

***La lagune de Saquarema (Brésil) :
hydroclimat, seston et éléments biogéniques
au cours d'un cycle annuel***

Andre Luiz COSTA-MOREIRA (1)
et Jean-Pierre CARMOUZE (2)

RÉSUMÉ

La lagune de Saquarema (située entre 42° et 43° de longitude ouest et à environ 23° de latitude sud, de superficie et de profondeur respectivement égales à 23 km² et 1,15 m) fait partie d'une série de lagunes côtières de l'État de Rio de Janeiro soumises à des degrés divers à la pression anthropique. Une description de son environnement est présentée, portant sur l'évolution au cours de 1987, de l'hydroclimat, du seston et des éléments biogéniques dissous. Il est observé une grande variabilité temporelle contrôlée principalement par l'alternance brusque d'eaux d'origines continentale et marine et aussi un gradient spatial bien marqué provenant d'une subdivision de la lagune en un compartiment à plus forte influence continentale, non pollué, et en un compartiment à plus forte influence marine atteint par la pollution domestique. Cette lagune passe d'un état modérément eutrophe en hiver (par exemple Chl a = 28 à 40 µg/l) à un état hypereutrophe en été (par exemple Chl a = 300 µg/l) qui peut conduire à une crise dystrophique suivie de mortalité de poissons (cas d'avril 1987).

MOTS CLÉS : Lagune côtière — Eutrophisation — Hydroclimat — Seston — Sels nutritifs — Milieu tropical — Amérique du Sud.

ABSTRACT

THE LAGOON OF SAQUAREMA (BRAZIL) : HYDROCLIMATE, SESTON AND BIOGENETIC ELEMENTS
DURING AN ANNUAL CYCLE

The lagoon of Saquarema (located between 42 and 43° longitude West and 23° latitude South, with an area of 23 km² and a mean depth of 1,15 m) is part of a series of coastal lagoons of Rio de Janeiro State, subjected to anthropic influences. Environmental factors are described, as the evolution all along 1987 of hydroclimat, seston and dissolved biogenic elements. A high time variability is observed, resulting from frequent and sudden alternation of fresh and brackish waters and also a strong spatial gradient due to a subdivision of the lagoon delimiting a non polluted continental-influenced region and a polluted marine influenced region. The lagoon is characterized by a moderated trophic state in winter (for example Chl a = 20 to 40 µg/l) and a hypertrophic state in summer (for example Chl a = 300 µg/l) which may result in dystrophic crisis with fish mortality.

KEY WORDS : Coastal lagoon — Eutrophisation — Hydroclimate — Seston — Nutrients — Tropical environment — South America.

(1) UFF - Depto de Geoquímica, Morro do Valonguinho, 24030 Niterói, RJ, Brasil.

(2) UFF - Depto de Geoquímica, Morro do Valonguinho, 24030 Niterói, RJ, Brésil. Pour toute correspondance s'adresser à J.-P. Carmouze.

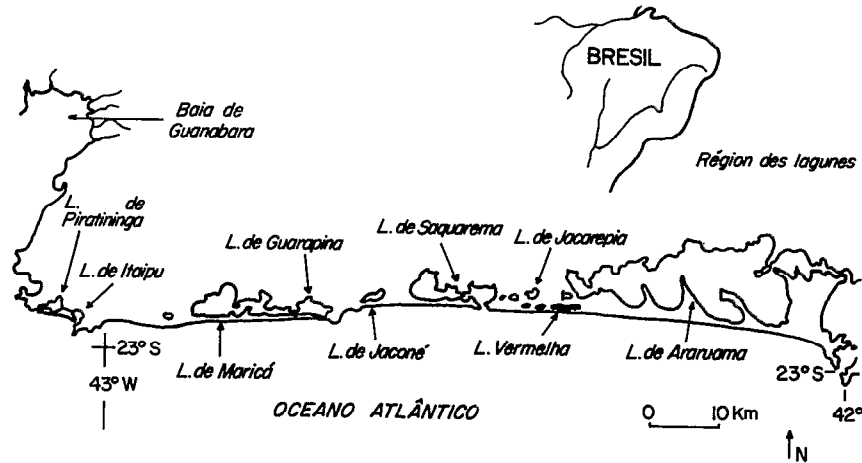


FIG. 1. — Les systèmes lagunaires de l'État de Rio de Janeiro (Brésil).
The coastal lagoons of the Rio de Janeiro State (Brazil).

INTRODUCTION

Le littoral entre Rio de Janeiro et Cabo Frio (Brésil), situé entre 42° et 43° de longitude ouest et 23° de latitude sud, comprend une série de lagunes côtières de tailles fort différentes allant de 2,2 km² (lagune d'Itaipu) à 220 km² (lagune d'Araruama) qui ont été profondément modifiées par l'homme au cours de ces trente dernières années (fig. 1).

La lagune de Saquarema située au centre de cette région en est l'un des exemples les plus significatifs. D'une superficie de 23 km², elle était associée à un marécage occupant 15 km². Ce dernier, en l'espace de 20 ans (décennies 1960 et 1970) a perdu 80 % de sa superficie initiale à la suite des déboisements et de drainages intensifs des parties basses du bassin versant. Une abondante végétation macrophytique (*Typha* et *Acrosticum* principalement), qui occupait la partie centrale de la lagune, a disparu entre 1970 et 1975. Ces modifications ont entraîné un important appauvrissement de la faune qui était très riche tant par sa variété que par son abondance (DE FARIA et MAGALHAES, 1954). Les macrophytes auraient disparu, asphyxiés par des algues flottantes (*Ulva*, *Enteromorpha*) (CARMOUZE et VANACOR, 1989). La production primaire est maintenant principalement assurée par le phytoplancton, constitué essentiellement de cyanophycées (DOMINGOS et CARMOUZE, 1989).

Une description des principaux traits de l'environnement actuel de la lagune est présentée, comprenant l'évolution au cours de 1987 des principaux paramètres bioclimatologiques, de la matière organique particulaire et dissoute et de la disponibilité en sels nutritifs du milieu. Cette présentation est intro-

ductive d'une série d'études plus spécifiques portant sur l'activité biologique du milieu en relation avec les événements hydrologiques et météorologiques.

