



Universidade do Algarve

**Faculdade de Ciências do
Mar e do Ambiente**

**Processos ecológicos que controlam a dinâmica
das macroalgas Ulvales (Chlorophyta)
na Ria Formosa**

*Dissertação apresentada à
Universidade do Algarve para
obtenção do grau de Doutor
em Ecologia, especialidade de
Ecologia de Comunidades*

Jaime Miguel Costa Aníbal

Faro, 2004

Blowing from the west,
Fallen leaves gather
In the east.

Nishi fukeba
higashi ni tamaru
ochiba kana

Buson

西吹ば
ひがしにたまる
落葉哉

蕪村

A Francisca e Martin

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível mediante o apoio e colaboração de diversas pessoas e entidades, merecedoras por isso do meu profundo reconhecimento. Em especial, pela importância relevante na execução deste trabalho, devo salientar:

A Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio financeiro à realização deste estudo através da concessão de uma Bolsa de Doutoramento - PRAXIS XXI/BD/15702/98.

O Programa "PRAXIS", pelo financiamento deste estudo através do Projecto "Impacte da variação das características físico-químicas do sedimento na ecofisiologia de *Ruditapes decussatus* na Ria Formosa (EcoRudi) - PRAXIS/C/BIA/14220/1998".

A Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente da Universidade do Algarve, que aceitou e acolheu o meu projecto de doutoramento.

A todos os meus colegas e amigos da Escola Superior de Tecnologia, que sempre me apoiaram na realização desta tese.

A Direcção Regional de Agricultura do Algarve, em especial o Eng. Paulo Oliveira, pela cedência dos imprescindíveis dados climáticos.

O Prof. Martin Sprung, pela disponibilidade de tempo e conhecimentos, bem como pela forma amigável e empenhada com que sempre me apoiou e incentivou, contribuindo assim, determinantemente para o resultado final do trabalho.

O Prof. Carlos Rocha, pela amizade, pela orientação científica, pelo debate frutífero de ideias e pela sua permanente disponibilidade e incentivo.

A Prof^a Jacinta Fernandes, pela redescoberta de uma amizade um pouco esquecida, e por todos os conselhos que levaram a bom porto, essa abstração matemática a que geralmente se chama de modelo.

A Dr^a Irene Martins, pelas importantíssimas opiniões sobre a abordagem prática da modelação ecológica.

A Dr^a Susana Morais, pela inestimável ajuda nas saídas de campo e no processamento de amostras, e por ter estado a meu lado, nos bons e nos maus momentos.

A Dr^a Rita Domingues e Dr^a Susana Vidal, pela inestimável ajuda na compreensão e implementação das análises de nutrientes.

A Dr^a Silvia Condinho, pela ajuda na identificação do microfítobentos e bibliografia disponibilizada.

O Prof. Luis Fonseca pela cuidada revisão deste documento e pelas sugestões no tratamento estatístico dos resultados.

O Dr. Eduardo Esteves, pela grande amizade, pelas inúmeras explicações de estatística e longas conversas filosóficas.

A Vera Francisco, pela paciência, pelo carinho, por existir e estar a meu lado...

E por fim, mas não em último, gostava de salientar os meus pais, Fernanda e Jaime, pelo apoio inestimável, amor e carinho que sempre me deram.

RESUMO

Desde 1988, que em todos os Invernos foram observados mantos exuberantes de macroalgas Ulvales (*Ulva* spp. e *Enteromorpha* spp.), numa área de estudo na zona intertidal Oeste da Ria Formosa (sistema lagunar costeiro no Sul de Portugal). Esta proliferação macroalgal (“bloom”) surge a seguir às primeiras chuvas de Outono, e as suas elevadas biomassas perduram durante todo o Inverno, começando a diminuir na Primavera, acabando as macroalgas por desaparecer quase totalmente no Verão. Dada a relação entre os “blooms” de macroalgas e a progressiva eutrofização dos sistemas lagunares, o principal objectivo deste trabalho foi determinar quais são os processos ecológicos responsáveis pelo controlo da dinâmica das macroalgas Ulvales na Ria Formosa.

De Janeiro de 1999 a Dezembro de 2001, recolheram-se amostras mensais de macroalgas em três estações representativas dos vários habitats de Ulvales na Ria Formosa. Os taxa presentes nas amostras foram identificados, e a sua biomassa determinada. Paralelamente, entre Outubro de 2000 e Setembro de 2001, foram recolhidas amostras mensais de sedimentos, onde foram determinados os seus valores de porosidade e os teores de matéria orgânica, nutrientes (amónia, nitratos e fosfatos), e clorofila *a* (correspondente ao microfitobentos). A esta informação foram adicionados dados sobre a variação dos factores climáticos (temperatura do ar, precipitação, radiação solar e humidade relativa).

Este estudo confirmou a ocorrência cíclica de um “bloom” anual de macroalgas Ulvales (Chlorophyta) na Ria Formosa, que ocorre no princípio do Outono e é dominado por macroalgas do género *Enteromorpha*. A dinâmica do fenómeno parece ser controlada por dois momentos chave: o do início do “bloom” de Ulvales, e o momento em que a biomassa diminui drasticamente e/ou desaparece. O início do “bloom” parece dever-se a uma conjugação de vários factores abióticos: temperatura; fotoperíodo; precipitação e concentração de nutrientes. Durante o período mais produtivo, entre Outubro e Maio, as dinâmicas de Ulvales e microfitobentos apontaram para a existência de uma competição pelas reservas nutricionais do sistema, tendo o fósforo desempenhado o papel do elemento limitante. A partir do mês de Maio, o sistema parece ser controlado por factores climáticos. O aumento da temperatura, da radiação solar e do fotoperíodo juntamente com a diminuição da humidade relativa do ar, cria condições para a ocorrência de fotoinibição e dessecação, o que origina o declínio das várias algas presentes no sistema. A nível do sedimento, a matéria orgânica resultante do decaimento de Ulvales ocorrido durante a Primavera e Verão, é remineralizada, dando origem aos nutrientes, em parte responsáveis pelo “bloom” de macroalgas seguinte.

