

# A DIVERSIDADE ESPECÍFICA PARA A ANÁLISE DAS SUCESSÕES FITOPLANCTÔNICAS. APLICAÇÃO AO ECOSISTEMA DA RESSURGÊNCIA DE CABO FRIO (RJ).

Jean L. VALENTIN\*  
Francisca E. MACEDO-SAIDAH\*\*  
Denise R. TENENBAUM\*\*\*  
Nadja M. Lins da SILVA\*

## INTRODUÇÃO

O fitoplâncton é constantemente submetido a variações de abundância e composição específica. São numerosos os exemplos de sucessão encontrados na literatura, mas os resultados recém obtidos em Cabo Frio (Estado do Rio de Janeiro) nos servirão como exemplo local (Macedo et al., 1975; Valentin et al., 1985).

Este trabalho não se propõe a determinar as causas destas sucessões (temperatura, luminosidade, nutrientes, taxa de divisão celular etc. . .) mas analisar um parâmetro freqüentemente utilizado nos estudos ecológicos do plâncton, a diversidade específica, cujas variações informam sobre a estrutura e a dinâmica do sistema. A diversidade específica, parâmetro de uso freqüente por todos os ecologistas terrestres ou marinhos, tanto no domínio animal quanto no vegetal, é quantificada sob forma de índices amplamente difundidos na literatura.

Margalef (1958) estabeleceu uma teoria sobre a evolução de um ecossistema. Segundo este autor, um ecossistema evolui para uma complexidade maior à medida que aumenta seu grau de maturidade, o qual será avaliado através do estudo da sua estrutura, ou seja, através da análise quantitativa e qualitativa das populações.

No início do seu desenvolvimento, o sistema fitoplanctônico apresenta uma estrutura simples e sua composição específica é caracterizada pela presença de um número reduzido de espécies geralmente de pequeno porte, com taxa de multiplicação elevada e com dominância bem acentuada de uma ou duas espécies apenas. Essas espécies chamadas de "oportunistas" são responsáveis pelos primeiros picos de biomassa primária, visto que se encontram em fase de crescimento exponencial. As diatomáceas dos gêneros *Skeletonema*, *Nitzschia* e *Leptocylindrus* são as mais freqüentemente observadas neste estado de evolução. A diversidade específica é baixa. O índice que a caracteriza é sempre inferior a  $2 \text{ bits.cel}^{-1}$ , descendo muitas

\*Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, rua Kioto, 253, 28910 Arraial do Cabo, RJ, Brasil.

\*\*Superintendência Estadual do Meio Ambiente de Goiás, Goiânia, GO, Brasil.

\*\*\*Laboratório Integrado de Ficologia, Depto. Biologia Marinha, UFRJ, Brasil.

vezes abaixo de 1 bit.cel<sup>-1</sup>. É o estágio 1 da sucessão segundo o modelo de Margalef.

À medida que o fitoplâncton se desenvolve, outras espécies aparecem juntando-se às primeiras. São organismos de grande porte, representados por espécies de diatomáceas pertencendo aos gêneros *Rhizosolenia*, *Hemiaulus*, *Guinardia*, *Detonula* e *Bacteriastrum*. A introdução progressiva dessas espécies no sistema equilibra a repartição dos indivíduos entre as espécies, provocando um aumento do índice de diversidade específica. Neste estágio, chamado de estágio 3 da sucessão fitoplanctônica, não existe uma dominância nítida e o índice é sempre superior a 3 bits.cel<sup>-1</sup>, podendo chegar até 4,50 bits.cel<sup>-1</sup>. O desenvolvimento algal encontra-se em fase de "plateau". O sistema fitoplanctônico, caracterizado por uma estrutura estável e equilibrada, atingiu seu máximo de maturidade e um elevado grau de complexidade.

O estágio 2 seria um estágio intermediário marcado pela presença de numerosas espécies do gênero *Chaetoceros*.

Do estágio 1 ao estágio 3 ocorre uma multiplicação celular intensa e as condições inicialmente favoráveis aos processos fotossintéticos são progressivamente degradadas pelo esgotamento dos sais minerais. Surgem então em proporção cada vez maior células móveis, sobretudo dinoflagelados, cujos diversos gêneros se sucedem cronologicamente na ordem crescente de seu porte: *Gonyaulax*, *Gymnodinium*, *Prorocentrum* e *Ceratium*. Neste ponto, o sistema fitoplanctônico, apesar da grande maioria das diatomáceas ter regredido, mantém-se num nível de diversidade específica relativamente elevado pela presença dos dinoflagelados.

Os dinoflagelados, principalmente os do gênero *Ceratium*, possuem uma velocidade de crescimento lenta e, somente em condições hidrológicas estáveis (águas calmas e estratificadas), sua biomassa poderá alcançar valores elevados, chegando a provocar o fenômeno da maré vermelha. Neste caso extremo, o índice de diversidade específica retorna a valores muito baixos, característicos do estágio 1; porém, através do exame de sua composição específica, será possível verificar com maior segurança o estágio de evolução do sistema fitoplanctônico.

Este padrão geral de sucessão de populações fitoplanctônicas só pode ser observado na sua íntegra dentro de uma mesma massa d'água. Esta exigência não é preenchida pelos métodos clássicos de observação no mar (coletas periódicas discretas em uma ou várias estações fixas), pois raramente permitem acompanhar o ciclo evolutivo completo das populações, mas apenas uma seqüência de estágios unicamente interpretável num contexto geográfico mais amplo.

O conceito de diversidade específica e o modelo de sucessão como sugerido por Margalef, foram, até esses últimos anos, intensamente utilizados pelos ecologistas, seja para avaliar o nível de poluição de um ambiente (Wilhm, 1967), seja para comparar comunidades biológicas de um ecossistema (Cairns, 1977) ou mais geralmente, como parâmetros descritivos da estrutura e do funcionamento de um sistema. Os autores concordam, entretanto, em reconhecer certos abusos na utilização do índice de diversidade específica, com interpretações às vezes precipitadas levando a conclusões errôneas. Esses conceitos estão sendo reavaliados (Valiela, 1984). Existe atualmente um consenso entre ecologistas segundo o qual não há obrigatoriamente inter-relação entre a diversidade biológica de um ecossiste-

ma e a estabilidade da sua estrutura. A diversidade, com seus dois componentes que são o número de espécies e a regularidade de repartição dos indivíduos entre as espécies (Pielou, 1966), é um aspecto estrutural da comunidade, enquanto que a estabilidade é ligada ao funcionamento dessa comunidade. Washington (1984) reexaminou esses conceitos num trabalho de síntese sobre a utilização dos diversos índices biológicos, de similaridade e de diversidade em ecossistemas aquáticos. Para o domínio aquático, e principalmente marinho, Longhurst (1985), entretanto, relaciona a existência de uma estrutura vertical estável, incluindo a termoclina, como uma das mais importantes causas de variação da diversidade planctônica regional na camada eufótica.

## OS ÍNDICES DE DIVERSIDADE ESPECÍFICA

Às vezes um simples exame da composição específica de uma amostra de fitoplâncton pode ser suficiente para deduzir o seu estágio de evolução, mas é freqüentemente necessário complementar o estudo pelo cálculo de um índice de diversidade específica. Os trabalhos de Travers (1971), Legendre & Legendre (1979) e Washington (1984), a partir dos quais foi baseado este estudo, constituem um excelente enfoque do problema. No livro de Ludwig & Reynolds (1988), o capítulo "Diversity Indices" representa uma das mais recentes análises do assunto, com exemplos numéricos.