MILIEU ET MÉTHODES

La lagune est subdivisée en quatre compartiments disposés en série parallèlement à la ligne de côte (fig. 2) : le lac Urussangua (12,6 km²), le lac Jardim (2,0 km²), le lac Boqueirão (0,6 km²) et le lac de Fora (7,4 km²). Ce dernier communique avec la mer par un grau sableux qui se ferme par intermittence. La lagune est peu profonde et plate : les profondeurs sont comprises entre 0,5 et 1,5 m. Son volume moyen est de $23,5 \times 10^8$ m³. Les principales rivières pénètrent dans le lac Urussangua (Mato Grosso, Tingui et Jundia), tandis que le lac de Fora reçoit la plus grande part des eaux usées des villes de Bacaxa et de Saquarema (fig. 2).

Il subsiste des prairies à *Typha* ainsi qu'une végétation à mangrove (*Laguncularia* sp., et *Avicennia* sp.) en divers points des rives (fig. 2). Les zones de relief sont couvertes d'une forêt secondaire, les parties basses par des prairies à graminées rampantes. À l'opposé des rives continentales, vouées à l'élevage et à l'agriculture, le cordon littoral, à vocation touristique, est en grande partie urbanisé.

Neuf campagnes ont été réalisées sur l'ensemble de la lagune en 1987, comprenant un point de mesure à l'embouchure de chacun de ses principaux tributaires et entre 18 et 20 points uniformément distribués dans l'ensemble de la lagune.

La salinité a été mesurée à l'aide d'un salinomètre optique. Les sels nutritifs et les pigments chlorophyl-

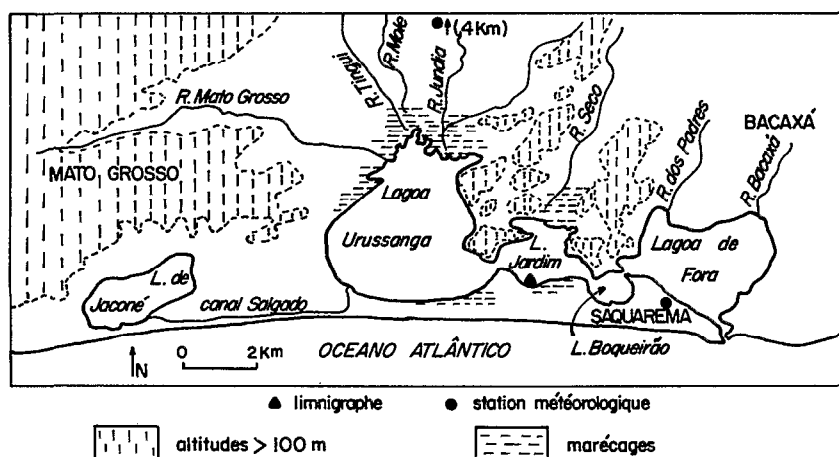


FIG. 2. — La lagune de Saquarema et ses tributaires.
The lagoon of Saquarema and its tributaries.

liens ont été déterminés selon les méthodes spectrophotométriques préconisées par STRICKLAND et PARSONS (1972), à savoir celle de l'indophénol pour NH_4 , des N-naphtyl-éthylène-diamine pour NO_2 et NO_3 (ce dernier réduit en NO_2 après passage dans une colonne Cu-Cd) du complexe phosphomolybdique réduit pour PO_4 , du complexe silicomolybdique réduit pour H_4SiO_4 et de l'extraction à l'acétone à 90 % pour la chlorophylle a. Le carbone organique particulaire, recueilli sur filtre Whatman GF/C, et le carbone organique dissous ont été déterminés par la méthode au bichromate (GOLTERMAN, 1969) adapté à l'échelle semi-micro (l'interférence de Cl dans la mesure du carbone organique dissous a été efficacement réduite dans les eaux de salinités inférieures à 25 ‰ par addition de HgSO_4 sous forme dissoute et non particulaire). Pour l'azote organique, tant pour sa forme particulaire (recueilli sur filtre Whatman GF/C) que dissoute, la méthode au persulfate de potassium a été utilisée (VALDERAMA, 1981).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Climat

Par sa latitude (23° sud) la région est soumise à un fort rayonnement solaire (0,38 et 0,30 $\text{cal/m}^2/\text{mn}$ provenant respectivement des longueurs d'ondes longues IR et courtes visibles et UV) favorisant l'évaporation, elle-même intensifiée par les vents liés à la présence océanique.

L'anticyclone tropical atlantique semi-fixe est responsable pour une grande partie de l'année du maintien d'un temps ensoleillé et de la dominance de

vents chauds et humides de secteur est et nord-est. L'ensoleillement moyen est de 6,6 h/j et présente de faibles variations saisonnières (7,1 h/j en été et 6,3 h/j en hiver). Les vents est-nord-est varient également peu en intensité au cours de l'année (à 12 h, 3,1-2,4 m/s en été et 3,0-2,2 m/s en hiver). Ce temps peut être perturbé pendant quelques jours (2 à 10 j) à tout moment de l'année par l'arrivée de masses d'air polaire de secteur sud-ouest qui provoquent non seulement une chute de la température mais aussi parfois de brutales modifications hydrologiques par l'intrusion d'eaux marines dans la lagune suivie ou non de fortes pluies sur la région qui à leur tour provoquent un refoulement des eaux marines. La figure 3 donne une idée de la fréquence et de la direction des vents ainsi que leur intensité pour l'année 1987.

Deux périodes bien distinctes peuvent être définies à partir des variations saisonnières des températures, une période chaude de mi-décembre à mi-mars et une période « froide » (début juin à fin août). La distribution des températures en 1987 présentée dans la figure 4 est assez bien représentative d'une année « moyenne ».

La répartition des pluies définit une saison humide (décembre à janvier) et une saison sèche (juin à août); un second pic de pluviosité est fréquemment enregistré en mars (NIMIER, 1977).

