrogen atmosphere kept with a balloon in one mouth) and in the dark at 25°C. The nitrate concentration in the incubation flask was monitored for 24 hours, taking samples with syringe and analyzing them with the same technique described above. These values were fitted against time in a second order equation; the first coefficient of the equation is the concentration change rate (at time = 0).

The organic matter content of the sediments was determined with the dichromate oxidation technique, and the granulometry by suspending the sediment and measuring density with a hydrometer (Holme and McIntyre, 1984).

RESULTS AND DISCUSSION

The most important characteristics of the Chelem sediments are shown in table 1. The average values of porosity and organic matter were 0.5 ± 0.1 and $5.1 \pm 1.8\%$, respectively. The granulometric analysis indicated that the sediments were sandy except for samples 4, 5, 8 and 14, which were silty. Table 2 shows the results for all the stations: the water and interstitial water concentrations, the fluxes calculated with these concentrations and Fick's equation, as well as the denitrification rates. Stations 7 and 8 showed the highest concentrations of ammonium ion in the interstitial water, nearly 1,000 μM . These are higher than the 25 μM reported by Raine and Patching (1980) for Roskeeda Bay in Ireland, the 40 μM measured by Corredor and Morell (1985) for coral reef sediments, and the 537 μM found in a tidal flat in the Delaware Inlet, New Zealand, by Kaspar (1982), but lower than the 1,600 $\mu\text{mol/g}$ reported by de la Lanza and Rodríguez (1990; concentration based on dry weight) for sediments rich in organic matter of a Mexican

Tabla 1. Características de los sedimentos de laguna Chelem.

Table 1. Characteristics of the Chelem sediments.

No. de muestra	Porosidad	M. orgánica (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo de sedimento
1	0.5	6.6	51.5	36.0	12.5	arena limosa
2	0.5	5.2	71.5	22.0	6.5	arena limosa
3	0.4	4.5	76.0	18.0	6.0	arena
4	0.5	5.2	41.0	52.3	6.7	limo arenoso
5	0.6	5.0	43.5	51.0	5.5	limo arenoso
6	0.4	3.4	57.5	8.5	34.0	arena arcillosa
7	0.7	7.6	67.5	14.5	18.0	arena arcillosa
8	0.7	9.2	31.5	56.0	12.5	limo arenoso
9	0.6	4.1	63.5	32.0	4.5	arena limosa
10	0.3	2.9	74.0	20.5	5.5	arena limosa
11	0.6	4.2	73.5	22.0	4.5	arena limosa
12	0.4	5.6	90.5	7.8	1.7	arena
13	0.3	2.2	89.5	8.0	2.5	arena
14	0.6	6.3	31.5	58.0	10.5	limo arenoso
Media	0.5	5.1	61.6	29.0	9.4	
D. estándar	0.1	1.8	18.8	17.9	8.1	
Mín.	0.3	2.2	31.5	7.8	1.7	
Máx.	0.7	9.2	90.5	58.0	34.0	

observa que los sedimentos son arenosos en su mayoría, con excepción de las muestras 4, 5, 8 y 14, en las que predomina el limo. La tabla 2 muestra los resultados de cada una de las estaciones: las concentraciones en el agua y en el agua intersticial, los flujos calculados con estas últimas y la ecuación de Fick, así como las tasas de desnitrificación.

Las estaciones 7 y 8 presentaron las máximas concentraciones de ión amonio en el agua intersticial, cercanas a 1,000 μM . Estas son mayores comparadas con los 25 μM determinados por Raine y Patching (1980) para la Bahía de Roskeeda (Irlanda), los 40 μM medidos por Corredor y Morell (1985) en sedimentos de un arrecife coralino y los 537 μM encontrados en una marisma del Estuario Delaware de Nueva Zelanda, por Kaspar

coastal lagoon. For the nitrite ion, the maximum value corresponded to sample number 13 and the minimum to number 11, with concentrations of 5.29 and 0.07 μM , respectively. The nitrate concentration in the interstitial water fluctuated between 0 and 34.7 μM (this maximum value corresponded to sample 12 which also had the minimum concentration of ammonium: 4 μM). Kaspar (1982) reported nitrate concentrations between 10 and 59 μM . The mean concentration of phosphate in the interstitial water was $0.46 \pm 0.37 \mu\text{M}$, with a maximum value of 1.12 μM in sample 2, and values below detection limit in samples 10 and 13. Matson (1993) reported 96 μM nitrate and 0.85 μM phosphate concentrations for the groundwater of the shoreline in Guam, which could be a point of reference since that region

Tabla 2. Concentraciones y flujos de nutrientes, y tasas de cambio de nitrato. La concentración en sedimento es en el agua intersticial de los primeros 5 cm. El signo del flujo es el obtenido con la ecuación de Fick, negativo significa flujo del sedimento al agua y positivo significa flujo del agua al sedimento. Los valores negativos de las tasas de cambio de nitrato en las incubaciones corresponden a desnitrificación.