### Os índices absolutos

Eles se dividem em dois grupos: a) os mais simples, que levam em conta apenas o número total de células, foram estabelecidos sobre a hipótese de que a distribuição dos indivíduos entre as espécies segue uma lei teórica; b) os derivados da teoria da informação.

### Índices baseados numa distribuição teórica

Desde que Gleason (1922), trabalhando com associações vegetais terrestres, estudou o problema da diversidade específica, várias expressões deste índice foram propostas. Margalef (1951) deduziu um índice muito simples baseado nos estudos de Gleason:

$$d1 = \frac{S - 1}{\ln(N)} \quad \text{onde } \begin{array}{l} S = \text{número de espécies} \\ N = \text{número total de células} \end{array}$$

Menhinick (1964 apud Travers 1971) comparou alguns outros índices de cálculo rápido e simples:

$$d2 = \frac{S}{\text{Log } N} \quad d3 = \frac{\text{Log } S}{\text{log}(N)} \quad d4 = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

concluindo que o último (d4) é o mais eficiente, visto que os outros índices são mais fortemente ligados às variações de N.

Travers (1971) e Washington (1984) citam igualmente Fisher et al. (1943), Dahl (1960) e Mountford (1962) que propuseram índices baseados em séries logarítmicas, e concluem sobre a preferência de escolher um índice que leva em conta a abundância dos indivíduos de cada espécie presente. Os índices derivados da teoria da informação respeitam esta exigência.

### Índices derivados da teoria da informação

Esta outra medida da diversidade é feita através da noção de “informação” como entropia negativa. A entropia é a medida de desordem de um ecossistema (conceito equivalente à entropia termodinâmica).

Quando o sistema fitoplanctônico alcança seu apogeu, após a fase de crescimento exponencial, diz-se que ele adquiriu uma estrutura organizada, ordenada e complexa e sua diversidade específica encontra-se elevada. No caso extremo de uma diversidade máxima, as células são repartidas equitativamente entre as espécies. A probabilidade de uma célula escolhida ao acaso no sistema pertencer a uma espécie predeterminada é muito pequena. É preciso um maior número de “informações” para que uma célula possa ser identificada. Em consequência, a diversidade específica, medida pelos índices derivados desta teoria, corresponde ao “grau de incerteza” relativo à identificação de uma espécie a partir da retirada aleatória de uma célula (Pielou, 1966).

O mais conhecido dos índices de diversidade é, sem dúvidas, o índice de Shannon ( $H'$ ) (= Shannon-Wiener, mas chamado erradamente de Shannon-Weaver):

$$H' = - \sum p_i \cdot \log_2(p_i) \quad \text{onde } p_i = n_i/N$$

$p_i$  é a probabilidade de coleta da espécie  $i$  na população, estimada a partir da sua frequência relativa ( $n_i/N$ ) na amostra ( $n_i$  = número de células da espécie  $i$ ,  $N$  = número total de células da amostra).

Utilizando os logaritmos a base 2, o valor do índice de diversidade é expresso em “*bit* por célula”. O *bit* é a unidade de informação correspondente à quantidade de informação necessária para exercer uma seleção entre duas soluções de mesma probabilidade.

Para representar a diversidade do plâncton, Margalef (1963) elaborou uma fórmula a partir da expressão de Brillouin (1951, apud Travers 1971; Washington 1984) representando a entropia de um sistema de partículas:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \log_2 \frac{N!}{n_1! n_2! \dots n_s!}$$

onde  $\bar{D}$  = índice de Margalef (em bits.cel<sup>-1</sup>)

$N$  = número total de células observadas na amostra

$n_1 n_2 \dots n_s$  = número de células de cada espécie 1, 2 . . . s

O índice de Margalef utiliza os logaritmos de fatorial, que podem ser obtidos diretamente por tabelas ou calculados pela função de Stirling:

$$\log(N!) \cong (N + 0,5) \log N - 0,43429N + 0,39903$$

A fórmula do índice  $\bar{D}$  de Margalef nos dá unicamente a diversidade da amostra, ao contrário da fórmula de Shannon ( $H'$ ) que permite estimar a diversidade da “população” (no sentido estatístico do termo), quando os números de células  $N$  e de espécies  $S$  são suficientemente elevados.

Outros índices podem ser encontrados na literatura

- Simpson (1949 apud Travers 1971) desenvolveu uma medida da uniformidade, isto é, o inverso da diversidade

$$SI = \left\{ \sum_{i=1}^s n_i(n_i - 1) \right\} \frac{1}{N(N-1)}$$

- Mac Intosh (1967 apud Legendre & Legendre 1979) baseou-se na noção de “distância”:

$$MI = \left\{ N - \sqrt{\sum_{i=1}^s n_i^2} \right\} \frac{1}{N - \sqrt{N}}$$

Os índices relativos

A dominância (D)

Esta medida avalia a abundância relativa da espécie principal ou das duas espécies principais. As fórmulas são:

$$D1 = \frac{100 \cdot n_1}{N} \qquad D2 = \frac{100(n_1 + n_2)}{N}$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  correspondem ao número de células das duas espécies 1 e 2 respectivamente mais representadas na amostra.

A redundância (R)

A medida de redundância  $R$  de Patten (1962 apud Travers 1971) baseia-se nos índices derivados da teoria da informação. Para uma determinada amostra de fitoplâncton possuindo  $N$  células distribuídas entre  $S$  espécies, há uma diversidade mínima ( $\bar{D}_{\min}$ ) e uma diversidade máxima ( $\bar{D}_{\max}$ ). Entre esses dois valores localiza-se o índice de diversidade calculado para a amostra.

Exemplificando: para uma amostra com  $N = 100$  células e  $S = 10$  espécies, a diversidade será mínima se uma espécie possuir 91 células e cada uma das 9 outras possuir apenas 1 célula; mas ela será máxima se cada espécie possuir 10 células.

Os valores de  $\bar{D}_{\text{mín}}$  e  $\bar{D}_{\text{máx}}$  são estimados a partir do  $\bar{D}$  de Margalef:

$$\bar{D}_{\text{mín}} = (\log_2 N! - \log_2 [N - (S - 1)!]) / N$$

$$\bar{D}_{\text{máx}} = (\log_2 N! - S \cdot \log_2 (N/S!)) / N$$

A redundância (“Redundancy”) R é calculada pela fórmula seguinte:

$$R = (\bar{D}_{\text{máx}} - \bar{D}) / (\bar{D}_{\text{máx}} - \bar{D}_{\text{mín}})$$

O cálculo de R é importante, pois seu valor define a diversidade observada em relação ao intervalo de diversidade dentro do qual a amostra de fitoplâncton poderia variar, levando em conta o número de células total e de espécies desta amostra.

### A Uniformidade (J)

Este índice relativo, chamado de “Evenness” por Pielou (1962 apud Travers 1971) pode ser calculado, seja a partir do  $\bar{D}$  de Margalef (J), seja a partir do  $H'$  de Shannon (J'). Teremos:

$$J = \frac{\bar{D}}{\bar{D}_{\text{máx}}} \quad \text{e} \quad J' = \frac{H'}{H'_{\text{máx}}} = \frac{H'}{\log S}$$

O índice de uniformidade representa a razão entre o índice de diversidade observada e a diversidade máxima que poderia alcançar a amostra para o número total N de células e o número S de espécies que ela possui.