A informação adquirida foi utilizada na elaboração de um modelo matemático dinâmico e determinístico, que visou descrever a dinâmica das referidas macroalgas. O modelo mostrou uma calibração adequada à descrição da dinâmica de Ulvales, na maior parte do ambiente sedimentar intertidal da área de estudo. Partindo do pressuposto da existência de competição entre o microfitobentos e Ulvales por nutrientes, o modelo permitiu confirmar que toda a dinâmica do sistema é condicionada por três variáveis externas: temperatura, luminosidade e disponibilidade de fósforo.

ABSTRACT

Macroalgae blooms of Ulvales (*Ulva* spp. e *Enteromorpha* spp.) have been observed during winter, every year since 1988, on the Western intertidal region of the Ria Formosa (coastal lagoon system in the South of Portugal). The blooms appear after the first rain falls in autumn, their high biomass last all winter, begins to decrease in spring, and vanishes during summer.

Given the relationship between macroalgae blooms and the eutrophication of coastal lagoons, the objective of this work was to identify the ecological processes responsible for the control of macroalgae Ulvales dynamics in Ria Formosa.

From January 1999 to December 2001, monthly samples of macroalgae were taken from three stations. The stations were selected as representatives of distinct Ulvales habitats. Macroalgae *taxa* present in the samples were identified and their biomass determined. In the same stations, from October 2000 to September 2001, monthly samples of sediment were taken and its porosity, organic matter content, nutrient (ammonia, nitrate and phosphate) and chlorophyll *a* (corresponding to microphytobenthos) concentrations were determined. Meteorological variables (air temperature and humidity, precipitation and solar radiation) data was added to the previous information.

This study confirmed the cyclic character of Ulvales annual blooms in the Ria Formosa, which occur in the beginning of autumn and are dominated by macroalgae from the genus *Enteromorpha*. The dynamics of this phenomenon seems to be controlled by two key-moments; the beginning of the bloom appears to depend on a conjugation of several abiotic factors: temperature; photoperiod, precipitation and nutrient availability. During the most productive period, between October and May, Ulvales and microphytobenthos dynamics suggest they compete for the same nutrient reserves, with phosphorus assuming a limiting role. Climatic factors seem to control the system after the month of May. Increasing temperature, solar radiation and photoperiod combined with decrease of air humidity promotes desiccation and photo-inhibition, leading to the decline of the resident algae population. In the sediment, the organic matter that results from the Ulvales biomass decay during spring and summer is remineralized, originating a second productivity period, and the next macroalgae bloom.

A mathematical, dynamic and deterministic model was elaborated using the gathered information, aiming to describe the dynamics of the Ulvales population. The model showed adequate correlation to the available data, sufficient to describe the Ulvales population dynamics in the majority of the studied intertidal environment. Starting from the hypothesis of the existence of competition between microphytobenthos and Ulvales for nutrients, the model confirmed that the dynamics of the system could be described if conditioned by three external variables: temperature, luminosity and phosphorus availability.

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO.....	1
1. PRODUÇÃO PRIMÁRIA E “BLOOMS” DE MACROALGAS.....	2
2. “BLOOMS” DE MACROALGAS NA RIA FORMOSA	6
3. MODELAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS	9
4. OBJECTIVOS.....	12
II. MATERIAL E MÉTODOS	13
1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA RIA FORMOSA.....	14
1.1. Enquadramento geográfico e aspectos gerais.....	14
1.2. Caracterização geomorfológica.....	15
1.3. Condições climáticas.....	17
1.4. Marés.....	17
1.5. Parâmetros físico-químicos	17
1.6. Produtividade	18
1.7. Importância económica	19
2. DESCRIÇÃO DOS LOCAIS DE AMOSTRAGEM.....	21
2.1. Descrição da área de estudo	21
2.2. Caracterização das estações de amostragem	21
3. ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM.....	23
3.1. Considerações gerais	23
3.2. Trabalho de campo	25
3.2.1. Macroalgas	25
3.2.2. Microfitobentos.....	26
3.2.3. Fitopigmentos, humidade e matéria orgânica	26
3.2.4. Nutrientes.....	28
3.3. Trabalho de laboratório	28
3.3.1. Macroalgas.....	28
3.3.2. Microfitobentos.....	28
3.3.3. Fitopigmentos, humidade e matéria orgânica	28
3.3.4. Nutrientes.....	29
3.4. Aquisição de dados climáticos	31
4. PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS.....	32
4.1. Macroalgas	32
4.2. Microfitobentos	33
4.3. Clorofila a e feopigmentos	33
4.4. Humidade, porosidade e matéria orgânica	33
4.5. Nutrientes	34
4.5.1. Fosfatos	34
4.5.2. Nitratos.....	34
4.5.3. Amónia.....	35
5. ANÁLISE DE DADOS	36
5.1. Considerações gerais	36
5.2. Relações entre macroalgas, microfitobentos e nutrientes	36
5.3. Elaboração do modelo descritivo da dinâmica das macroalgas	37