Table 2. Concentrations and nutrient fluxes, and nitrate exchange rates. The concentration in sediment is in the interstitial water of the first 5 cm. The sign of the flux is that obtained with Fick's equation; negative signifies flux from the sediment to the water, and positive signifies flux from the water to the sediment. The negative values of the exchange rates in the incubations correspond to denitrification.

No. de estación	Amonio			Nitrito			Nitrato				Fosfato		
	En agua (μM)	Sedimento (μM)	Flujo ($\mu\text{mol/m}^2\text{h}$)	En agua (μM)	Sedimento (μM)	Flujo ($\mu\text{mol/m}^2\text{h}$)	En agua (μM)	Sedimento (μM)	Flujo ($\mu\text{mol/m}^2\text{h}$)	Incubación ($\mu\text{mol/m}^2\text{h}$)	En agua (μM)	Sedimento (μM)	Flujo ($\mu\text{mol/m}^2\text{h}$)
1	5.36	367.28	-127.27	0.07	0.76	-0.23	0.18	7.44	-2.45	14.35	0.25	0.95	-0.09
2	6.14	187.52	-61.89	0.13	0.41	-0.09	1.69	5.02	-1.09	-5.71	0.23	1.12	-0.11
3	6.49	203.62	-62.90	0.08	4.68	-1.41	0.19	9.01	-2.70	5.04	0.28	0.92	-0.08
4	10.20	466.74	-149.12	0.15	3.99	-1.21	0.98	7.52	-2.05	-4.72	0.32	0.29	0.00
5	7.74	518.28	-203.35	0.15	2.22	-0.80	1.54	4.00	-0.94	-4.96	0.27	0.27	0.00
6	11.34	421.95	-128.27	0.10	0.22	-0.04	1.08	0.00	0.32	-6.10	0.27	0.33	-0.01
7	11.27	1044.95	-511.78	0.14	0.44	-0.14	1.02	4.29	-1.55	1.00	0.34	0.79	-0.08
8	5.96	998.75	-519.16	0.11	0.26	-0.08	1.54	0.00	0.77	-16.07	0.27	0.72	-0.09
9	7.25	500.24	-203.41	0.09	0.30	-0.08	0.46	0.10	0.14	-7.38	0.34	0.16	0.03
10	5.94	456.42	-92.31	0.22	0.76	-0.11	2.96	0.00	0.58	-8.21	0.37	0.00	0.03
11	8.91	525.81	-210.84	0.19	0.07	0.05	1.70	0.00	0.67	-8.46	0.31	0.64	-0.05
12	7.66	4.06	0.96	0.23	1.91	-0.43	3.77	34.70	-7.95	5.19	0.27	0.15	0.01
13	6.59	158.24	-35.63	0.13	5.29	-1.17	1.71	27.15	-5.74	-7.11	0.29	0.00	0.02
14	6.90	571.29	-248.48	0.25	4.33	-1.73	2.11	14.83	-5.37	-11.65	0.29	0.11	0.03
Media	7.70	458.94	-182.39	0.15	1.83	-0.53	1.50	8.15	-1.95	-3.91	0.29	0.46	-0.03
D. estándar	1.91	280.71	152.86	0.06	1.85	0.58	0.96	10.30	2.61	7.56	0.04	0.37	0.05

(1982), pero son menores comparadas con los 1,600 $\mu\text{mol/g}$ señalados por de la Lanza y Rodríguez (1990; concentración basada en peso seco de sedimento) para sedimentos de laguna costera, ricos en materia orgánica. Para el ión nitrito, el valor máximo correspondió a la muestra número 13 y el mínimo a la número 11, con concentraciones de 5.29 y 0.07 μM , respectivamente. La concentración de nitrato en el agua intersticial fluctuó entre 0 y 34.7 μM (este valor máximo correspondió a la muestra 12, que fue la que presentó la mínima concentración de amonio: 4 μM). Kaspar (1982) informó de concentraciones de nitrato entre 10 y 59 μM . La concentración media de fosfato en el agua intersticial fue de $0.46 \pm 0.37 \mu\text{M}$, con un valor máximo de 1.12 μM en la muestra número 2 y valores no detectables en las muestras 10 y 13. Como punto de referencia, Matson (1993) encontró, en las aguas del acuífero de Guam (que tiene la característica de estar en zona cársica, como Chelem), concentraciones de 96 μM para nitrato y 0.85 μM para fosfato. Al igual que en Chelem, fueron altas las concentraciones de nutrientes nitrogenados y bajas las de fosfatos, debido a la rápida precipitación de estos últimos para formar apatita en la presencia de partículas finas de carbonato de calcio, cuyas superficies actúan como un agente nucleador para la cristalización de apatita (Berner, 1980).