O índice relativo de Redundância varia de 1 (quando a diversidade é mínima) a 0 (quando a diversidade é máxima), enquanto que, ao contrário, o índice de uniformidade varia de 0 a 1 nas mesmas situações.

Os índices relativos são importantes para a interpretação de amostras isoladas, sobretudo em amostras pobres em fitoplâncton para as quais os índices de diversidade absoluta apresentam geralmente valores artificiais, levando a conclusões ecológicas erradas.

## A UTILIZAÇÃO DOS ÍNDICES DE DIVERSIDADE ESPECÍFICA

### Considerações metodológicas

Travers (1971) realizou um estudo comparativo entre os diversos índices. Suas conclusões são de grande interesse para um uso adequado desses índices. O autor fez também comentários pertinentes à coleta de dados, métodos de amostragem mais utilizados, sugerindo a escolha de um determinado índice levando em consideração as vantagens e limitações de cada um. Estas observações serão discutidas a seguir, à luz dos nossos próprios dados.

As contagens de fitoplâncton utilizadas para o cálculo do índice de diversidade deverão considerar a célula como unidade morfológica, e não as colônias que podem perder sua integridade pelo processo de manipulação.

As coletas de água para a análise do fitoplâncton segundo a técnica de Utermöhl (1931) são preferíveis às coletas de redes de arrasto por causa do poder seletivo da malha da rede e dos riscos de amostrar em sistemas fitoplanctônicos distintos, o que conseqüentemente provocaria um aumento anormal da diversidade específica.

Alguns índices, e especialmente o de Gleason, são fortemente influenciados pelo valor de N quando este é muito pequeno, no caso de um fitoplâncton pobre. É aconselhado contar pelo menos 100 células e 10 espécies (ou 50 células e 20 espécies), sendo estes valores puramente indicativos.

Nos cálculos dos índices de Margalef ( $\bar{D}$ ) e de Gleason (d) devem ser utilizados os dados brutos de contagem e não os extrapolados ao litro (ou outra unidade de volume). Para Shannon ( $H'$ ) entretanto não é necessário, já que ele considera as proporções ao invés dos valores absolutos de contagem.

### Comparação entre diversos índices

A análise comparativa dos diversos índices de diversidade necessita de um número bastante grande de dados, a fim de obter correlações mais significativas. Para a exemplificação deste trabalho foram utilizados dados oriundos de um projeto de pesquisas sobre o fitoplâncton da Baía de Arraial do Cabo (RJ).

As coletas foram feitas semanalmente durante um ano nas águas superficiais de 3 pontos da Baía. As 160 amostras de água conservadas com lugol foram analisadas em termo de conteúdo fitoplanctônico pelo método de Utermöhl. As identificações mais difíceis exigiram a montagem das células em lâmina após tratamento pelo método de oxidação de Hasle & Fryxell (1970).

Foram calculados os seguintes índices absolutos e relativos: Gleason-Margalef (d), Menhinick (MK), Shannon ( $H'$ ), Margalef ( $\bar{D}$ ), inverso de Simpson (SI), Mac Intosh (MI), Redundância (R) e Uniformidade (J). As abreviações entre parêntesis serão utilizadas nas tabelas e nos gráficos. Não foram computadas, para o cálculo dos índices, as amostras que apresentaram um número reduzido de espécies ou de total de células.

O índice de Margalef ( $\bar{D}$ ) foi utilizado como referencial para as comparações com outros índices. Foram calculados os coeficientes de correlação linear e a equação da reta entre  $\bar{D}$  e os demais. Os resultados constam da tabela I e das figuras 1 e 2.

Tabela 1 – Correlação entre os índices de Margalef ( $\bar{D}$ ), Gleason (d), Menhinick (MK), Shannon ( $H'$ ), inverso de Simpson (SI), Mac Intosh (MI), Redundância (R) e Uniformidade (J) (Número de dados = 160). Comparação com os resultados de Travers (1977)

Índices	Dados de Cabo Frio		Travers (1977)	
	r	reta	r	reta
d	0,880	$D = 0,40 d + 1,04$	-	não calculada
MK	0,610	$D = 0,61 MK + 1,63$	-	não calculada
H'	0,959	$D = 1,96 H' + 0,056$	0,998	$D = 0,95 H' + 0,001$
SI	0,800	$D = 1,96 SI + 1,29$	-	$D = 2,8931 SI + 0,63$
MI	0,735	$D = 3,31 MI + 0,77$	0,978	não calculada
R	-0,830	$D = -3,92 R + 4,46$	-0,807	$D = -3,228 R + 3,699$
J	-0,774	$R = -0,79 J + 0,97$	-0,991	$R = -0,952 J + 1,012$

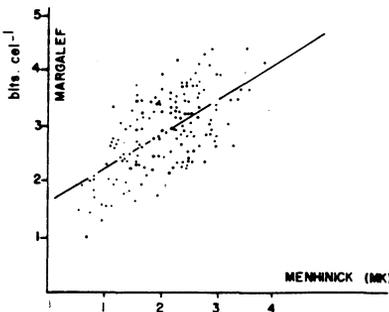
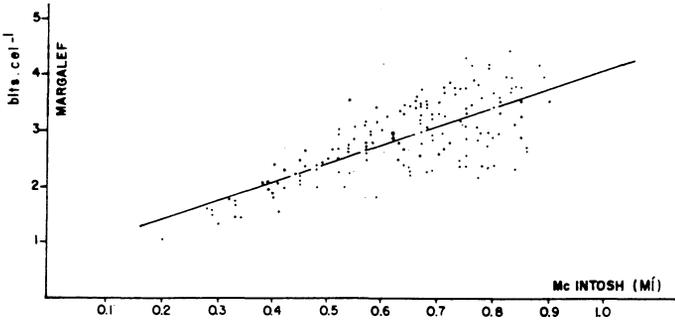
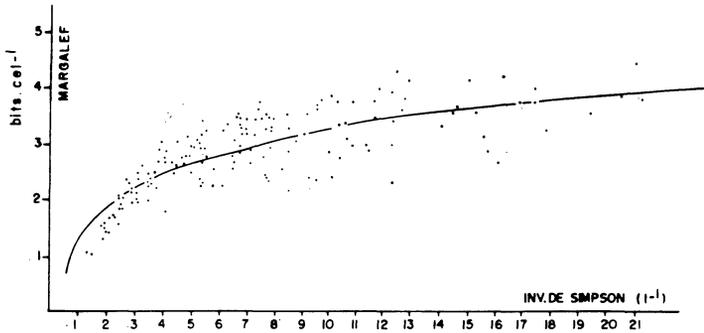


Figura 1 – Correlação entre os índices de diversidade específica do fitoplâncton da Baía de Arraial do Cabo (RJ).