III. RELAÇÕES ENTRE MACROALGAS, MICROFITOBENTOS, NUTRIENTES E FACTORES CLIMÁTICOS	39
1. RESULTADOS	40
1.1. Considerações gerais	40
1.2. Dados climáticos	46
1.3. Estação I	50
1.3.1. Sedimento	50
1.3.2. Nutrientes	53
1.3.3. Microfitobentos	59
1.3.4. Ulvales	62
1.3.5. Análise estatística	64
1.4. Estação II	66
1.4.1. Sedimento	66
1.4.2. Nutrientes	69
1.4.3. Microfitobentos	75
1.4.4. Ulvales	78
1.4.5. Análise estatística	80
1.5. Estação III	82
1.5.1. Sedimento	82
1.5.2. Nutrientes	85
1.5.3. Microfitobentos	91
1.5.4. Ulvales	94
1.5.5. Análise estatística	96
2. DISCUSSÃO	98
2.1. Considerações gerais	98
2.2. Estação I	101
2.3. Estação II	106
2.4. Estação III	107
3. CONCLUSÕES	110
IV. MODELO DESCRITIVO DA DINÂMICA DE ULVALES NA ZONA INTERTIDAL DA RIA FORMOSA	113
1. ELABORAÇÃO E APLICAÇÃO DO MODELO	114
1.1. Procedimento geral	114
1.2. Definição do “problema” e do objectivo do modelo	116
1.3. Descrição do modelo	116
1.4. Verificação e análise de sensibilidade	125
1.5. Calibração	127
2. CONCLUSÕES	132
V. CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

ANEXOS

I. INTRODUÇÃO

1. PRODUÇÃO PRIMÁRIA E “BLOOMS” DE MACROALGAS

As zonas costeiras estão entre os ecossistemas mais produtivos do mundo. Na base desta elevada produtividade estão as algas unicelulares, as macroalgas e as plantas vasculares (Valiela, 1995; Knox, 2001).

A taxa de fotossíntese, medida como quantidade de carbono fixada pelas plantas, é designada por produção primária. Essa produção é a maior fonte de matéria orgânica na teia alimentar marinha, sendo o seu estudo essencial para a elaboração de balanços de massa em sistemas aquáticos (Knoppers, 1994). Tais balanços são muito actuais devido ao debate sobre o papel da fixação oceânica do carbono, como um sorvedouro para o teor crescente de dióxido de carbono na atmosfera (Platt *et al.*, 1989). A produção primária pode ser também utilizada para prever, até certo ponto, as capturas das pescarias costeiras, estuarinas e lagunares, bem como, avaliar o estado trófico de um sistema, ou o seu grau de eutrofização (Nixon, 1982).

Os ecossistemas estuarinos e lagunares são particularmente expostos à poluição, nomeadamente aos resíduos industriais (*e.g.* hidrocarbonetos, agentes tensioactivos, metais pesados), agrícolas (*e.g.* nitratos) e domésticos (*e.g.* fosfatos, amónia) resultantes da elevada taxa de ocupação populacional nas zonas adjacentes a esses sistemas. Tais perturbações químicas têm vindo a alterar profundamente os processos naturais dos biótopos (Clark, 1992). O aumento do fornecimento de nutrientes tem favorecido a proliferação anormal de exuberâncias (“blooms”) de macroalgas efémeras, nomeadamente espécies de algas verdes dos géneros *Ulva* e *Enteromorpha* e de algas vermelhas do género *Gracilaria* (Morand & Briand, 1996). Estas algas, como espécies oportunistas com ciclos de vida curtos, podem colonizar rapidamente uma área sujeita a um impacto pontual; por outro lado, o seu ciclo de vida rápido permite-lhes desenvolver tolerância a descargas crónicas de nutrientes. O desaparecimento de outras espécies de algas residentes, juntamente com os herbívoros e predadores, devido à poluição, parece favorecer a proliferação de macroalgas mais efémeras, tais como *Ulva* e *Enteromorpha* (Valiela, 1995). A eutrofização dos sistemas estuarinos e lagunares, também estimula o crescimento desses géneros de algas (Raffaelli & Hawkins, 1996).

Ao longo dos últimos vinte anos têm surgido várias hipóteses explicatórias de causalidade para os “blooms” de macroalgas nas mais variadas regiões do planeta

(e.g. Lowthion *et al.*, 1985; Pregnall & Rudy, 1985; Raffaelli *et al.*, 1989; Rivers & Peckol, 1995; Sfriso, 1995; Taylor *et al.*, 1995; Morand & Briand, 1996; Pedersen & Borum, 1996; Riccardi & Solidoro, 1996; Viaroli *et al.*, 1996; Hansen & Kristensen, 1997; Marques *et al.*, 1997; Múrias *et al.*, 1996; Valiela *et al.*, 1997; Kamermans *et al.*, 1998; Kinney & Roman, 1998; Martins *et al.*, 2001; Sundbäck *et al.*, 2003). Mas, periodicamente surgem fenómenos que não são explicados pelas teorias actuais. O estudo desses fenómenos “invulgares” é que permite, muitas vezes, aumentar a compreensão dos sistemas marinhos costeiros, revelando hipóteses adicionais que anteriormente não pareciam importantes.

As alterações sazonais da composição, biomassa e produção das comunidades de macroalgas nas zonas costeiras, dependem de interacções entre os factores físicos, químicos e biológicos (Chapman & Underwood, 1990; Thom & Albright, 1990), os quais podem exercer dois tipos de controlo sobre o sistema. O “bottom-up control” exercido pelos factores abióticos (e.g. nutrientes, luminosidade, salinidade, temperatura e fotoperíodo) vai fixar o nível potencial de abundância que uma população pode alcançar, o qual é depois modificado por acção dos consumidores. Este último é designado por “top-down control” (Valiela, 1995).