Los flujos de amonio fueron negativos en todas las estaciones, excepto la 12, lo cual indica que existe un aporte muy importante de este nutriente proveniente de los sedimentos. El valor medio de 182 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ encontrado en este estudio concuerda con los valores anotados por Corredor y Morell (1989), para una laguna costera tropical de Puerto Rico, en la que estimaron flujos de hasta 216 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$, con este mismo método. En un estuario de zona templada, Fisher *et al.* (1982) midieron *in situ* flujos de amonio entre 0 y 454 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$, y en la Bahía de Roskeeda, en Irlanda, Raine y Patching (1980) encontraron flujos entre 8.4 y 66 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$. En Chelem resalta el hecho de que las estaciones con los mayores valores de flujo amonio (más de 200 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$) hayan sido las que se encuentran cerca de los sitios con mayor actividad humana (estaciones 5, 7,

is also karstic and a rapid precipitation of phosphate to form apatite is favored by the presence of fine-grained particles of calcium carbonate whose surfaces act as a nucleating agent for apatite crystallization (Berner, 1980).

Ammonium fluxes were negative at all stations, except at station 12, indicating that this ion was going from sediment to water. The mean value of 182 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ found in this study agrees with the values reported by Corredor and Morell (1989) for a tropical coastal lagoon in Puerto Rico, where they assessed fluxes that reach 216 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ with this same technique. In a temperate zone estuary, Fisher *et al.* (1982) measured ammonium fluxes *in situ* that ranged from 0 to 454 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$, and in Roskeeda Bay in Ireland, Raine and Patching (1980) measured fluxes between 8.4 and 66 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$. The highest fluxes of ammonium were found near the sites with most human activity (stations 5, 7, 8, 9, 11 and 14), except at stations 12 and 13 located in the harbor (Fig. 2), where tidal currents and boats generated turbulence and kept the sediment well aerated; under these oxidation conditions ammonium is converted to nitrite and nitrate (Nixon, 1981).

The ammonium flux was directly correlated with porosity and organic matter ($r = 0.84$, $p < 0.01$ and $r = 0.73$, $p < 0.01$, respectively), indicating its dependence on sediment type and that ammonium comes from organic matter in the sediment. Ammonium flux and sand content had a significant negative correlation ($r = -0.55$, $p < 0.05$), consistent with the sandy sediments being well oxygenated as noted above, and for this reason there is not much ammonium present in them.

The nitrite fluxes were negative (from the sediment to the water) at all stations, except at number 11. High flux values were found in two zones of the lagoon, at stations 3, 4 and 5 in the west zone, and at stations 12, 13 and 14 in Yucalpetén harbor; all the other stations had very low fluxes. Raine and Patching (1980) assessed fluxes of this nutrient in the sediments of Roskeeda Bay that fluctuated between 4.2 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ (from water to sediment) and 2.1 $\mu\text{mol/m}^2\text{h}$ (from sediment to water).

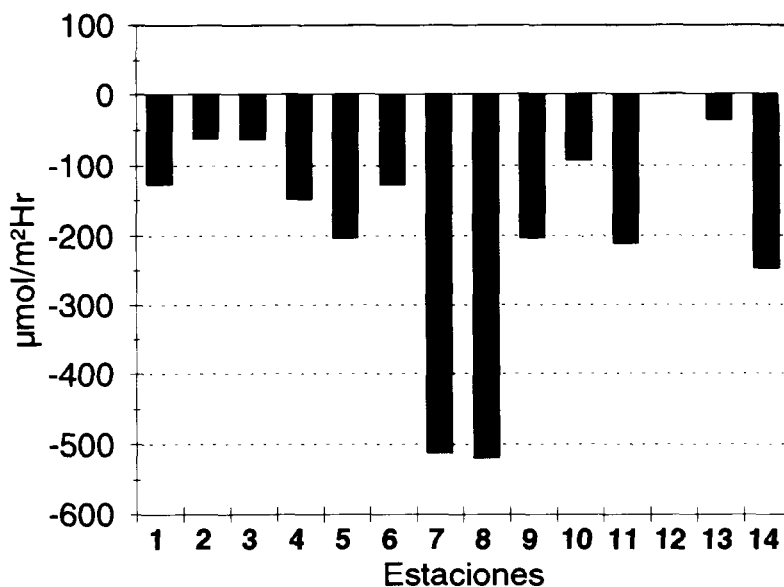


Figura 2. Flujo de amonio en los sedimentos de Chelem (los valores negativos indican un flujo del sedimento al agua).

Figure 2. Ammonium flux in the Chelem sediments (the negative values indicate a flux from the sediment to the water).