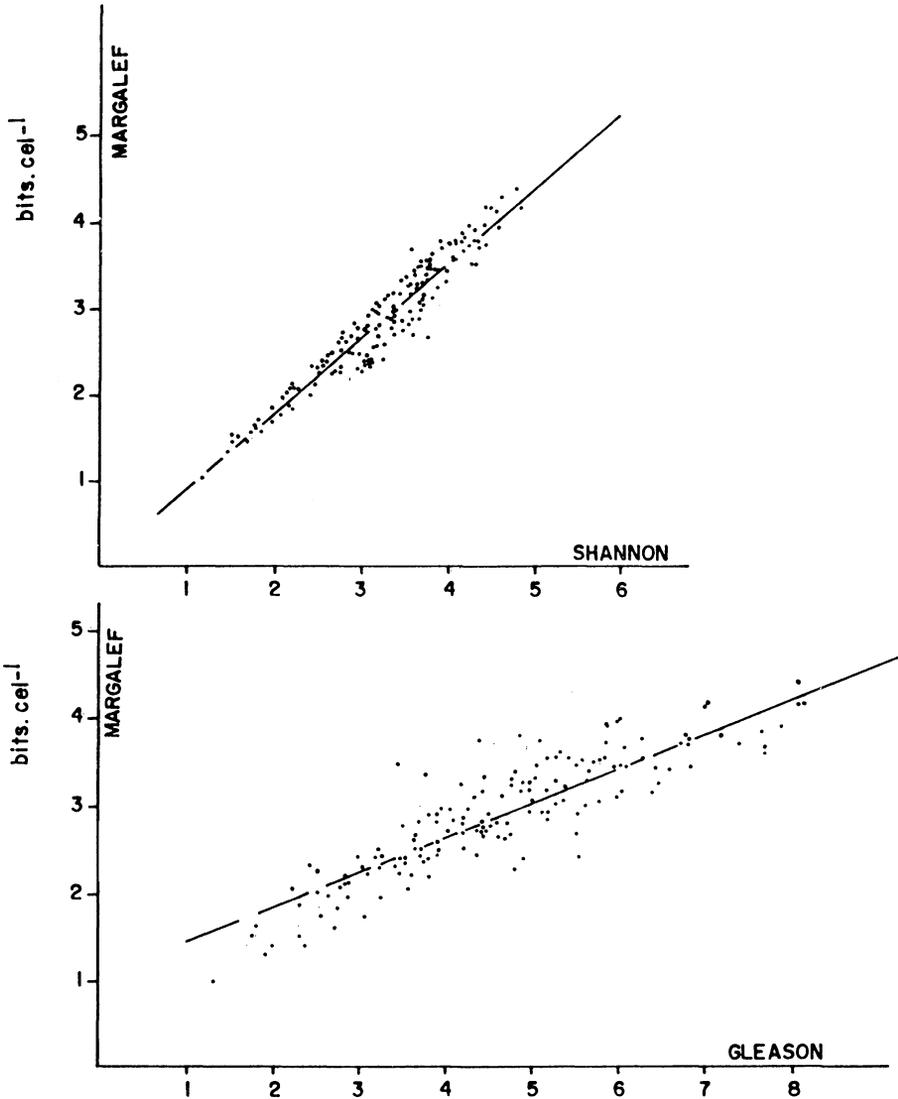


Figura 2 – Correlação entre os índices de diversidade específica do fitoplâncton da Baía de Arraial do Cabo (RJ).

Foi efetivamente constatado que o índice de Shannon é o que mais se aproxima do índice de Margalef ( $r = 0,959$ ), mas com valores sempre ligeiramente superiores. O índice de Shannon, pela sua maior facilidade de cálculo e sua independência quanto à unidade utilizada, constitui a opção mais indicada, exceto em amostras muito pequenas não representativas das populações.

Com o índice de Gleason foi obtido uma correlação relativamente alta ( $r = 0,880$ ); ele apresenta ainda a vantagem da sua simplicidade de cálculo. Entretanto, o fato de não levar em conta a repartição das células entre as espécies, torna-se menos eficiente para uma estimativa mais precisa da diversidade.

O índice de Menhinick apresenta uma importante dispersão ( $r = 0,610$ ). O mesmo acontece com o índice de Mac Intosh ( $r = 0,735$ ) para valores de  $\bar{D}$  superiores a 2 bits.cel<sup>-1</sup>. Entretanto, Travers (1971) obteve uma correlação bem melhor ( $r = 0,983$ ) (Tab. I), o que nos leva a pensar que estes últimos índices podem não ser adequados para nossas amostras.

O índice inverso de Simpson deve ser interpretado após uma transformação logarítmica, em vista da distribuição não linear dos pontos no diagrama de regressão. Mesmo assim o coeficiente permanece baixo ( $r = 0,800$ ), também inferior àquele de Travers ( $r = 0,983$ ).

A correlação entre  $\bar{D}$  e os índices relativos não se revelou muito boa, melhor para R ( $r = -0,830$ ) do que para J ( $r = 0,774$ ), ao inverso do resultado de Travers (Tab. I). No cálculo de J, a diversidade máxima é normalmente equivalente ao logaritmo do número total de espécies fitoplancônicas presentes no meio natural na hora da coleta. Conseqüentemente o valor de S é geralmente subestimado pelo número de espécies na amostra. O índice J deve, por causa disso, ser interpretado com toda cautela. Recentemente, Ludwig & Reynolds (1988) aconselharam o índice de uniformidade de Hill (calculado pela razão entre o índice de Simpson e a exponencial do índice de Shannon); este índice não é afetado pela riqueza em espécies.

## INTERPRETAÇÃO ECOLÓGICA

No decorrer de um ciclo anual foi realizado um estudo quantitativo do fitoplâncton, em duas estações fixas: estação A, situada na Baía de Arraial do Cabo e estação B, localizada no litoral sudoeste da ilha de Cabo Frio, na região de afloramento das águas de ressurgência (Fig. 3). As coletas de água foram realizadas semanalmente na superfície na estação A, e de 2 em 2 dias a 4 profundidade (0, 15, 30 e 50 m) na estação B (Macedo et al., 1975; Valentin et al., 1985).

As condições hidrológicas próprias à região de Cabo Frio variam em função do regime de ventos. A alternância de fases de ressurgência e subsidência proporciona ao ecossistema uma característica de grande instabilidade (Valentin, 1984).

Os ventos E-NE ocasionam, na estação B principalmente, a subida de água de ressurgência proveniente da Água Central do Atlântico Sul, praticamente desprovida de células vegetais, devido à sua origem profunda. Os ventos de origem SW provocam o processo inverso, com ocorrência de água superficial quente proveniente da Corrente do Brasil possuindo um fitoplâncton característico de zonas tropicais oligotróficas, onde dominam dinoflagelados e diatomáceas, principalmente os gêneros *Rhizosolenia*, *Thalassionema*, *Hemiaulus*, *Guinardia*, *Detonula* e *Coscinodiscus*.

A ressurgência de água profunda enriquece a camada eufótica, estimulando o crescimento algal, principalmente das espécies *Nitzschia delicatissima*, *Skeletonema costatum* e *Rhizosolenia fragilissima*.