En fait, le trait le plus marquant du rythme climatique est moins la définition de deux saisons pluvieuse et sèche, qui ne sont pas toujours bien délimitées (c'est justement le cas de l'année 1987, fig. 5), que l'opposition bien marquée entre les hautes températures d'été qui maintiennent la température de

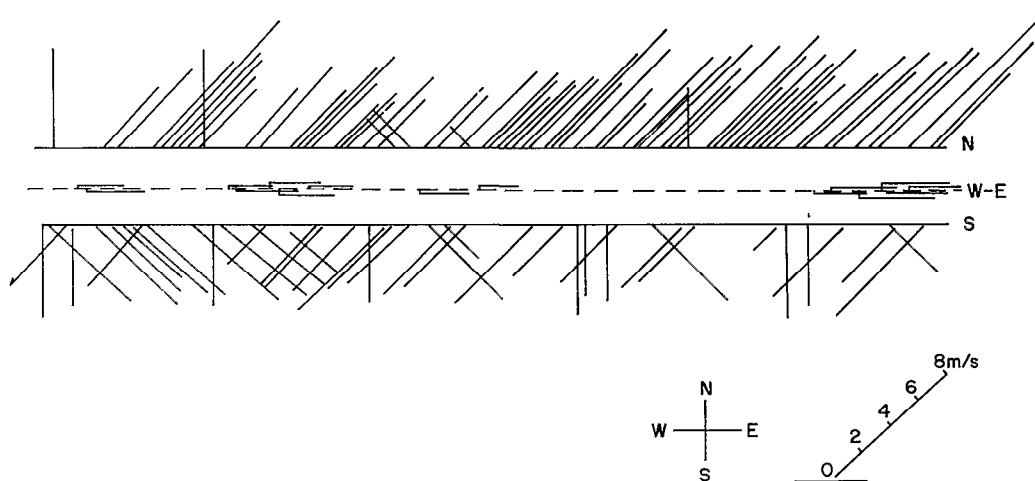


FIG. 3. — Fréquences, directions et intensités des vents à Saquarema en 1987. Valeurs moyennes journalières calculées à partir de trois mesures instantanées à 24 h, 6 h et 12 h. Données de la SERLA-RIO.

Frequencies, directions and intensities of winds at Saquarema in 1987. Average daily values computed from three instantaneous measurements at midnight, 6 a.m. and at midday. Datas from SERLA-RIO.

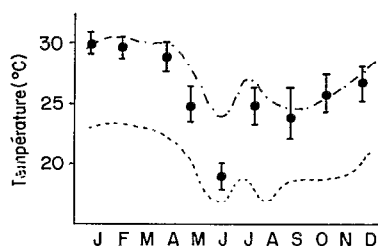


FIG. 4. — Températures moyennes mensuelles maximales (en haut) et minimales (en bas) de l'air en 1987. Températures des eaux le jour des prélèvements (points).

Mean monthly air temperatures during 1987; maximum values (above) and minimum values (beneath). Water temperatures at sampling time (dots with indication of range).

l'eau aux alentours de 30 °C et les plus basses températures d'hiver qui peuvent provoquer une chute de la température de l'eau jusqu'à 18-20 °C (fig. 4).

En somme, le climat qui se caractérise par une température moyenne mensuelle supérieure à 20 °C pour le mois le plus froid et des précipitations de l'ordre de 800 à 1000 mm/an est défini par NIMIER (1977) comme tropical chaud humide.

Hydrologie et salinités

La communication de la lagune avec la mer n'est pas permanente. Au cours d'une période prolongée de faibles échanges hydriques entre les deux milieux,

la passe se colmate progressivement au point de se fermer. Elle s'ouvre à nouveau à la suite d'une montée progressive des eaux lagunaires (exemple de novembre 1987, fig. 6). Elle est parfois déblayée par l'homme (février 87).

D'une façon générale, la lagune, en raison de sa faible profondeur, est très sensible aux déséquilibres entre apports et pertes hydriques. Des fluctuations du plan d'eau de 25 à 30 cm autour de la cote moyenne sont fréquemment observées au long de l'année. Ainsi en avril 1987 à la suite de fortes pluies (fig. 5) le plan d'eau s'est élevé de 50 cm. Ces dénivellées sont très importantes comparées à la profondeur moyenne (1,10 m). En revanche, les variations du plan d'eau au cours d'un cycle de marée ne dépassent pas généralement 5 cm, une preuve de la faible contribution des courants de marée.

Le niveau moyen du plan d'eau se trouve généralement à 10-15 cm au-dessus de celui de la mer en raison des apports d'eaux douces, ce qui détermine la prédominance d'un courant de décharge. Des entrées d'eaux marines sont observées en période d'étiage de la lagune lorsque le niveau de la mer devient supérieur à celui de la lagune (juillet 1987) et également lors de l'arrivée des masses d'air polaire qui occasionnent un refoulement des eaux sur la côte et facilitent leur pénétration dans la lagune (mi-mars 87).

La distribution des salinités reflète ces mélanges d'eaux marines et d'eaux douces. Elles ont été comprises entre 0 et 28 ‰ au cours de l'année 1987, présentant en permanence une diminution en direction du lac Urussangua. Les principaux apports

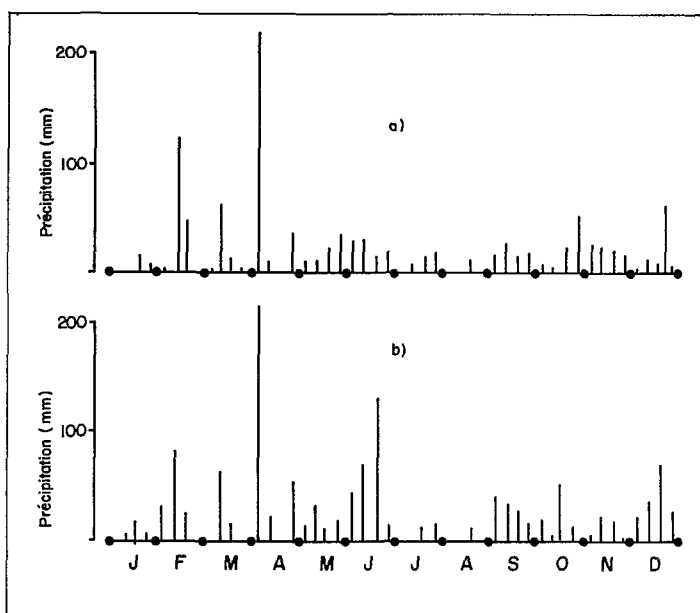


FIG. 5. — Pluies hebdomadaires aux stations de Saquarema (a) et Rio Mole (b) en 1987.