Nas zonas temperadas, o efeito das baixas temperaturas na produção primária não parece ser grande, porque os “blooms” de Primavera ocorrem durante uma altura relativamente fria do ano (Valiela, 1995). Por outro lado, Soe-Htun *et al.* (1986) demonstraram que temperaturas superiores aos 25 °C diminuem significativamente a capacidade fotossintética das macroalgas verdes. O efeito da temperatura pode ser potenciado pela combinação com outros factores, nomeadamente a concentração de azoto e carbono na coluna de água, a competição e a predação (Rivers & Peckol, 1995). De qualquer forma, as macroalgas oportunistas, tais como *Ulva* e *Enteromorpha*, juntamente com as cianobactérias e diatomáceas, não só têm um crescimento acelerado, como também estão entre as algas mais resistentes ao “stress” fisiológico causado por temperaturas extremas, dessecação e choque osmótico (Barnes & Hughes, 1988).

Ryther e Dunstan (1971) demonstraram que nos sistemas costeiros, o azoto é o principal elemento limitante ao crescimento autotrófico. Esta descoberta tem uma grande importância prática, especialmente na gestão de zonas costeiras, uma vez que o conteúdo em azoto de um efluente pode ser intrinsecamente relacionado com o nível da produção primária (Oviatt *et al.*, 1995; Taylor *et al.*, 1995). Embora as macroalgas

assimilem preferencialmente o azoto inorgânico na forma de ião amónio, os nitratos são também utilizados, sendo depois intracelularmente reduzidos, através de uma redutase específica (Lobban & Harrison, 1994). Outros nutrientes poderão agir como limitantes secundários. Sendo a fonte de azoto não limitante, pode haver uma limitação devida ao fósforo. Esta situação nutricional em particular foi recentemente sugerida para o sistema estuarino do Mondego (Martins, 2000), onde a limitação pelo fósforo parecia influenciar a produção macroalgal. Deste modo, a adição conjunta de azoto e fósforo, em ecossistemas costeiros, resulta em taxas de crescimento muito elevadas (Fisher *et al.*, 1992 *in* Valiela, 1995). O facto da razão N/P ser comparativamente muito baixa nas zonas costeiras é, ainda hoje, motivo de discussão, embora as hipóteses mais plausíveis apontem para que a perda de azoto inorgânico no sedimento, se deva à desnitrificação, ou à libertação para a coluna de água de azoto orgânico na forma dissolvida (Nixon, 1981).

Os ciclos de produção das macroalgas dependem principalmente da disponibilidade de nutrientes e de luz. O papel dos sedimentos nos “blooms” de macroalgas é crítico, porque a acumulação das algas cria condições anaeróbicas, as quais favorecem a libertação de nutrientes (*e.g.* azoto e fósforo) por parte do sedimento (Lavery & McComb, 1991). Este mecanismo juntamente com o “consumo de luxo” de nutrientes pelas macroalgas, leva a uma rápida incorporação do azoto, assim que os nitratos ficam disponíveis na sua forma dissolvida (na coluna de água ou na água intersticial), no início do Inverno. O aumento da concentração interna de nitratos não corresponde imediatamente a um pico nas taxas de crescimento. O crescimento máximo só acontece quando a intensidade da luz aumenta, mais tarde na Primavera (Thom & Albright, 1990). Nos locais onde a intensidade luminosa é elevada todo o ano, os “blooms” de macroalgas podem iniciar-se devido à disponibilidade de pequenas concentrações de nutrientes através de fenómenos de mistura na coluna de água (*e.g.* ventos fortes durante uma tempestade) ou que alterem a interface água-sedimento (Valiela, 1995). Por todas estas razões, as macroalgas podem ser encaradas como sorvedouros periódicos de nutrientes (Everett, 1994).

Ulva e *Enteromorpha* são *taxa* característicos do primeiro estágio de sucessão de uma comunidade. Estas algas desaparecem rapidamente, sendo substituídas por serem objecto de herbivoria, ou através do seu decaimento para detritos. As plantas pioneiras parecem não investir muito esforço nas defesas químicas e morfológicas contra herbívoros, canalizando essa energia para crescer e multiplicarem-se

rapidamente. Quando as Ulvales são removidas (*e.g.* herbívoros, distúrbios, dessecação), surgem outras espécies, com ciclos de vida mais sazonais e de crescimento mais lento (Valiela, 1995).

2. “BLOOMS” DE MACROALGAS NA RIA FORMOSA

O sistema lagunar costeiro da Ria Formosa suporta biótopos altamente produtivos, tais como os sapais, tapetes de algas e bancos de fanerogâmicas marinhas, os quais são o suporte de níveis tróficos superiores, alguns explorados economicamente pelo homem (*e.g.* pesca e apanha de marisco).

O aumento da população nas zonas adjacentes à Ria Formosa nas últimas décadas, muito particularmente nas épocas de Verão em que chega mesmo a triplicar em relação ao resto do ano (Santos, 1988), implica o aumento sazonal da descarga de matéria orgânica no sistema. Uma vez entrada no sistema, a matéria orgânica de origem antropogénica junta-se à matéria orgânica residente na forma detritica, sendo ambas remineralizadas, dando origem a nutrientes biodisponíveis, que vão juntamente com os factores climáticos condicionar a produção primária do sistema (Knox, 2001).

Neste sistema foi observado desde 1988 uma sucessão muito clara de “blooms” de macroalgas (Sprung, 1994), que foi quantificada pela primeira vez por Aníbal e Sprung (1997), sendo o presente trabalho a continuação desse estudo. Este “bloom” apresentava características invulgares: os picos de biomassa das macroalgas verdes observados, exclusivamente compostos por Ulvales, ocorreram nos meses de Outono e Inverno, começaram a diminuir nos meses de Primavera e desapareceram nos meses de Verão. Este padrão é diametralmente oposto ao descrito para sistemas semelhante (*e.g.* Estuário do Mondego ou Lagoa de Venezia), na mesma zona do globo (Sfriso *et al.*, 1993; Bendoricchio *et al.*, 1994; Sfriso, 1995; Martins *et al.*, 1997; Solidoro *et al.*, 1997; Martins *et al.*, 1999; Martins *et al.*, 2001). Nestes outros sistemas, os “blooms” surgem na Primavera, são observados valores máximos de biomassa no início do Verão, e a partir daí decaem, sendo a sua biomassa muito reduzida ou inexistente durante o Inverno.