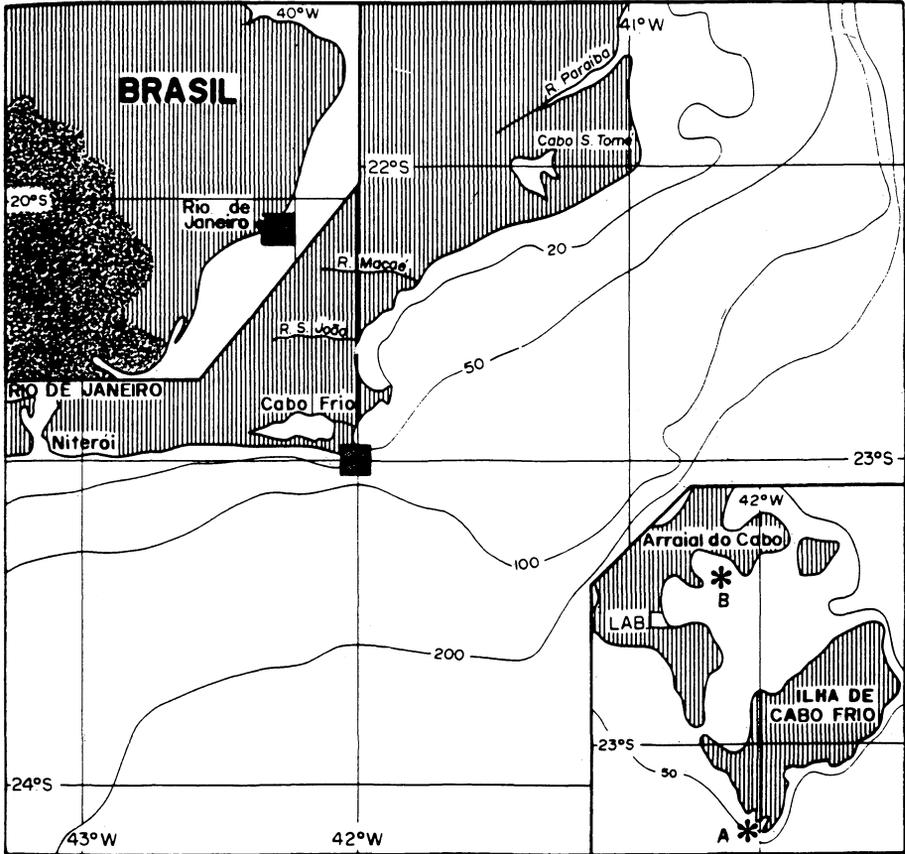


Figura 3 - Localização das estações de estudo.

A partir de um conjunto de amostras coletadas na estação B de julho 1973 a fevereiro 1974 foi calculado o índice de diversidade específica de Margalef ( $\bar{D}$ ). As variações espaço-temporais são representadas no diagrama da figura 4. De acordo com nossas observações, constatou-se que, de julho a outubro,  $\bar{D}$  foi frequentemente superior a  $4,00 \text{ bits.cel}^{-1}$  enquanto que, no verão, período favorável ao afloramento das águas frias,  $\bar{D}$  alcançou seus mais baixos valores, comumente inferiores a  $3,00 \text{ bits.cel}^{-1}$ , podendo descer abaixo de  $2,00 \text{ bits.cel}^{-1}$  em fevereiro. Na profundidade de 50 m, próximo ao fundo da estação, os baixos valores de diversidade foram devidos à predominância de *Paralia sulcata*. Essa diatomácea epífita de origem bêntica foi carreada do sedimento em consequência de fortes turbulências ou de correntes do fundo (Rivera, 1973). Neste caso, a biomassa do fitoplâncton apresentou valores sensivelmente mais baixos e a diminuição do índice de diversidade manifestou-se apenas como característica fortuita e ocasional.

nal, não traduzindo nenhuma influência eutrofizante que possa acarretar uma sucessão de populações.

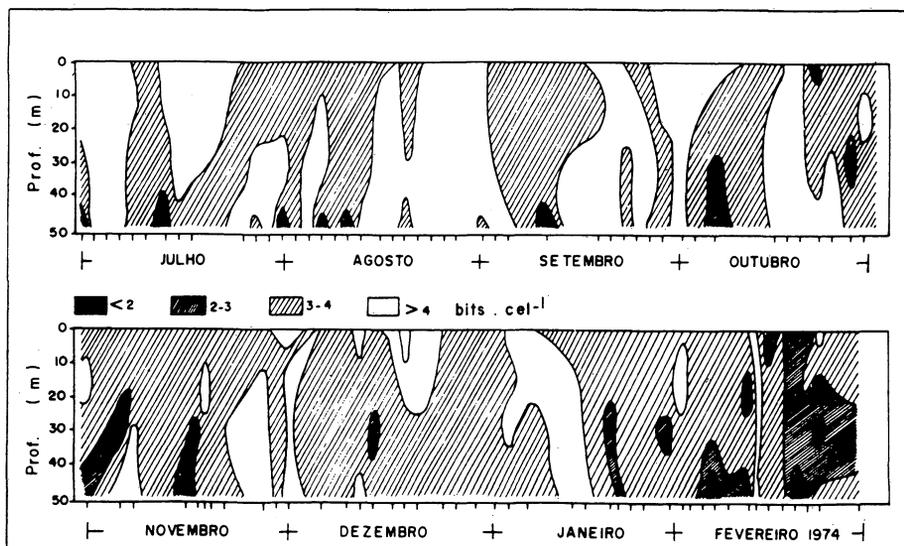


Figura 4 – Variação espaço-temporal da diversidade específica do fitoplâncton em Cabo Frio (índice de Margalef).

Os valores de  $\bar{D}$  inferiores a 2,00 bits.cel<sup>-1</sup> foram igualmente observados tanto na superfície quanto em posição subsuperficial (entre 10 e 20 m) ao nível da termoclina; neste caso, o fitoplâncton era constituído de células jovens em fase de crescimento exponencial, consequência da fertilização pela água profunda. A biomassa algal tendeu para seus valores máximos, mas sofreu interrupções por causa das freqüentes perturbações hidrológicas (alternância de fases de ressurgência e subsidência) que tornaram impossível a elaboração de um modelo evolutivo.

As condições hidrológicas da Baía de Arraial do Cabo na estação A são relativamente mais estáveis. As águas de ressurgência que aí penetram e não afloram, provocam uma lenta circulação na camada superficial e, nestas condições, é possível visualizar a evolução temporal do sistema fitoplanctônico e da sua diversidade específica (Figs. 5, 7).

As variações do índice de Margalef durante o ano apresentaram dois períodos distintos (Fig. 7):

1) de setembro a março, período caracterizado por freqüentes penetrações de água fria no fundo da Baía como visualizado pela variação do gradiente térmico (Fig. 6), a diversidade do fitoplâncton oscilou entre o mínimo de 1,50 bit.cel<sup>-1</sup> e o máximo de 4,50 bits.cel<sup>-1</sup>, atingindo seus mais baixos valores nos dias 17/9, 23/10 e 19/2;

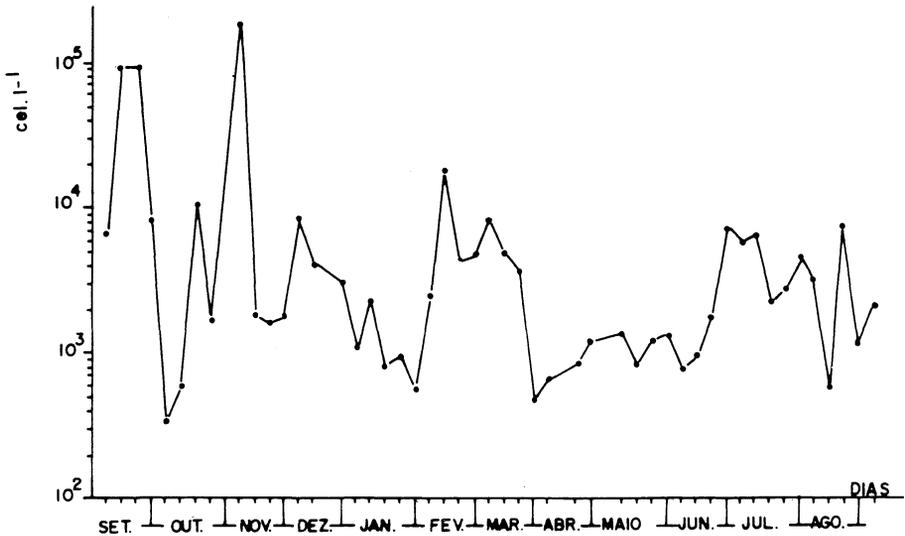


Figura 5 – Variação anual do fitoplâncton nas águas da Baía de Arraial do Cabo (RJ).