Weekly rainfall in Saquarema (a) and Rio Mole (b) stations in 1987.

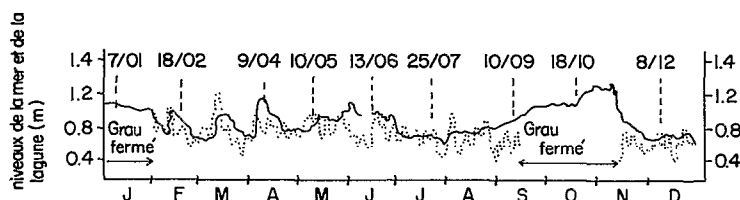


FIG. 6. — Niveaux de la mer (ligne en pointillée) enregistrés à Ponto da Armação (entrée de la baie de Guanabara) et niveaux de la lagune (ligne continue) enregistrés à la station limnologique en 1987.

Sea elevations (dots) monitored at Ponto da Armação (at the mouth of Guanabara bay) and lagoon elevations (full line) monitored at the maregraph station in 1987.

d'eaux douces qui viennent de cette région accentuent fortement ce gradient. Le pourcentage d'eau de mer est compris entre 5 et 25 % dans le lac Urusangua, entre 15 et 35 % dans les lacs Jardim et Boqueirao et entre 30 et 70 % dans le lac de Fora.

Les faibles valeurs de salinité observées en juin (fig. 7) coïncident avec un pic de pluviosité sur la lagune et son bassin versant (fig. 5) et un dénivelé entre les plans d'eau marin et lagunaire nettement favorable à la sortie des eaux par la passe (fig. 6). Les fortes salinités observées en juillet reflètent des conditions opposées : période caractérisée par une faible pluviosité et un niveau moyen de la mer supérieur à celui de la lagune facilitant l'entrée des eaux marines.

La formation d'halocline est peu fréquente et celle-ci ne dure généralement pas plus d'une demi-journée en raison de la faible profondeur et de la fréquence des vents.

Caractérisation du seston

L'analyse de données sur le seston est à priori problématique dans les milieux de faible profondeur. En effet l'échantillon recueilli contient un pourcentage très variable de sédiments remis en suspension, lequel dépend de l'état d'agitation au moment du prélèvement. Toutefois malgré cet inconvénient des variations saisonnières et spatiales peuvent être mises en évidence.

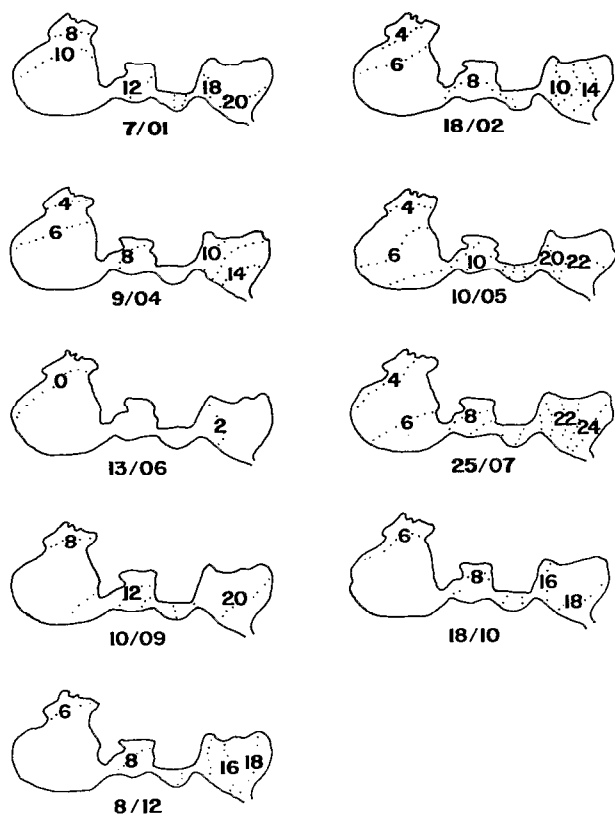


FIG. 7. — Salinités des eaux de la lagune en 1987.
Salinities of lagoon waters during 1987.

La teneur du seston en carbone organique, COP, présente en moyenne annuelle un gradient spatial bien marqué ; elle est 1,5 fois plus élevée au lac Urussangua qu'au lac de Fora : 886 μM contre 595 μM . De fortes variations saisonnières sont également notées comme l'indique le coefficient de variation (entre 35 et 45 %) (fig. 8). Les plus faibles valeurs sont rencontrées en fin d'hiver - début printemps, les plus fortes fin été - début automne, coïncidant respectivement avec des valeurs minimales et maximales de Chla (fig. 9). Toutefois, il n'apparaît pas une corrélation hautement significative ($r = 0,57$, $n = 75$) entre le COP et la somme chlorophylle $a +$ phéophytine, ce qui peut être expliqué en partie par le pourcentage très variable de matériaux détritiques remis en suspension.

La teneur du seston en azote organique NOP présente également en moyenne annuelle un gradient : 97 μM au lac Urussangua contre 81 μM au lac de Fora. Toutefois cette différence n'est pas significative. Les valeurs extrêmes de NOP sont notées aux