Aníbal (1998) ensaiou a hipótese de que o “bloom” era controlado pela macroepifauna através de relação de herbivoria (top-down control”), visto o pico de abundância da macroepifauna se iniciar geralmente na Primavera, crescendo para abundâncias máximas no Verão e decaindo apenas a partir dessa altura. Segundo esta hipótese, as macroalgas só cresceriam livremente nos meses em que a pressão da macroepifauna fosse mais baixa (Outono e Inverno). Contrariamente ao esperado, a conclusão do trabalho apontou noutro sentido. Por um lado, a macroepifauna não

apresentou na sua composição taxonómica *taxa* explicitamente herbívoros, sendo a sua maioria detritívoros. Por outro lado, a sua variação anual acompanhou a das macrolagas, ao contrário do que se estava à espera, o que levou a concluir que afinal a macroepifauna procurava nos mantos de Ulvales, não uma fonte de alimentação directa, mas sim protecção e uma potencial fonte de detritos. Ou seja, outras hipóteses tiveram de ser levantadas para explicar a ocorrência dos abundantes picos de biomassa no Outono e no Inverno, que se repetiam anualmente. Não sendo então a herbivoria um dos possíveis factores de controlo da dinâmica de Ulvales na Ria Formosa (“top-down control”), haveria que testar a hipótese de serem os factores abióticos, os agentes de controlo (“bottom-up control”). Os factores abióticos potencialmente relacionados com um “bloom” de macroalgas são: disponibilidade de nutrientes para as algas poderem assimilar e assim crescer rapidamente originando um “bloom” e factores climáticos favoráveis às necessidades fisiológicas das algas para estas maximizarem o seu crescimento.

No sistema lagunar costeiro da Ria Formosa, o ciclo de nutrientes, dos quais as algas se alimentam, é predominantemente controlado por processos de remineralização sedimentar (Rocha, 2000), sendo muito pequena a quantidade dos aportes de origem terrestre (Falcão, 1996). A partir destas constatações, pode-se inferir que o principal contribuinte de nutrientes para os produtores primários é o meio sedimentar (Sundbäck *et al.*, 2003). Como tal, os organismos que se encontram no sedimento ou na respectiva interface com a coluna de água estão numa posição privilegiada para intersectarem o transporte destes nutrientes. Na Ria Formosa, as zonas intertidais estão colonizadas por algas (macro e micro) e cianófitas, estando as fanerógamas marinhas (*Zosteráceas*) em zonas mais subtidais e as plantas de sapal (*i.e. Spartina*) em zonas mais supratidais (Teixeira & Alvim, 1978).

Se na zona intertidal coexistem algas de vários tipos, com fisiologias diferentes, então potencialmente há competição entre elas pelos mesmos nutrientes, que, produzidos abaixo da superfície sedimentar terão tendência em ser exportados para a coluna de água. Neste cenário, existirão algas com estratégias de sobrevivência mais vantajosas. Como exemplo, referem-se as microalgas que constituem o microfítobentos, que não só têm capacidades de assimilação muito mais rápidas do que as macroalgas (Sundbäck & Granéli, 1988), como também se encontram justamente na interface entre o fundo e a coluna de água. Ou seja, estas microalgas estão em posição privilegiada para, potencialmente, consumir grande parte dos

nutrientes do sedimento, deixando muito pouco para ser assimilado pelas macroalgas, que se encontram apenas à superfície do sedimento. Isto poderá provocar uma limitação de nutrientes disponíveis para as macroalgas sedimentares, o que obviamente iria controlar a sua dinâmica sazonal. Por outro lado, o facto de se tratarem de algas intertidais, que passam parte do dia imersas em água e outra parte expostas ao ar, faz com que os factores climáticos (temperatura, intensidade luminosa, humidade do ar) possam desempenhar um papel muito limitante ao crescimento, controlando todos os seus processos fisiológicos (Valiela *et al.*, 1997).

A dinâmica anual de Ulvales torna-as uma importante fonte de matéria orgânica para o sistema lagunar. Este material pode passar directamente para níveis tróficos superiores por herbivoria, ou então introduzir-se na cadeia detritica por enterramento. Nesse caso, a matéria orgânica proveniente do decaimento das macroalgas pode subir na cadeia trófica por detritivoria, ou passar pelo ciclo da remineralização (Kjerfve, 1994; Heip *et al.*, 1995). Aníbal e Sprung (1998) propõem este último caminho como o mais relevante, em termos ecológicos, para a Ria Formosa.

A existência de uma dinâmica “invulgar” e com taxas de renovação elevadas por parte das macroalgas Ulvales, associada à grande amplitude térmica a que o ecossistema é sujeito, torna o estudo dos processos que regem essa dinâmica, uma óptima ferramenta para melhor compreender o fluxo da matéria orgânica em sistemas estuarino-lagunares.

3. MODELAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS

Os modelos matemáticos têm sido tradicionalmente utilizados como método de investigação em vários ramos da ciência, especialmente na química e na física, com o objectivo de sintetizar o conhecimento existente ou de investigar fenómenos que ocorrem num dado sistema e para cálculo quantitativo e preditivo (Niemi, 1986). Nos anos recentes, a análise de sistemas estimulou o desenvolvimento de modelos matemáticos em limnologia e ciências afins, devido ao crescente interesse por abordagens ecológicas mais quantitativas, e à necessidade urgente de uma gestão ambiental adequada (Fernandes, 1999), incluindo a capacidade preditiva da evolução de cada ecossistema face a alterações projectadas. Tal desenvolvimento deveu-se em grande parte ao acesso a computadores cada vez mais rápidos e a preços mais reduzidos, e ao desenvolvimento de linguagens de programação mais acessíveis.