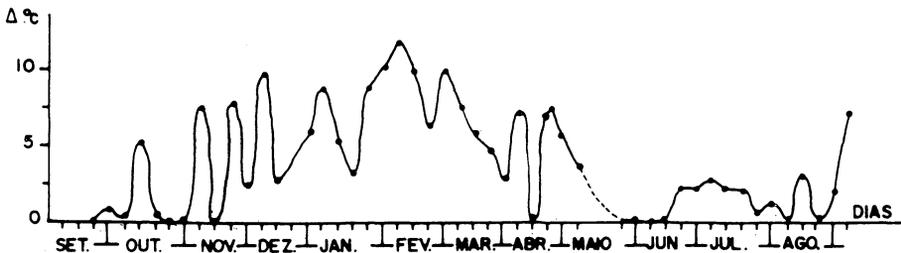


Figura 6 – Variação anual do gradiente térmico nas águas da Baía de Arraial do Cabo (RJ).

2) de abril a agosto, a diversidade apresentou variações de menor amplitude, de 2,50 a 4,50 bits.cel<sup>-1</sup>. É um período de menor penetração de água fria no sistema

da Baía, o qual abriga um fitoplâncton em equilíbrio ecológico com grau elevado de maturidade.

A análise simultânea das variações temporais de  $\bar{D}$  e da redundância R (Fig. 7) permite evidenciar quatro ciclos fitoplanctônicos sucessivos no decorrer do período estival:

1) de 17 de setembro a 16 de outubro:  $\bar{D}$  variou de 1,80 a 2,90 bits.cel<sup>-1</sup>. A penetração da água fria do dia 16 de outubro interrompe o ciclo, impedindo as populações de alcançar sua maturidade máxima;

2) de 23 de outubro a 4 de dezembro:  $\bar{D}$  elevou-se progressivamente de 1,50 para 3,80 bits.cel<sup>-1</sup> e R passou de 0,6 a 0,18. A evolução das populações foi interrompida por freqüentes e breves incursões de água profunda. A cada fluxo penetrante  $\bar{D}$  acusou uma ligeira diminuição, porém o sistema tendeu para seu equilíbrio, atingindo-o em 20 de dezembro com valor de  $\bar{D}$  igual a 4,35 bits.cel<sup>-1</sup>;

3) de 2 a 22 de janeiro: a penetração das águas de ressurgência foi mais lenta e progressiva; um início de eutrofização provocou um rejuvenescimento parcial do sistema ( $\bar{D} = 2,30$  bits.cel<sup>-1</sup>) que evoluiu somente até um estágio intermediário ( $\bar{D}$  estabilizou-se por volta de 3,00 bits.cel<sup>-1</sup>);

4) de 19 de fevereiro a 26 de março: a invasão intensa de água profunda que ocorreu durante a primeira quinzena de fevereiro provocou uma queda na diversidade específica até chegar ao mínimo de 1,60 bits.cel<sup>-1</sup>. Em seguida, por difusão vertical dos sais minerais, o fitoplâncton atinge sua diversidade máxima ( $\bar{D} = 4,32$  bits.cel<sup>-1</sup>).

É possível, a partir desses resultados, elaborar um primeiro padrão de sucessão de populações, como a esquematizada na figura 8. As espécies *Nitzschia delicatissima*, *Rhizosolenia fragilissima* e *Skeletonema costatum* são responsáveis pelo crescimento exponencial da biomassa. A diversidade aumenta em seguida

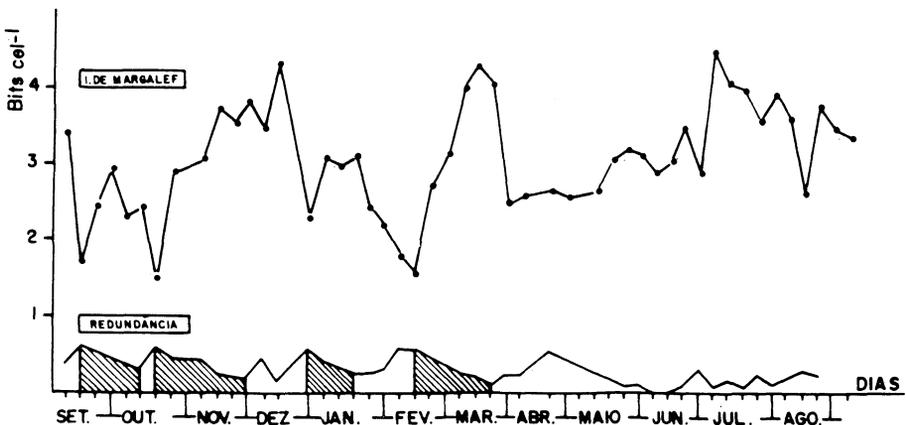


Figura 7 – Variação anual da diversidade específica do fitoplâncton nas águas da Baía de Arraijal do Cabo (RJ).

com o aparecimento de numerosas espécies do gênero *Rhizosolenia* (*R. setigera*, *R. alata* e *R. stolterfothi*). No fim da sucessão a entropia é mínima, correspondendo a uma diversidade superior a 4,00 bits.cel<sup>-1</sup> e a um sistema fitoplanctônico

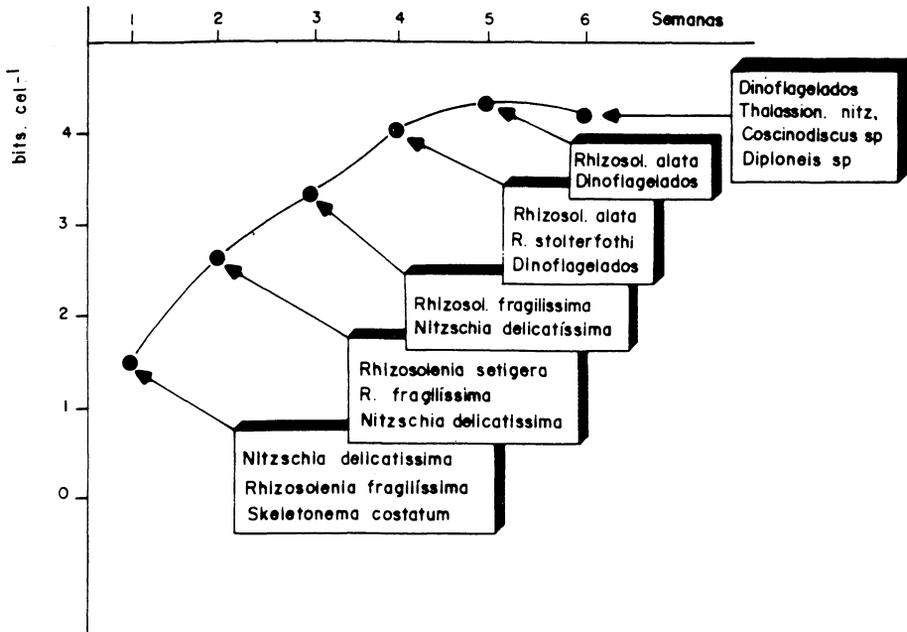


Figura 8 – Modelo de uma sucessão fitoplanctônica típica na Baía de Arraial do Cabo (RJ).

quantitativamente pouco abundante onde dominam os dinoflagelados, associados às diatomáceas *Thalassionema nitzchioides*, *Coscinodiscus spp* e *Diploneis spp*.

## DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O índice de Margalef é considerado como um dos melhores para medir a diversidade específica de uma amostra; ele é derivado do índice de Shannon, o qual estima a diversidade do sistema. Esses índices absolutos devem ser acompanhados do cálculo de um índice relativo, indispensável para posicionar uma amostra isolada no contexto da dinâmica evolutiva do sistema de onde foi extraída. De maneira geral, a interpretação de qualquer índice de diversidade com a finalidade de estabelecer o grau de evolução de populações planctônicas, deve ser feita levando em conta seus componentes específicos. Uma interpretação exclusivamente baseada em variações do índice de diversidade pode induzir a conclusões errôneas.

O início de uma sucessão fitoplanctônica é sempre condicionado a um processo de eutrofização (ascensão de água profunda, influência terrígena. . .), o qual proporciona, numa primeira fase, a proliferação de um reduzido número de espécies, e conseqüentemente uma redução brutal do índice de diversidade específica (menos de 1,00 bit.cel<sup>-1</sup>). A recíproca, entretanto, nem sempre é verdadeira: baixos valores do índice podem ser ligados a outros fatores, tais como a influência do hidrodinamismo; observamos que, em Cabo Frio, o fitoplâncton é as vezes dominado por diatomáceas bênticas arrancadas do sedimento pelas correntes.

O estudo da diversidade do fitoplâncton no ecossistema da ressurgência de Cabo Frio permitiu colocar em evidência alguns aspectos notáveis da sua estrutura e formular hipóteses sobre sua dinâmica.

O índice anual médio é relativamente alto (entre 3,00 e 4,00 bits.cel<sup>-1</sup>), sendo menor durante o período favorável à ressurgência, quando atinge seus valores mínimos (entre 1,00 e 2,00 bits.cel<sup>-1</sup>).

Contrariamente às outras zonas eutróficas, a diversidade do fitoplâncton nesta região é raramente inferior a 1,00 bit.cel<sup>-1</sup>, o que traduz um grau de maturidade relativamente elevado do ecossistema. Esta singularidade pode explicar o fato da biomassa fitoplanctônica das águas de Cabo Frio não atingir os valores normalmente esperados em zona de ressurgência. O fitoplâncton de Cabo Frio tem densidades celulares raramente superiores a 10<sup>6</sup> de células por litro. Uma hipótese para explicar essa aparente deficiência seria o longo caminho sobre a plataforma continental que as águas profundas devem percorrer para chegar ao litoral de Cabo Frio. A “chuva orgânica”, oriunda da camada superficial e sobretudo da termoclina sempre mais rica em plâncton, age como *inoculum* algal, permitindo ao sistema evoluir mais rapidamente para uma estrutura mais ordenada.

As águas superficiais quentes da Corrente do Brasil apresentam um fitoplâncton muito diversificado; porém, é ao nível da termoclina que se inicia o desenvolvimento algal e que se observam as mais baixas diversidades.

O estudo *in situ* sobre sucessão de populações é fortemente dificultado pela instabilidade hidrológica. As trocas freqüentes de massas d'água na zona de afloramento tornam praticamente impossível a análise evolutiva do sistema fitoplanctônico em uma única estação de estudo. Ao contrário, as águas superficiais da Baía de Arraial do Cabo, relativamente abrigada, mantêm uma certa estabilidade favorável a um desenvolvimento completo do sistema fitoplanctônico. De setembro a março, vários ciclos se repetem com organismos dominantes sucessivos: *Nitzschia*, *Rhizosolenia* e dinoflagelados. O desenvolvimento de cada sucessão algal está diretamente relacionado com o ciclo de ressurgência na baía. Pode se notar que os melhores resultados biológicos são obtidos quando a penetração das águas ricas na baía é lenta e contínua, o que aumenta seu tempo de residência e se traduz por uma evolução planctônica bem estruturada. Ao contrário, pela ausência de ressurgência, o período invernal caracteriza-se por um fitoplâncton diversificado e pouco abundante, no seio de um ecossistema em equilíbrio.

As sucessões fitoplanctônicas das águas de Cabo Frio, e as variações concomitantes dos índices de diversidade específica seguem, em linhas gerais, o modelo de Margalef. Entretanto, a literatura mais recente relançou a discussão sobre o valor universal deste modelo que pode sofrer exceções. De fato, Valentin et al. (1986) constataram por exemplo que um dos índices mais baixos observados em

Cabo Frio (0,85 bit.cel<sup>-1</sup>) foi devido a um bloom de *Coscinodiscus oculus-iridis*, diatomácea de grande porte (200 µm).

A diversidade específica do fitoplâncton das águas de Cabo Frio foi também calculada na ocasião de outros trabalhos, seja *in situ* na mesma região (Valentin et al., 1986), seja *in vitro* a partir de populações incubadas em laboratório (Gonzalez-Rodriguez et al., 1985). O trabalho de Valentin et al. (1986) confirmou que a maioria dos valores do índice de diversidade do fitoplâncton mantém-se acima de 2 bits.cel<sup>-1</sup>, e que os valores entre 1 e 2 bits.cel<sup>-1</sup> são ligados à dominância de *Leptocylindrus danicus* e *Rhizosolenia fragilissima*. No laboratório, os resultados de Gonzalez-Rodriguez et al. (1985) revelaram que, sob condições de enriquecimentos diferenciais, o fitoplâncton de Cabo Frio confirma a estrutura e a dinâmica de sucessões observadas *in situ*.

Comparativamente a outras zonas de ressurgência, podemos constatar diferenças quantitativas importantes ao nível de biomassa primária que acarretam diferenças ao nível de diversidade. O sistema fitoplanctônico das grandes ressurgências, tais como as do Peru, Califórnia, África do Norte e do Sul, alcança biomassas 5 a 10 vezes maiores que as de Cabo Frio (Boyd & Smith 1980, Blasco et al., 1981), o que se traduz, ao nível estrutural, por um fitoplâncton de baixa diversidade durante os períodos de proliferação (inferior a 1,00 bit.cel<sup>-1</sup>), embora com composição específica bem parecida à observada em nossa região (Mendiola 1981; Jimenez 1981).

## ABSTRACT

*The specific diversity indices for analysing phytoplankton succession. Application to the Cabo Frio (RJ, Brazil) upwelling ecosystem.* Extensive qualitative and quantitative data on phytoplankton collected in the Cabo Frio (Brazil) upwelling zone and analysed by Utermöhl method were used for calculating Gleason-Margalef, Menhinick, Shannon, Margalef, Simpson inverse and Mac Intosh absolute diversity indices, and the relative indices of Redundancy and Evenness. The relationships between Margalef index and the other indices were studied. Shannon index, mathematically similar to the Margalef index showed the best agreement ( $r = 0,959$ ); Gleason index is simpler to calculate and is quite satisfactory for a superficial analysis ( $r = 0,880$ ). The Redundancy calculation is recommended for the interpretation of a single sample. In general, at Cabo Frio, phytoplankton diversity index is rarely less than 1.00 bit.cel<sup>-1</sup> even after the enrichment by deep water. The planktonic ecosystem in Cabo Frio maintains a certain level of maturity which may explain the relatively mild nature of the blooms which follow upwelling.