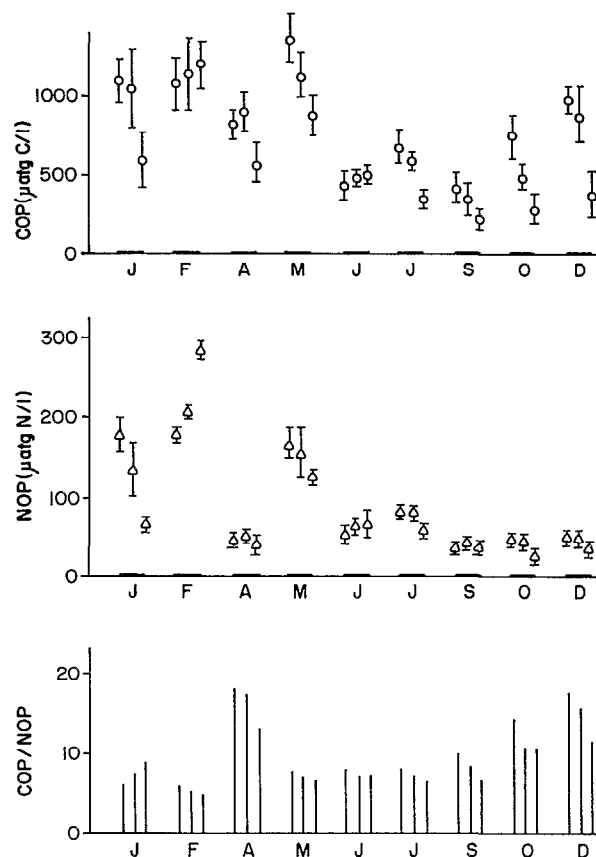


FIG. 8. — Teneurs moyennes en carbone organique particulaire, COP, et en azote organique particulaire, NOP, dans les eaux du lac Urussangua (gauche), des lacs Jardim-Boqueirão (centre) et du lac de Fora (droite) à chaque époque d'étude. Valeurs des rapports correspondant C/N.

Mean concentrations in particulate organic carbon COP, and nitrogen organic carbon NOP, of waters of lake Urussangua (left) of lakes Jardim-Boqueirão (middle) and lake de Fora (right) at each studied period. Values of corresponding ratio in C/N.

mêmes époques que celles de COP, minimales en septembre-octobre, maximales en février (fig. 8).

La distribution spatiale du seston tant en terme de COP que de NOP au niveau de chaque compartiment est relativement uniforme, présentant un coefficient de variation inférieur à 20 %.

Le rapport C/N du seston, pris en valeur moyenne annuelle tend à croître en direction d'influence continentale dominante (8,7 au lac de Fora, 11 au lac Urussangua). Toutefois au seuil 95 % cette différence n'est pas significative. Les plus faibles valeurs observées en février dans l'ensemble de la lagune coïncident avec les valeurs moyennes annuelles maximales de chlorophylle a (fig. 8 et 9), aussi

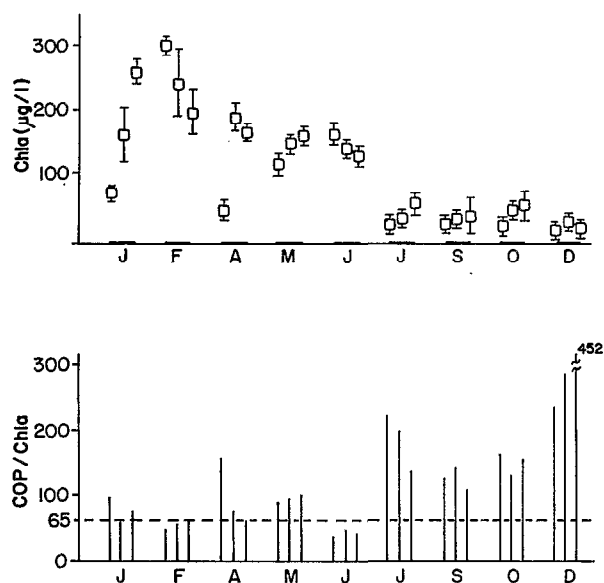


FIG. 9. — Teneurs moyennes en chlorophylle *a*, Chl *a*, et rapport COP/Chl *a* dans les eaux des lacs Urussangua (gauche), les lacs Jardim-Boqueirão (centre) et du lac de Forá (droite) à chaque époque d'étude.

Mean concentrations of chlorophyll *a*, Chl *a*, and mean COP/Chl *a* ratio in waters of the lake Urussangua (left), the lakes Jardim-Boqueirão (middle) and the lake de Forá (right) at each studied period.

s'expliquent-elles probablement par la prédominance du phytoplancton dans le seston.

Les teneurs en Chl *a* présentent le même gradient spatial que celles en carbone et en azote particulière : 90 µg/l dans le lac de Forá en valeur moyenne annuelle, contre 126 µg/l dans le lac Urussangua. Les plus fortes valeurs sont également rencontrées en été et en automne, les plus faibles en hiver et au printemps, avec toutefois deux exceptions : 1°) en juin des valeurs élevées sont observées, conséquence possible d'un accroissement de la biomasse algale qui aurait été stimulée par une plus grande disponibilité en sels nutritifs apportés par les pluies et les crues fluviales à cette époque (fig. 5 et 9); 2°) en décembre des valeurs plus basses que prévues pour la saison sont enregistrées sans qu'une explication puisse être avancée.

Une indication supplémentaire sur l'importance de la biomasse phytoplanctonique relativement à l'ensemble du matériel sestonique est donnée par le rapport COP/Chl *a* (exprimé en µg/l). Selon ANTIA (1975) puis TAKAHASHI *et al.* (1984), les valeurs de ce rapport vont de 25 pour des communautés de diatomées en pleine croissance à 65 pour des populations de cyanophycées en dégénérescence. En conséquence

les valeurs situées au-dessus de cette limite supérieure s'expliqueraient par la présence de matériel détritique dans le seston. Selon cette hypothèse le matériel sestonique en février et en juin serait à prédominance phytoplanctonique, corroboré en cela par des valeurs peu élevées de C/N (entre 4,9 et 8,5); la contribution du phytoplancton serait au contraire très faible en décembre (COP/Chl *a* entre 240 et 450). Le rapport élevé de COP/Chl *a* rencontré au lac de Forá en avril comparativement aux autres compartiments (fig. 9) est probablement une conséquence de la crise dystrophique ayant eu lieu 3 à 4 jours auparavant dans ce lac.