8, 9, 11 y 14). Fueron excepciones las estaciones 12 y 13, que, a pesar de estar en el puerto de abrigo, presentaron valores bajos (Fig. 2), debido probablemente a que el sedimento de estos sitios está bien oxigenado, ya que es arenoso y constantemente removido por las corrientes de marea y las embarcaciones del puerto, y en esas condiciones de oxigenación el amonio se convierte en nitrito y nitrato (Nixon, 1981).

La correlación del flujo de amonio con la porosidad fue directa y altamente significativa ($r = 0.84$, $p < 0.01$), al igual que con el contenido de materia orgánica ($r = 0.73$, $p < 0.01$), lo cual quiere decir que la presencia del amonio, y por tanto su flujo, depende del tipo de sedimento y que su origen es la materia orgánica contenida en él. Entre el flujo de amonio y el porcentaje de arena se observó una correlación inversa significativa ($r = -0.55$, $p < 0.05$), lo cual concuerda con lo mencionado antes acerca de que los sedimentos arenosos están bien oxigenados y, por tanto, en ellos hay poco amonio.

Nitrate showed a behavior similar to nitrite, with fluxes of around $2 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$ in the west zone of the lagoon (stations 1, 2, 3 and 4), and the highest fluxes that reached nearly $8 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$ in the Yukalpetén harbor samples (numbers 12, 13 and 14); the nitrite and nitrate fluxes are shown in Fig. 3. Raine and Patching (1980) estimated fluxes from the sediment to the water of $6.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$, and from the water to the sediment of $2.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$ in Roskeeda Bay, Ireland. Fisher *et al.* (1982) measured nitrate fluxes between 0 and $6.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$ in three North Carolina estuaries, and Corredor and Morell (1985, 1989) reported nitrate fluxes in reef sediments and a coastal lagoon (ranging from 0.5 to $6.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$) that are similar to those obtained in this work.

In the central and eastern zones (stations 6, 8, 9, 10 and 11), nitrate flux was positive (from water to sediment), with the highest value at station 8, which also had the maximum content of organic matter and denitrification rate ($16.07 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$). The nitrate concentration in the anaerobic incubations of the

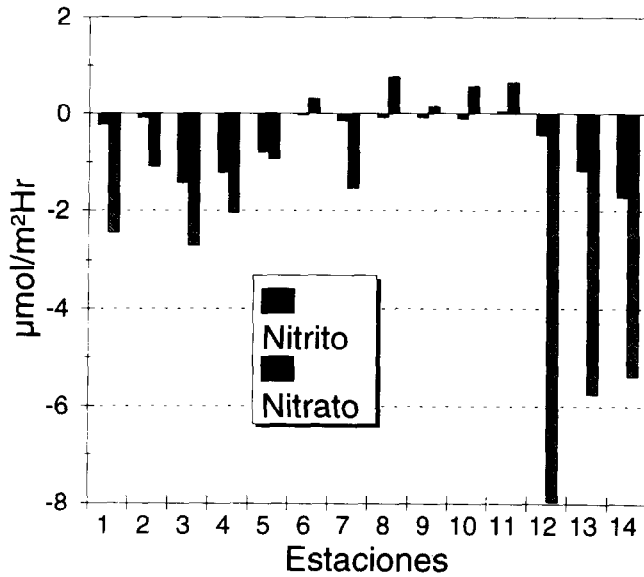


Figura 3. Flujo de nitrito y nitrato en los sedimentos de Chelem (los valores negativos indican un flujo del sedimento al agua).

Figure 3. Nitrite and nitrate fluxes in the Chelem sediments (the negative values indicate a flux from the sediment to the water).

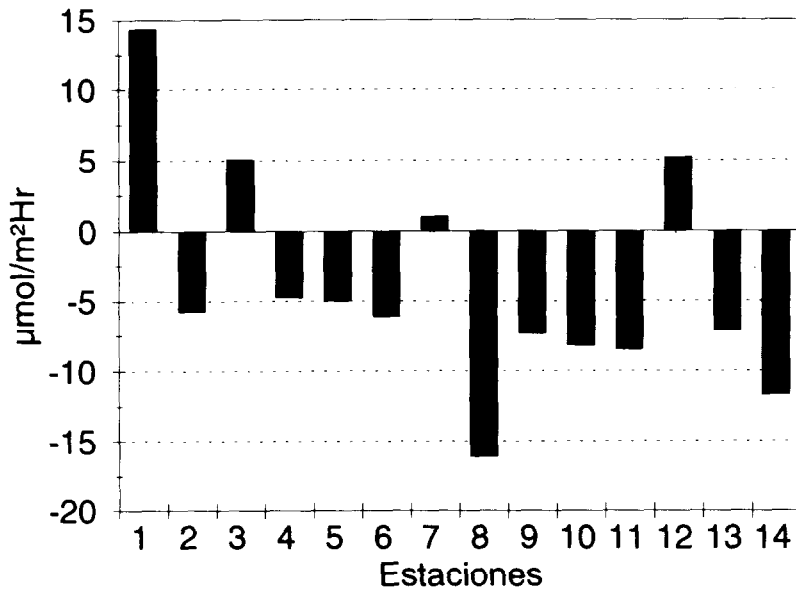


Figura 4. Tasas de cambio de concentración de nitrato en las incubaciones de los sedimentos de Chelem (las tasas negativas indican desnitrificación).