**Key Words:** Phytoplankton, diversity indices, upwelling, Brazil.

## RESUMO

A partir de dados quantitativos e qualitativos sobre o fitoplâncton da ressurgência de Cabo Frio (RJ) foram calculados os índices absolutos de diversidade

específica de Gleason-Margalef, Menhinick, Shannon, Margalef, inverso de Simpson, Mac Intosh e os índices relativos de Redundância e Uniformidade. Foi realizado um estudo de correlações entre o índice de Margalef e os demais. O índice de Shannon apresentou a melhor correlação ( $r = 0,959$ ) e o de Gleason, de cálculo bem simples, pode ser considerado satisfatório para uma análise superficial ( $r = 0,880$ ). O cálculo da Redundância é aconselhado para a análise de uma amostra isolada. Nas águas costeiras de Cabo Frio, o índice de diversidade específica do fitoplâncton é raramente inferior a  $1,00 \text{ bit.cel}^{-1}$ , mesmo após a fertilização pelas águas profundas. O ecossistema planctônico de Cabo Frio mantém um certo nível de maturidade que pode explicar a fraca intensidade dos florescimentos fitoplanctônicos consecutivos aos efeitos da ressurgência.

**Palavras-chave:** Fitoplâncton, diversidade, ressurgência, Brasil.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLASCO, D.; ESTRADA, M. & JONES, B. H. 1981. Short-time variability of phytoplankton population in upwelling regions. The example of Northwest Africa. In: *Coastal Upwelling*, p. 339-347, Coastal and Estuarine Sciences 1, F. A. Richards (Edit.), publ. by Amer. Geophys. Union, Washington.
- CAIRNS, Jr. J. 1977. Quantification of biological integrity. In: *The integrity of water*. Ed. by R. F. Ballentine and L. J. Guarraia; EPA Publications, New York.
- GONZALEZ-RODRIGUEZ, E., MAESTRINI, S. Y., VALENTIN, J. L. & RIVERA-TENENBAUM, D. 1985. Variation de la composition spécifique du phytoplancton de Cabo Frio cultivé en présence d'enrichissements différentiels.-*Oceanol. Acta*, 8(4): 441-452.
- HASLE, G. R. & FRYXELL, G. A. 1970. Diatoms: cleaning and mounting for light and electron microscopy. - *Trans. Am. Microsc. Soc.*, 89(4): 469-474.
- JIMENEZ, R. 1981. Composition and distribution of phytoplankton in the upwelling system of the Galapagos Islands. In: *Coastal Upwelling*, p. 348-356, Coastal and Estuarine Sciences 1, F. A. Richards (Edit.), publ. by Amer. Geophys. Union, Washington.
- LEGENDRE, L. & LEGENDRE, P. 1979. La diversité en écologie. In: *Écologie numérique T.1. Le traitement multiple des données écologiques*. Collection d'Écologie, 12, Masson, Paris, 197 pp.
- LONGHURST, A. R. 1985. Relationship between diversity and the vertical structure of the upper ocean. - *Deep-Sea Res.*, 32(12A): 1535-1570.
- LUDWIG, J. A. & REYNOLDS, J. F. 1988. Diversity indices. In: *Statistical ecology. A primer on methods and computing*. p.85-103, J. Wiley & Sons, ed., Wiley Interscience Publ.
- MACEDO, F. E. & VALENTIN, J. 1974. O plâncton na ressurgência de Cabo Frio (Brasil). III - Primeiras observações sobre o microfitoplâncton. - *Publ. Inst. Pesq. Marinha, Rio de Janeiro*, 084: 1-10.

- MACEDO, F. E.; TENENBAUM, D. R. & VALENTIN, J. 1975. O plâncton na resurgência de Cabo Frio (Brasil). VI – Composição florística e suas variações de comportamento nas águas da estação fixa oceânica. – Publ. Inst. Pesq. Marinha, Rio de Janeiro, 087: 1-9.
- MARGALEF, R. 1951. Diversidad de especies en las comunidades naturales. – Publ. Inst. Biol. Apl., Barcelona, 9: 15-27.
- \_\_\_\_\_. 1958. Temporal succession and spatial heterogeneity in phytoplankton. In: *Perspectives in marine biology*, pp. 323-349, Ed. by A. A. Buzzati-Traverso, California, University Press.
- \_\_\_\_\_. 1963. Algunas regularidades en la distribución a escala pequeña y media de las poblaciones marinas de fitoplancton y en sus características funcionales. – Inv. Pesq., Barcelona, 23: 169-230.
- MENDIOLA, B. R. de. 1981. Seasonal phytoplankton distribution along the Peruvian Coast. In: *Coastal Upwelling*, p.348-356, Coastal and Estuarine Sciences 1, F. A. Richards (Edit.), publ. by Amer. Geophys. Union, Washington.
- PIELOU, E. C. 1966. The measure of diversity in different types of biological collections. – J. theor. Biol., 13: 133-144.
- RIVERA, P. R. 1973. Diatomáceas epífitas en *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss recolectada en la costa chilena. – Gayana, Bot. 25: 1-115.
- TRAVERS, M. 1971. Diversité du microplancton du Golfe de Marseille en 1964. – Mar. Biol., 8(4): 308-343.
- \_\_\_\_\_. 1972. Le microplancton du Golfe de Marseille. Méthodes d'étude microscopique des organismes. – Téthys, 4(3): 535-558.
- UTERMÖHL, H. 1958. Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplanktonmethodik. – Mitt. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol., 9: 1-38.
- VALENTIN, J. L. 1984. Analyse des paramètres hydrologiques dans la remontée de Cabo Frio (Brésil). – Mar. Biol., 82: 259-276.
- VALENTIN, J. L.; SILVA, N. M. L. da & BASTOS, C. T. B. 1985. Les diatomées dans l'upwelling de Cabo Frio (Brésil): liste d'espèces et étude écologique. – J. Plank. Res., 7(3): 313-337.
- VALENTIN, J. L.; LINS DA SILVA, N. M.; MONTEIRO-RIBAS, W. M.; MUREB, M. A.; BASTOS, C. T. B. T.; TENENBAUM, D. R.; ANDRÉ, D. L.; JACOB, S. A. & PESSOTTI, E. 1986. Le plancton dans l'upwelling de Cabo Frio (Brésil): microrépartition spatio-temporelle à une station fixe. – Ann. Inst. Océanogr., Paris, 62(1): 117-135.
- VALIELA, I. 1984. The structure of marine communities over time: colonization and succession. In: *Marine Ecological Processes*, p. 414-443, Springer advanced texts in life sciences, D. E. Reichle (Edit.), Springer-Verlag, New-York Inc.

- WASHINGTON, H. G. Diversity, biotic and similarity indices. A review with special relevance to aquatic systems. – *Water Res.* 18(6): 653-694.
- WILHM, J. L. 1967. Comparison of some diversity indices applied to populations of benthic macroinvertebrates in a stream receiving organic wastes. – *J. Wat. Pollut. Control Fed.* 39: 1673-1683.