Caractérisation de la matière organique dissoute

Les composés organiques dissous et colloïdaux, désignés comme substances jaunes (KALLE, 1966; KIRK, 1976) absorbent très fortement la lumière UV de telle sorte qu'une première estimation peut être faite à partir de mesures de l'absorption de la lumière UV (340 nm) par des eaux naturelles filtrées. L'absorption des eaux des rivières sortant des marécages du lac Urussangua atteint 0,460 cm⁻¹ tandis que celles des eaux marines entrant dans le lac de Forá ne dépassent pas 0,010 cm⁻¹. Il n'est pas étonnant qu'il ait été noté 1°) à chacune des campagnes une décroissance des absorptions du lac Urussangua en direction du lac de Forá : 0,143 cm⁻¹ au lac Urussangua en valeur moyenne annuelle, contre 0,089 cm⁻¹ au lac de Forá; 2°) des valeurs maximales en juin à une période de très faible salinité (1 à 3 ‰) et des valeurs minimales en juillet à l'occasion de fortes intrusions marines (fig. 10). Une régression linéaire entre absorption à 340 nm d'eaux filtrées et leur salinité a été établie, présentant un coefficient de corrélation égal à 0,79 pour 78 couples de valeurs : Abs = 0,2006 - 0,0075 × S ‰. La présence de différentes sources d'eaux douces, présentant des teneurs bien distinctes en substances jaunes (eaux de rivières ne quittant pas leur lit, eaux de rivières débouchant des zones marécageuses de la lagune, eaux de ruissellements latéraux...) font que ce coefficient de corrélation n'est pas plus élevé. Dans les milieux estuariens à source unique, l'absorption UV des eaux filtrées peut être un excellent indicateur d'identification des masses d'eaux (FOSTER, 1985).

Les données du COD ne sont disponibles que pour la période de juin à décembre. Elles montrent que les eaux du lac Urussangua sont significativement plus riches que celles du lac de Forá pour cette période : 687 µM contre 472 µM. Cette différence s'explique probablement par la plus forte influence des apports continentaux dans le premier lac (fig. 11).

Les teneurs de NOD couvrent l'ensemble du cycle annuel. Elles ne présentent pas de gradient spatial;

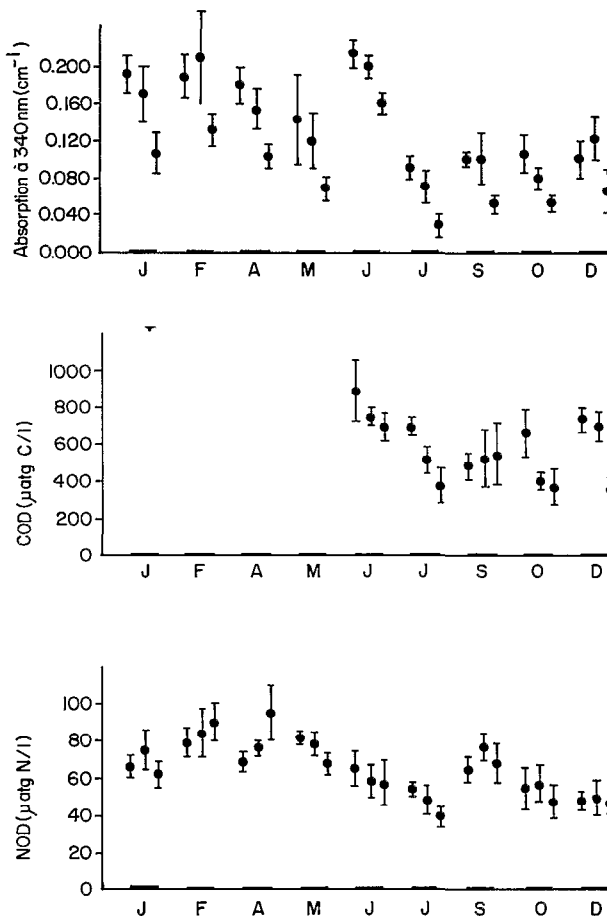


FIG. 10. — Absorption de la lumière UV par les eaux filtrées du lac Urussangua (gauche) des lacs Jardim-Boqueirão (centre) et du lac de Fora (droite) à chaque époque d'étude.

Absorption of UV light by filtered waters of the Urussangua lake (left) Jardim and Boqueirao lakes (middle) and Fora lake (right) at each studied period.

FIG. 11. — Teneurs moyennes en carbone organique dissous, COD, et en azote organique dissous, NOD, dans les eaux du lac Urussangua (gauche), des lacs Jardim-Boqueirão (centre) et du lac de Fora (droite) à chaque époque d'étude.

Mean concentrations in dissolved organic carbon, COD and dissolved nitrogen carbon, NOD, of waters of lake Urussangua (left) of lakes Jardim-Boqueiro (middle) and lake de Fora (right) at each studied period.

la valeur moyenne est égale à $68 \mu\text{M}$ (fig. 11). Durant la période de plus forte densité algale les eaux ont été 35 % plus riches en NOD que celles du restant de l'année. Il en est probablement de même pour le COD ; la valeur moyenne du rapport COD/NOD est égale à 10,4-2,5 selon les données disponibles de juin à décembre.

Disponibilité des eaux en sels nutritifs

La disponibilité des eaux lagunaires en sels nutritifs est très variable selon l'élément considéré, le milieu et l'époque, dépendant en grande partie des importations et exportations de ces sels et de leur participation à l'activité biologique.

Les teneurs en sels nutritifs diffèrent grandement d'un tributaire à l'autre. Le rio Bacaxa qui collecte les eaux usées de la ville de même nom présente des valeurs élevées d'azote et de phosphore minéral dissous, NID et PID, soit de 35 à $125 \mu\text{M}$ de NID (NH_4

principalement) et de 0,7 à $13 \mu\text{M}$ de PID. À l'opposé, dans le cas du rio Matto Grosso qui est exempt de pollution domestique, les valeurs moyennes de NID et de PID sont respectivement égales à 7 et $1,5 \mu\text{M}$. Le marécage attendant au lac Urussangua semble avoir tendance à retenir des composés azotés et à libérer des composés phosphatés car les eaux des rios Tanguí et Jundia qui en sortent ont des valeurs plus basses en NID ($3,4 \mu\text{M}$ en moyenne) et plus fortes en PID ($3 \mu\text{M}$ en moyenne), comparées à celles du rio Matto Grosso.

La pollution domestique atteignant le lac de Fora explique probablement que les eaux du lac de Fora sont significativement plus riches (sécurité 95 %) en NID que celles du lac Urussangua ($7,3 \mu\text{M}$ contre $3,6 \mu\text{M}$ en moyenne annuelle) et ceci malgré l'effet de «chasse» dû à la marée dans le lac de Fora. Les conséquences de la pollution à l'égard du PID sont différentes puisque ce dernier est caractérisé par une même valeur moyenne annuelle sur l'ensemble du lac (fig. 12).