Figure 4. Exchange rates of nitrate concentration in the incubations of the Chelem sediments (the negative rates indicate denitrification).

Los flujos de nitrito fueron del sedimento al agua, en todas las estaciones excepto en la número 11. Se observaron dos zonas de la laguna con valores altos, las estaciones 3, 4 y 5, al poniente, y las 12, 13 y 14, en la dársena de Yucalpetén; todas las demás tuvieron flujos muy bajos. Raine y Patching (1980) estimaron, en Bahía de Roskeeda, flujos de este nutriente que fluctuaron entre $4.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$ (del agua al sedimento) y $2.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$ (del sedimento al agua).

El nitrato presentó un comportamiento semejante al del nitrito, ya que se observaron flujos alrededor de $2 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$ en la zona poniente (estaciones 1, 2, 3 y 4) y mayores flujos, cercanos a $8 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$, en las muestras del puerto de abrigo de Yucalpetén (estaciones 12, 13 y 14). En la Fig. 3 se muestran los flujos de nitrito y nitrato. Raine y Patching (1980) evaluaron, en la Bahía de Roskeeda (Irlanda), flujos del sedimento al agua de hasta $6.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$ y del agua al sedimento, de $2.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$. Fisher *et al.* (1982) midieron flujos de nitrato entre 0 y $6.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$ en tres estuarios de Carolina del Norte, y Corredor y Morell (1985, 1989) encontraron flujos de nitrato en sedimentos de arrecife y laguna costera (intervalo de 0.5 a $6.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$) que concuerdan con los de este trabajo.

En las zonas central y oriental de Chelem (estaciones 6, 8, 9, 10 y 11), se estimaron flujos positivos de nitrato, es decir del agua hacia el sedimento, con el mayor valor en la estación 8, misma que tuvo el máximo contenido de materia orgánica y la mayor tasa de desnitrificación ($16.07 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$). En la Fig. 4 puede observarse que, excepto por las muestras 1, 3, 7 y 12, en las incubaciones anaeróbicas de los sedimentos de Chelem, hubo disminución de nitrato, debido al proceso microbiano de desnitrificación que consume el nitrato presente en el agua intersticial (Kaplan *et al.*, 1979). En la tabla 3 se muestran valores de desnitrificación encontrados por diversos autores en sedimentos costeros de diferentes lugares. La Laguna Chelem no presentó una tasa tan grande, lo cual indica que es un sistema con poca capacidad de depuración.

La correlación entre flujo de nitrato y tasa de desnitrificación fue negativa ($r = -0.37$, $p = 0.196$), es decir que los sedimentos donde

sediments decreased in all the samples except 1, 3, 7 and 12 (Fig. 4), meaning that the microbial denitrification process consumed the nitrate in the interstitial water (Kaplan *et al.*, 1979). Other denitrification values reported for coastal zone sediments are shown in table 3; in Chelem, the rates were not high, which means that it is a lagoon with a low depuration capacity.

Nitrate flux correlated negatively with denitrification ($r = -0.37$, $p = 0.196$), meaning that sediments with no denitrification supplied nitrate to the water, while nitrate consumption from water took place where denitrification was at work. Separating the stations into two groups, the correlation coefficient between the nitrate flux and the denitrification rate increased to -0.99 at stations 12, 13 and 14 (Yucalpetén harbor samples) and to -0.82 in the rest of the lagoon. This indicated that there was a different behavior in the harbor, which could be due to the municipal and industrial wastes introduced into it or to its proximity to the sea, that gave nitrate fluxes from the sediment to the water column four to five times greater than in the rest of the lagoon. Further studies on nitrogen transformations in the sediments are needed to understand why the behavior in the harbor is different (salinity, granulometry, biomass and type of bacteria dependencies).

Phosphate also showed fluxes from sediment to water in the western and central zones, with the highest value at station 2 ($0.11 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$; Fig. 5), while at stations 9, 10, 12, 13 and 14, fluxes were to the sediment. The mean value was from sediment to water, $0.03 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$; therefore, the sediments were a source of phosphorus for the lagoon. These values were very low in comparison with those found by Fisher *et al.* (1982) in North Carolina (from 8.3 to $46.0 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ h}$), probably due to the amount of calcium carbonate in the Chelem sediments which reacts with the phosphate to form apatite (Berner, 1980), that maintained very low phosphate concentrations in the interstitial waters. The phosphate flux presented a significant positive correlation ($r = 0.56$, $p < 0.05$) with the sediment organic matter content, meaning that, like ammonium, the phosphate came from organic matter.