Segundo Jørgensen (1994 e 1995) e Jørgensen e Bendoricchio (2001), a história da modelação ecológica pode ser dividida em cinco gerações de modelos. Os modelos pioneiros desenvolvidos nos anos 20 simulavam o balanço de oxigénio em rios (modelo de Streeter-Phelps), e as relações entre predadores e presas (modelo de Lotka-Volterra). A segunda geração de modelos surge nas décadas de 50 e 60, focando a dinâmica de populações, e simulação de processos mais complexos em rios. Nos anos 70, iniciou-se a utilização generalizada de modelos ecológicos em gestão ambiental, tendo surgido os primeiros modelos de eutrofização, especialmente aplicados a rios. Os modelos deste tipo podem ser designados de terceira geração. Até um certo ponto, foi a revolução na tecnologia computacional que permitiu o aparecimento desta geração de modelos. De qualquer forma, tornou-se claro por volta de meados dos anos 70, que as limitações do potencial da modelação, como instrumento de conhecimento e gestão ambiental, não eram os computadores, nem a matemática, mas a reduzida disponibilidade de dados experimentais e o conhecimento incipiente sobre os ecossistemas e seus processos ecológicos. Paralelamente a esta tomada de consciência, os ecólogos começaram a abordar os problemas ecológicos numa forma mais quantitativa, possivelmente devido à necessidade de formular regras de gestão ambiental. Os modelos do período decorrente entre meados dos anos 70 e meados de 80, podem ser designados por modelos de quarta geração. Estes são

caracterizados por estarem alicerçados em relativamente bons conhecimentos ecológicos, o que permitiu a validação do prognóstico de alguns deles. Contudo, começou a tornar-se evidente a rigidez da estrutura dos modelos, relativamente à flexibilidade característica dos ecossistemas. Esta constatação levantou alguma crítica relativamente à capacidade preditiva, à validação e à pertinência dos modelos ecológicos em geral. Na última década do século XX, uma nova geração de modelos começou a tomar forma. A exploração de conceitos termodinâmicos aplicados às mudanças estruturais dos ecossistemas, as técnicas orientadas para os objectos, os autómatos celulares, as redes neuronais artificiais e as abordagens espaciais, são algumas das tónicas principais deste mais recente período da modelação ecológica.

Actualmente, a facilidade informática com que se podem criar modelos matemáticos, faz com que a sua aplicação aos diversos ecossistemas seja uma prática comum, a qual está muito enraizada no estudo das zonas costeiras. Nestas zonas, o tipo de modelos produzidos para simular os processos estudados são geralmente dinâmicos e determinísticos. Este tipo de modelação tem a vantagem de simular a variação temporal dos processos estudados, sendo esta variação baseada no pressuposto que a resposta futura do sistema é determinada pelo conhecimento do seu estado presente e das suas futuras entradas (Gillman & Hails, 1997). Os modelos dinâmicos determinísticos são baseados em vastas bases de dados, constituídas essencialmente por séries temporais, e requerem um conhecimento detalhado do caso de estudo. Simulam as tendências e sazonalidades do sistema, controladas por múltiplos factores limitantes, e calculam os valores diários da biomassa de diferentes grupos funcionais (Recknagel *et al.*, 1997). Expressões matemáticas descrevem os processos ou interacções entre as variáveis e a cinética dos nutrientes e a dinâmica de populações, em maior ou menor detalhe (Ahlgren *et al.*, 1988; Niemi, 1986).

De uma forma intuitiva, a modelação dinâmica pode ser entendida como a tentativa de se fazer um filme a partir de vários fotogramas. Quando se recolhem amostras, os resultados obtidos após processamento constituem imagens pontuais do que estava a ocorrer no sistema aquando do momento da amostragem. A tentativa de modelar os valores obtidos a partir dessas amostras, mais não é do que tentar inferir o que aconteceu entre amostragens. Ou seja, é criar uma série de valores simulados que traduzam aquilo que se crê estar a acontecer no sistema, a uma escala temporal mais pequena do aquela usada na amostragem (HPS, 1997).

A elaboração de um modelo pode ter geralmente dois objectivos: obter um modelo descritivo; ou obter um modelo preditivo. Um modelo descritivo pretende apenas comprovar que os valores das variáveis amostradas podem ser relacionados de uma forma causal e matemática, e que as relações matemáticas estabelecidas podem originar valores simulados, semelhantes aos amostrados. Um modelo preditivo tem por objectivo, além de descrever correctamente o sistema, produzir resultados que possam descrever as condições futuras de um sistema, baseando a sua simulação em informação actual (Jørgensen & Bendoricchio, 2001).

Em resumo, os modelos dinâmicos atingiram um estado de desenvolvimento em que podem ser considerados como ferramentas bem sucedidas para a descrição e compreensão dos sistemas, bem como para a previsão e avaliação de diferentes estratégias de gestão em zonas costeiras e de água doce (Hannon & Ruth, 1994; Ford, 1999).

4. OBJECTIVOS

Com base no que foi anteriormente exposto, o objectivo geral deste trabalho, realizado zona intertidal Oeste da Ria Formosa, foi responder à questão de quais são os processos ecológicos responsáveis pelo controlo da dinâmica das macroalgas Ulvales, nomeadamente testar a hipótese do controlo exercido pelos factores abióticos (“bottom-up control”). Para tal pretendeu-se: 1) estudar as dinâmicas temporais e espaciais de Ulvales, microfitobentos e nutrientes; 2) relacionar essas dinâmicas entre si e com os factores climáticos e 3) elaborar um modelo dinâmico e determinístico que traduza as relações existentes e permita descrever a dinâmica anual das macroalgas.