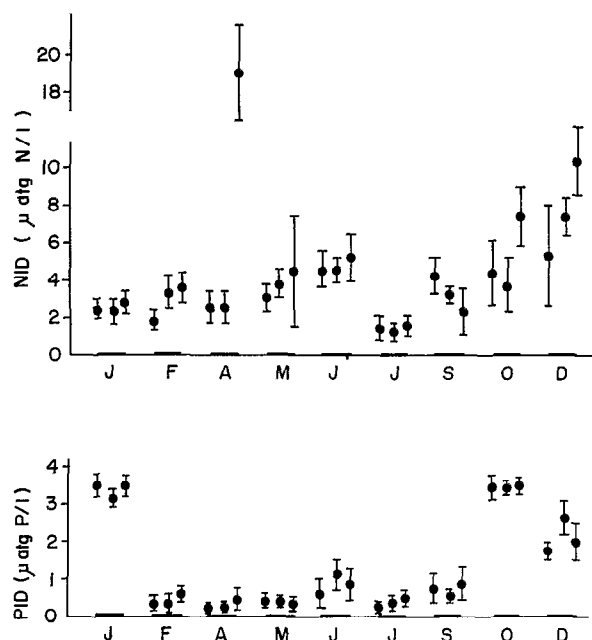


FIG. 12. — Teneurs moyennes en azote minéral dissous, NID, et en phosphore minéral dissous, PID, dans les eaux du lac Urussangua (gauche), des lacs Jardim-Boqueirão (centre) et du lac de Fora (droite) à chaque époque d'étude.

Mean concentrations in dissolved inorganic nitrogen, NID, and dissolved inorganic phosphorous, PID, of the waters of the Urussangua lake (left), Jardim-Boqueirao lakes (middle) and Fora lake (right).

Les valeurs du rapport NID/PID dans les eaux lagunaires sont toutes inférieures à 10 et par conséquent inférieures au rapport N/P de la matière phytoplantonique qui est de l'ordre de 16 (REDFIELD, 1964). Aussi, à l'égard de la demande phytoplantonique, la disponibilité en P est supérieure à celle en N. Autrement dit, le milieu pourrait souffrir d'une carence en N. De nombreux travaux montrent en effet que N peut être un facteur limitant (e.i. RHEE et GOLDMAN, 1981; VALIELA, 1984; DUFOUR *et al.*, 1981). Toutefois, la seule information donnée par le rapport NID/PID est insuffisante pour conclure en ce sens. En effet, comme le rappellent DUFOUR *et al.* (1981), il faudrait au moins connaître les formes chimiques de N et de P réellement utilisables, les compositions optimales en N et P des populations naturelles du seston à l'égard de celle du milieu et savoir s'il y a stockage ou non de l'un de ces éléments par le phytoplancton.

CONCLUSIONS

Le climat de la région de Saquarema n'est pas rigoureusement représentatif d'un climat tropical caractérisé par une saison de pluies et une saison sèche car la distribution saisonnière des précipitations est très variable d'une année à l'autre. Cette région est davantage marquée par l'alternance des hautes températures d'été (25 à 35 °C) et de plus

basses températures d'hiver (17 à 27° C). Il est donc préférable de distinguer une saison chaude (de décembre à avril) et une saison « froide » (de juin à septembre).

Le grau de Saquarema est étroit et peu profond de sorte que l'influence des marées est très atténuée. En ce sens la lagune est de type « amortie » selon la classification de KJERFVE (1986). Les échanges hydriques sont davantage basés sur le principe des vases communicants, contrôlés par les dénivelés entre les plans d'eau de la lagune et de la mer. Les alternances d'eaux d'origines marine et continentale en fonction des événements climatologiques « marquent » d'autant plus le milieu que celui-ci est peu profond. Ainsi en l'espace d'un cycle de marée, la salinité des eaux du lac de Fora peut passer de 10 à 35 ‰ à la suite d'une intrusion marine provoquée par l'arrivée d'un front polaire. Ou encore deux à trois jours de pluies sont suffisants pour induire un fort courant de décharge, un important renouvellement des eaux lagunaires et une brutale chute des salinités des eaux : des chutes de 10 à 2 ‰ au lac Urussangua et de 25 à 5 ‰ au lac de Fora en moins d'une semaine sont fréquentes au cours de l'année. Par de tels changements d'origine hydrologique on peut mesurer combien ce milieu lagunaire est instable.

Les coefficients de variations saisonnières du matériel sestonique et de la matière organique dissoute illustrent imparfaitement ces sauts à courte échelle de temps puisqu'ils sont issus de mesures

mensuelles. On peut toutefois noter que la variabilité du pool de matière organique dissoute (COD et NOD) est réduite comparée à celle de la matière organique particulaire (COP et NOP), notamment au lac Urussangua, et qu'au niveau de chaque compartiment l'instabilité est supérieure au lac de Fora, ce qui à priori n'est pas étonnant puisque ce dernier est en contact direct avec le milieu marin. La répartition du phytoplancton d'après la *Chl a* est aussi marquée par une forte variabilité temporelle, mais celle-ci est plus atténuée dans le lac de Fora. Ce résultat semble contredire les résultats précédents et ceux issus d'une analyse faite par Dufour (1984) sur plusieurs systèmes côtiers qui montrent que la variabilité temporelle de la *Chl a* est plus élevée dans les régions ouvertes et polluées que dans celles fermées et non polluées.

La lagune de Saquarema présente de nombreux signes d'eutrophisation. Les teneurs des eaux en matière organique particulaire atteignent de fortes valeurs en été (1200 $\mu\text{atg C/l}$). Cette matière est principalement d'origine phytoplanctonique, comme l'indiquent les fortes valeurs de chlorophylle *a* à cette époque (200 à 300 $\mu\text{g/l}$) les valeurs relativement faibles de C/N (5 à 8) et de COP/*Chl a* (45 à 65). Ce développement excessif de phytoplancton qui coïncide avec la saison chaude et l'accroissement de la pollution domestique due au tourisme estival est, semble-t-il, à l'origine des crises dystrophiques en fin d'été suivies de mortalités de poisson (exemple d'avril 87). En hiver, ce risque est écarté. Les eaux sont trois fois moins riches en COP, la biomasse phytoplanctonique, selon les données de *Chl a* ne représente plus que 10 à 20 % de la biomasse d'été. Le seston est alors davantage représenté par du matériel détritique si l'on en juge par les plus fortes valeurs de C/N (8 à 15) et de COP/*Chl a* (> 125). Ces caractéristiques saisonnières peuvent être altérées : lors d'une brutale crue, qui peut être tant d'origine marine que continentale, il est observé une chute momentanée de la biomasse phytoplanctonique ; lorsque la lagune, en situation d'étiage est fortement agitée par les vents, une importante remise en suspension de matériel détritique est observée (exemple de décembre 1987).