Tabla 3. Tasas de desnitrificación (* $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$).

Table 3. Denitrification rates (* $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$).

Autor	Sitio	Tasa*
Kaplan <i>et al.</i> (1979)	Estuario Great Sippewissett	59
Oremland <i>et al.</i> (1984)	Bahía de San Francisco	280
Kaspar (1982)	Nueva Zelanda	33
Seitzinger <i>et al.</i> (1984)	Narragansett Bay	115
Corredor y Capone (1985)	Arena de arrecife	100
Este estudio	Laguna Chelem	16

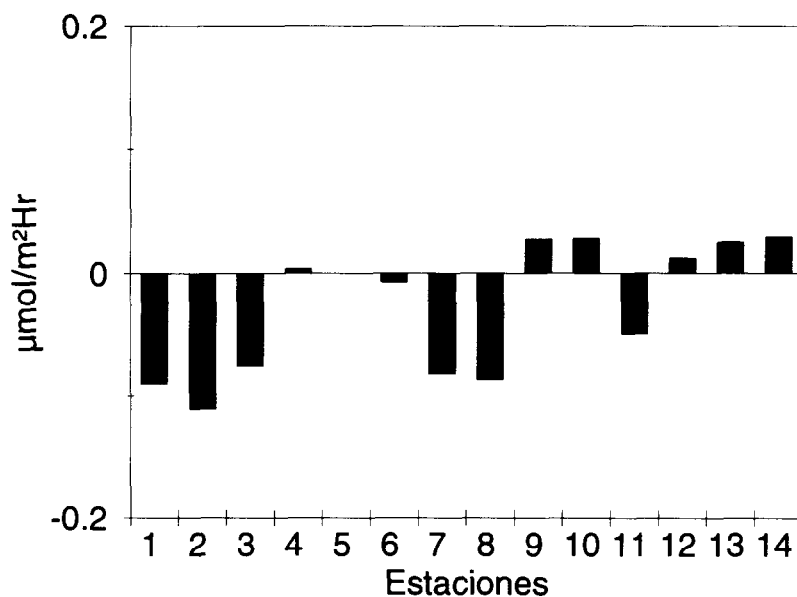


Figura 5. Flujo de fosfato en los sedimentos de Chelem (los valores negativos indican un flujo del sedimento al agua).

Figure 5. Phosphate flux in the Chelem sediments (the negative values indicate a flux from the sediment to the water).

no ocurrió desnitrificación aportaron nitrato al agua y aquéllos donde sí se llevó a cabo la desnitrificación consumieron nitrato del agua. Separando en dos grupos las estaciones, aumentó el coeficiente de correlación entre el flujo de nitrato y la tasa de desnitrificación, a -0.99 en las estaciones 12, 13 y 14 (muestras

The results indicate that there is a great horizontal heterogeneity of the sedimentological and physicochemical characteristics in Chelem. Even so, the net fluxes were estimated for each lagoon zone, assuming that the nutrient fluxes in each of them were homogeneous (which is not certain). Taking

Tabla 4. Flujos netos en Chelem, estimados suponiendo que en cada zona el flujo es homogéneo.
Table 4. Net fluxes in Chelem, estimates assuming that the flux is homogeneous in each zone.

No. de estación	Area (km ²)	Amonio (mol/día)	Nitrito (mol/día)	Nitrato (mol/día)	Fosfato (mol/día)
1	2.10	-6399	-11.8	-123	-4.51
2	1.78	-2646	-3.9	-47	-4.73
3	2.56	-3862	-86.9	-166	-4.61
4	2.35	-8426	-68.4	-116	0.20
5	1.16	-5641	-22.1	-26	0.00
6	0.39	-1211	-0.3	3	-0.06
7	1.09	-13448	-3.8	-41	-2.14
8	1.86	-23217	-3.4	35	-3.85
9	1.13	-5509	-2.3	4	0.74
10	0.42	-939	-1.1	6	0.28
11	0.13	-664	0.1	2	-0.16
12	0.08	2	-0.9	-16	0.02
13	0.03	-23	-0.8	-4	0.02
14	0.07	-436	-3	-9	0.05
Neto	15	-72,420	-208	-498	-19

del puerto de Yucalpetén) y a -0.82 en el resto de la laguna. Esto indica la existencia de un comportamiento diferente en el puerto de abrigo, que pudo deberse a los desechos domésticos e industriales vertidos en él o a su proximidad con el mar, y que dio como resultado flujos de nitrato, del sedimento a la columna de agua, 4 a 5 veces mayores que en el resto de la laguna. Para saber el porqué de este comportamiento diferente es necesario realizar otros estudios de las transformaciones del nitrógeno en los sedimentos (dependencia de la salinidad, granulometría, biomasa y especies de bacterias etc.).