II. MATERIAL E MÉTODOS

1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA RIA FORMOSA

1.1. Enquadramento geográfico e aspectos gerais

O sistema lagunar, conhecido vulgarmente por Ria Formosa, desenvolve-se na costa meridional Portuguesa, entre as coordenadas 36° 58' a 37° 03' de latitude Norte e de 7° 32' a 8° 02' de longitude Oeste, desde o Ancão a ocidente até Cacela a oriente (Figura 2.1). Com extensão, de aproximadamente 55 km, apresenta a sua maior largura, de 6 km, no sector Norte-Sul entre Faro e o Cabo de Santa Maria. Este sistema é constituído por um conjunto de ilhas-barreira que protege a zona lagunar, adjacente à plataforma litoral algarvia, da invasão marinha. Os canais da zona lagunar, de profundidade média de 3 m (Mudge & Bebianno, 1997), estão conectados com o Oceano Atlântico através de seis barras, das quais a barra artificial de Faro-Olhão, atinge uma profundidade máxima de 25 m.

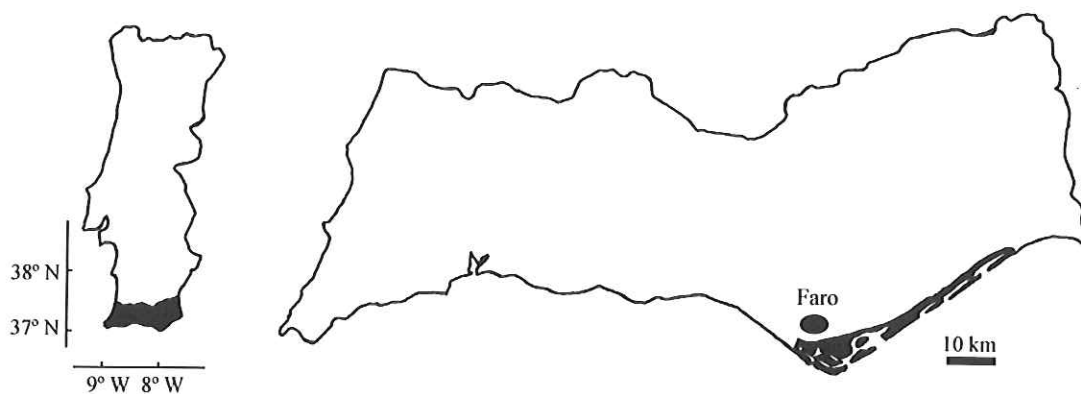


Figura 2.1: Enquadramento geográfico da Ria Formosa.

A área total da Ria Formosa é aproximadamente de 163 km², sendo 48 km² cobertos por sapal e 32 km² ocupados por canais, esteiros e baixios (Teixeira & Alvim, 1978). Durante as marés vivas, as áreas intertidais expostas são de aproximadamente 50 km² (Fidalgo, não publicado, *in* Machás & Santos, 1999). Estas áreas são predominantemente cobertas por *Spartina maritima*; angiospérmicas marinhas, *Zostera* e *Cymodocea* e mantos de macroalgas. De todo o sistema lagunar, 20 km² são ocupados por salinas e aquaculturas (CCRA, 1984).

De um modo geral, considera-se que a Ria Formosa se divide em três zonas principais, vulgarmente designadas por Ria de Cacela, Ria de Tavira e Ria de Faro-Olhão. A Ria é uma zona protegida, incluída no Parque Natural da Ria Formosa, criado pelo Dec. Lei nº 373/87 de 9 de Dezembro, sendo conjuntamente com a Ria de Aveiro e os estuários dos rios Tejo, Sado e Guadiana, uma das zonas húmidas mais importantes de Portugal.

1.2. Caracterização geomorfológica

Os sistemas lagunares separados do oceano por ilhas barreira constituem ambientes muito complexos e diversificados, quer em termos geomorfológicos, quer em termos da sua origem e evolução (Andrade, 1985). As trocas de água através das várias barras entre a laguna e o oceano, associadas ao movimento oscilatório das marés, são determinantes para a evolução deste sistema (Neves, 1992).

A origem e formação da Ria Formosa é um assunto controverso, sobre o qual já foram elaboradas várias teorias (Neves, 1974; Oliveira, 1984; Granja, 1984; Monteiro, 1984; Granja *et al.*, 1984; Pilkey *et al.*, 1989), sendo a mais recente a descrita por Bettencourt (1994). Segundo este autor, a génese das ilhas-barreira ocorreu à 18000 anos. O material erodido transportado pelos rios existentes nessa época, formou barras submersas numa faixa litoral correspondente à actual base da plataforma continental (a cerca de 30-40 metros de profundidade). A desaceleração da transgressão Holocénica (cerca de 4000 a 6000 anos B.P. ("Before Present")), permitiu uma progressiva concentração destas areias que passaram a constituir barras submersas, as quais evoluíram, quer no sentido vertical (acrecção), quer transversal (migração para o continente). A posição actual das ilhas-barreira ficou a dever-se à migração, na direcção da costa, das barras submersas aquando da subida do nível do mar (Figura 2.2). A presente forma triangular invertida da Ria Formosa pode dever-se aos diferentes pendores da plataforma continental algarvia, os quais são mais elevados junto ao cabo de Santa Maria, o que atrasou a migração das ilhas-barreira nesta zona (Bettencourt, 1988).

O facto das ilhas barreira serem arenosas e por conseguinte apresentarem um dinamismo elevado, constitui uma dificuldade para o estudo e previsão da evolução da Ria, o qual deve ter em conta o transporte longilitoral de sedimentos por acção das ondas (Neves, 1992).