La matière organique dissoute, hors de l'époque de forte densité algale, présente, d'une part, des valeurs de COD très proches des valeurs de COP (580 μM en

moyenne) et des valeurs de NOD très proches de celles de NOP (57 μM en moyenne). Le rapport COP/COD qui est voisin de 1 de juin à décembre serait selon SEKI (1984) un indice de forte eutrophisation. En été ce rapport est probablement supérieur à 1, si l'on en juge par le fait que les teneurs en NOP sont deux fois supérieures à celles de NOD, indiquant par là un degré d'eutrophisation encore plus élevé. Toutefois il faut émettre des réserves quant à l'emploi de cet indice pour des milieux de faible profondeur où la remise en suspension de matériau particulaire sédimenté est facilitée. La conséquence en est un accroissement de la valeur du rapport COP/COD qui ne peut être directement interprété en terme d'eutrophisation.

Les apports en éléments nutritifs, bien qu'ils n'aient pas fait l'objet d'une quantification rigoureuse doivent être plus importants dans le lac de Fora qui reçoit directement les eaux usées des villes de Saquarema et de Bacaxa, ce qui expliquerait le fait que les eaux du lac de Fora, malgré la proportion élevée d'eau d'origine marine, sont en moyenne deux fois plus riches que celles du lac Urussangua en NID (7,3 μM contre 3,6 μM en moyenne annuelle). Il est possible que la plus grande disponibilité de NID dans le lac de Fora compte parmi les facteurs qui font que les risques de crises dystrophiques sont plus élevés dans ce milieu. De plus le NID pourrait être l'élément biogénique limitant de la production algale car le rapport NID/PID est toujours bien inférieur à 16 qui est la valeur théorique du rapport N/P du phytoplancton. Mais comme nous l'avons vu cette donnée est insuffisante pour formuler une telle conclusion. En somme, les données actuelles ne permettent pas de définir les éléments limitants éventuels.

Des travaux complémentaires sur l'aspect fonctionnel de la lagune ainsi que des études similaires menées en d'autres lagunes de la région soumises à des degrés variables à la pression anthropique devraient permettre de mieux caractériser l'eutrophisation de ces milieux et l'état d'avancement de ce phénomène.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 6-2-1991

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANTIA (N.), MC ALLISTER (C. D.), PARSONS (T. R.), STEPHENS (K.) and STRICKLAND (J. D. H.), 1983. — Further measurements of primary production using a large volume plastic sphere. *Limnol. Oceanogr.* 8 : 166-183.
- CARMOUZE (J. P.) et VANACOR (L.), 1989. — Recent environmental modification of the lagoon of Saquarema and its watershed. *International Symposium on Global Changes during the Quaternary*. São Paulo. Extended Abstract : 65-69.
- DE FARIA (A.) e MAGALHAES (E.), 1954. — Lagoa de Saquarema — Ministerio de Agricultura — Divisao de Caça Pesca. Relatório interno, Rio de Janeiro, 36 p.
- DOMINGOS (P.) et (J.-P.) CARMOUZE, 1989. — Variações sazonais do fitoplâncton na lagoa de Saquarema. I Congresso de Ficologia, Santa Catarina (Brasil), Março 1989. Résumos : 109-110.
- DUFOUR (Ph.) et SLEPOUKHA (M.), 1981. — Étude de la fertilité d'une lagune tropicale de Côte d'Ivoire au moyen de tests biologiques sur populations phytoplanctoniques naturelles. *Rev. Hydrobiol. trop.* 14 (2) : 103-114.
- DUFOUR (Ph.), 1984. — Variabilité spatiale et temporelle des concentrations chlorophylliennes dans une lagune tropicale et différents écosystèmes aquatiques (1984) — *Revue française des Sciences de l'Eau*, 3 : 321-334.
- FOSTER (P.), 1985. — Tracer applications of Ultra-Violet absorption measurements in coastal waters. *Water Res.* vol. 19 N° 16 : 701-706.
- GOLTERMAN (H. L.), 1969. — *Methods for chemical analysis of fresh water*. Blackwell Scientific Publications, 172 p.
- KALLE (K.), 1966. — The problem of the gelbstoff in the sea. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* : 4 : 91-104.
- KIRK (J. T. O.), 1976. — Yellow substance (gelbstoff) and its contribution to the attenuation of photosynthetically active radiation in some inland and coastal south-eastern Australian water. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 27 : 61-71.
- KJERFVE (B.), 1988. — Comparative oceanography of coastal lagoons. *In* : *Estuarine Variability*. D. A. Wolfe (Éd.) Academic Press, 509 p. : 63-81.
- NIMIER (E.), 1977. — *Geografia do Brasil. Regiao Sud-este*, IBGE, Rio de Janeiro, vol. I, 466 p.
- REDFIELD (A. C.), 1964. — On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the volume composition of plankton. *James Memorial Volume (Liverpool)*, 176 p.
- RHEE (G. H. Y.) and GOLDMAN (J. I.), 1981. — The effect of environmental factors on phytoplankton growth : temperature and interaction of temperature with nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr.* 26 (4) : 635-648.
- STRICKLAND (J. D.) and PARSONS (T. R.), 1972. — *A practical handbook of sea water analysis*. Bull. Fish. Res. Bd. Can. 167.
- TAKAHASHI (M.), PARSONS (T. R.) and HARGRAVE (B.), 1984. — *Biologic Oceanographic Processes*, New York, Pergamon Press, 330 p.
- VALDERAMA (J. C.), 1981. — The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorous in natural waters. *Marine Chemistry*, 10 : 109-122.
- VALIELA (I.), 1984. — *Marine Ecological Process*. Springer Verlag, N. Y., 546 p.