El fosfato, como se observa en la Fig. 5, mostró flujos hacia el agua tanto en la zona poniente como en la zona central. La estación 2 tuvo el mayor valor: 0.11 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$, mientras que en las estaciones 9, 10, 12, 13 y 14 los flujos fueron hacia el sedimento. El valor promedio fue negativo, de 0.03 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$, por lo que probablemente los sedimentos fueron una fuente de fosfato para

these results as approximations due to the limitations mentioned, a contribution from the sediments to the water column of the four nutrients studied was observed (table 4). Ammonium was provided in greater quantity, 72,420 moles/day, followed by nitrate with 498 moles/day, then nitrite with 208 moles/day and finally phosphate, with 19 moles/day. These results agree with the observations of Valdés and Real (1993), that this lagoon exported inorganic nutrients to the adjacent sea and imported particulate organic matter, when tidal mass balance was considered. In that study, it was found that the lagoon exported about 5,000 moles/day of ammonium, 160 moles/day of nitrite, 1,600 moles/day of nitrate and 880 moles/day of phosphate, which means that a fraction of the ammonium and the nitrite produced by the sediment is transformed in the lagoon, while another source of nitrate and phosphate in addition to the sediments must exist, since the quantity exported by Chelem is higher than that produced by them.

la laguna. Estos valores encontrados en Chelem fueron bastante bajos comparados con los que Fisher *et al.* (1982) midieron en Carolina del Norte (desde 8.3 hasta 46.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$). Muy probablemente la gran cantidad de carbonato de calcio que existe en los sedimentos de Chelem reacciona con los fosfatos para formar apatita (Berner, 1980) y mantiene concentraciones muy bajas de este nutriente en las aguas intersticiales. Los flujos de este ión presentaron una correlación positiva significativa ($r = 0.56$, $p < 0.05$), con el porcentaje de materia orgánica en los sedimentos, lo cual significa que, al igual que el amonio, el fosfato provino de la materia orgánica.

Como lo indican los resultados, en Chelem existe una gran heterogeneidad horizontal, tanto en las características sedimentológicas como en las fisicoquímicas. Aun así, se realizaron estimaciones con base en cada una de las zonas de la laguna, suponiendo que los flujos de nutrientes en cada una de ellas fueran homogéneos (lo cual no es seguro). Tomando estos resultados como meras aproximaciones debido a sus limitaciones, se observó un aporte de los sedimentos hacia la columna de agua de los cuatro nutrientes estudiados (tabla 4). El amonio, con 72,420 moles/día, fue el aportado en mayor cantidad, siguió el nitrato con 498 moles/día, después el nitrito con 208 moles/día, y por último el fosfato con 19 moles/día. Estos resultados concuerdan con las observaciones hechas por Valdés y Real (1993) de que esta laguna exportó al mar adyacente nutrientes inorgánicos e importó materia orgánica particulada, en el balance de masas del transporte provocado por la marea en la boca de la laguna. En ese estudio se encontró que la laguna exportó al mar del orden de 5,000 moles/día de amonio, 160 moles/día de nitrito, 1,600 moles/día de nitrato y 880 moles/día de fosfato, o sea que una fracción del amonio y nitrito producidos por el sedimento es transformada en la laguna, mientras que de nitrato y fosfato deben de existir otras fuentes además de los sedimentos, ya que la cantidad exportada por Chelem es mucho mayor que la producida por éstos.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Luis Capurro, Felipe Vázquez, Víctor Camacho and L.I. Gordon for their revision of the manuscript, and Miguel Herrera for his help in the samplings. This research was done with the support of CONACYT (grant D112-904527) and UNAM/PADEP (030337).

English translation by the authors.

AGRADECIMIENTOS

A Luis Capurro, Felipe Vázquez, Víctor Camacho y L. I. Gordon por la revisión del manuscrito, y a Miguel Herrera por su ayuda en el muestreo. Esta investigación se realizó con apoyo de CONACYT y UNAM/PADEP, proyectos D112-904527 y 030337, respectivamente.

REFERENCIAS

- Andersen, J.M. (1977). Rates of denitrification of undisturbed sediment from six lakes as a function of nitrate concentration, oxygen and temperature. *Arch. Hidrobiol.*, 80: 147-159.
- Arenas, F.V. y de la Lanza, G. (1990). El metabolismo como determinante de intercambio de nutrientes en sedimentos ricos en materia orgánica en una laguna costera. *Ciencias Marinas*, 16(3): 45-62.
- Berner, R.A. (1980). **Early Diagenesis: A Theoretical Approach**. Princeton University Press, Princeton, N.J., 241 pp.
- Corredor, J.E. and Capone, D.G. (1985). Studies on nitrogen diagenesis in coral reef sands. *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, Tahiti, 3: 395-399.
- Corredor, J.E. and Morell, J. (1985). Inorganic nitrogen in coral reef sediments. *Marine Chemistry*, 16: 379-384.
- Corredor, J.E. and Morell, J. (1989). Assessment of inorganic nitrogen fluxes across

- the sediment-water interface in a tropical lagoon. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 28: 339-345.
- De la Lanza, G. y Rodríguez, M.M. (1990). Caracterización regional de la Laguna de Caimanero, Sinaloa, México, a través de algunas variables geoquímicas. **Ciencias Marinas**, 16(3): 27-44.
- Fisher, T.R., Carlson, P.R. and Barber, R.T. (1982). Sediment nutrient regeneration in three North Carolina estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 14: 101-116.
- GESAMP (1990). IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP: Joint group of experts on the scientific aspects of marine pollution. Review of potentially harmful substances. Nutrients. **Rep. Stud. Gesamp**, 34, 40 pp.
- Holme, N.A. and McIntyre, A.D. (1984). **Methods for the Study of Marine Benthos**. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Kaplan, W., Valiela, I. and Teal, J.M. (1979). Denitrification in a salt marsh ecosystem. **Limnol. Oceanogr.**, 24(4): 726-734.
- Kaspar, H.F. (1982). Denitrification in marine sediment: measurement of capacity and estimate of *in situ* rate. **Appl. Environ. Microbiol.**, 43(3): 522-527.
- Laima, M.J.C. (1992). Evaluation of the indophenol method to measure NH_4^+ in extracts from coastal marine sediments. **Marine Chemistry**, 39: 283-296.
- Lankford, R.R. (1977). Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification. In: M.L. Wiley (ed.), **Estuarine Processes**. Academic Press, Inc., New York, 2: 182-215.
- Li, Y.H. and Gregory, S. (1974). Diffusion of ions in seawater and in deep-sea sediments. **Geochim. Cosmochim. Acta**, 38: 703-714.
- Matson, E.A. (1993). Nutrient flux through soils and aquifers to the coastal zone of Guam (Mariana Islands). **Limnol. Oceanogr.**, 38(2): 361-371.
- Mee, L.D. (1979). Coastal lagoons. In: J.P. Riley and G. Skirrow (eds.), **Chemical Oceanography**. Academic Press, London, 42: 441-490.
- Nixon, S.W. (1981). Remineralization and nutrient cycling in coastal marine ecosystems. In: B.J. Nielson and L.E. Cronin (eds.), **Estuaries and Nutrients**. Humana Press, Clifton, New Jersey, pp. 111-139.
- Oremland, R.S., Umberger, C., Culbertson, C.W. and Smith, R.L. (1984). Denitrification in San Francisco Bay intertidal sediments. **Appl. Environ. Microbiol.**, 47(5): 1106-1112.
- Raine, R.C.T. and Patching, J.W. (1980). Aspects of carbon and nitrogen cycling in a shallow marine environment. **J. Exp. Mar. Biol. Ecol.**, 47: 127-139.
- Seitzinger, S.P. (1988). Denitrification in fresh-water and coastal marine ecosystems: Ecological and geochemical significance. **Limnol. Oceanogr.**, 33(4): 702-724.
- Seitzinger, S.P., Nixon, S.W. and Pilson, M.E.Q. (1984). Denitrification and nitrous oxide production in a coastal marine ecosystem. **Limnol. Oceanogr.**, 29(1): 73-83.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. (1972). **A Practical Handbook of Seawater Analysis**. Fisheries Research Board of Canada, Bull. 167 (second edition), 310 pp.
- Valiela, I., Teal, J.M., Volkman, S., Shafer, D. and Carpenter, E.J. (1978). Nutrient and particulate fluxes in a salt marsh ecosystem: tidal exchanges and inputs by precipitation and groundwater. **Limnol. Oceanogr.**, 23(4): 798-812.
- Valdés, D. y Real, E. (1993). Evaluación del material intercambiado entre el Golfo de México y la Laguna de Chelem, México. **V Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar**, La Paz, B.C.S., México, memorias (en prensa).
- Valdés, D., Trejo, J. y Real, E. (1988). Estudio hidrológico de la Laguna Celestún, Yucatán, México, durante 1985. **Ciencias Marinas**, 14(2): 45-68.
- Valdés, D., Ceja, V., Zapata, O. y Real, E. (1992). Comportamiento de la salinidad en la Laguna Chelem, Yucatán. **IX Congreso Nacional de Oceanografía**, Veracruz, Ver., memorias, 237 pp.