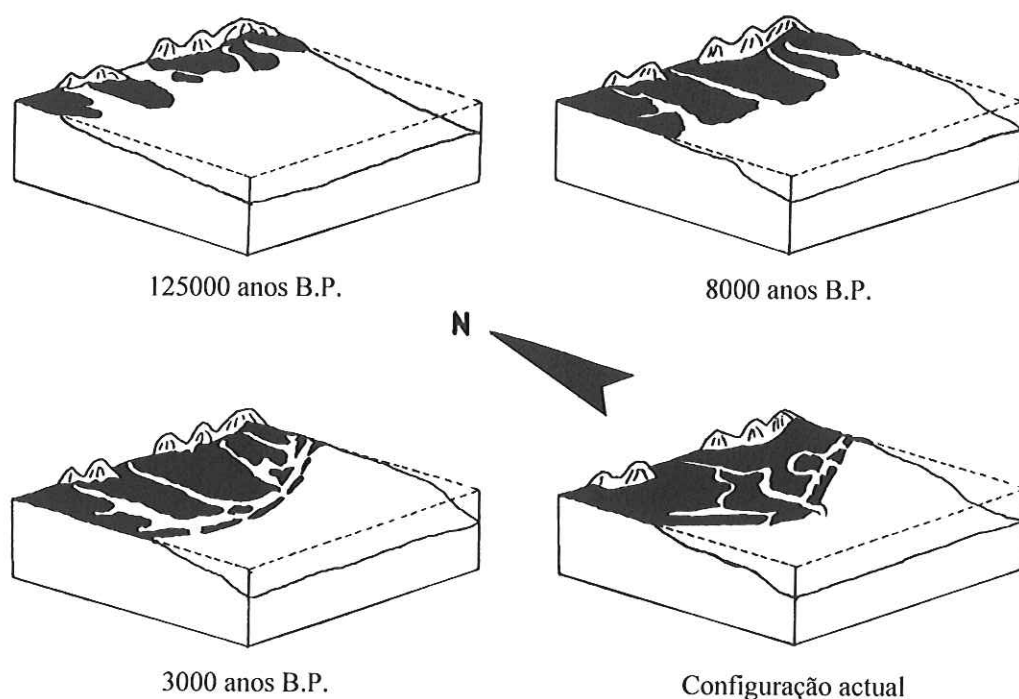


Figura 2.2: Origem e formação da Ria Formosa (adaptado de Bettencourt, 1994).

Actualmente, pelas suas características geomorfológicas, a Ria Formosa integra-se na série quase contínua de zonas húmidas que ocorrem para Oeste do Golfo de Cadiz, da qual será a mais ocidental (Batty, 1991; Gamito, 1994).

De um modo geral, os sedimentos da Ria Formosa são uma mistura de areia e vasa, formando uma gradação desde as barras, onde são mais arenosos, até às zonas mais interiores, onde são mais vasosos (Granja, 1984; Monteiro, 1989). Os sedimentos dos sapais são vasas arenosas, com teores reduzidos de cascalho, sendo essencialmente uma mistura de silte e argila, em proporção quase constante e de ordem de 2:1, com componente arenosa sempre inferior a 10% (Andrade, 1990). Em relação aos rasos de maré, verifica-se que os sedimentos são essencialmente areias vasosas ou vasas arenosas, sendo raras as amostras que correspondem a areias ou vasas puras. O teor de matéria orgânica é baixo, inferior a 10% da amostra total, sendo os valores mais elevados correspondentes aos locais que contêm restos de algas em decomposição (Andrade, 1990). O sedimento do fundo dos canais é dominado por areia, e compreende uma fracção fina (intersticial) em proporção muito variada (Andrade, 1990).

1.3. Condições climáticas

O clima no Algarve é de tipo mediterrânico, com Verões quentes e secos e Invernos amenos, com alguma precipitação durante os meses mais frios.

Na zona da costa onde se localiza a Ria Formosa, o clima caracteriza-se por uma precipitação reduzida (400 a 600 mm.a⁻¹), temperaturas amenas, com uma média anual de 17 °C e por uma radiação solar elevada, com 3000 a 3200 horas anuais de Sol (Cunha, 1983). Nos meses de Inverno, a amplitude térmica diária pode variar entre 6 a 9 °C, enquanto que durante o Verão pode ser de 8 a 15 °C. No período entre 1986 e 1997, as temperaturas médias anuais oscilaram entre os 10 °C para a temperatura mínima, e os 25 °C para a temperatura máxima (DRAALG, 1998).

O vento dominante é do sector Oeste, seguindo-se a direcção Sudoeste. No entanto, normalmente durante a Primavera e o Outono, aumenta a ocorrência dos ventos de Leste e Sudeste (Granja *et al.*, 1984; Pires, 1998).

1.4. Marés

O regime de marés dominante na costa algarvia é do tipo semi-diurno (dois ciclos de maré por dia). A amplitude das marés vivas varia entre 0,6 e 2,8 m (Neves *et al.*, 1996), o que permite situar este segmento litoral no domínio mesotidal elevado, caracterizado por um regime de energia mista, dominado pela maré. O limite inferior do escalão macrotidal é ultrapassado em marés vivas (Andrade, 1990)

A área total coberta pela água em marés vivas varia entre 14,1 km² (baixa-mar) e 63,1 km² (preia-mar). O volume de água trocado com o mar varia entre 20 a 116x10⁶ m³, consoante a amplitude da maré (CEPASA, 1980), o que provoca uma acentuada renovação da massa de água, com percentagens da ordem dos 50 a 75%. Dados mais recentes apontam para uma variação do tempo de residência da água dentro da laguna entre 12 a 48 horas (Neves *et al.*, 1996). Nos canais interiores a velocidade da corrente é inferior a 1 m.s⁻¹, enquanto nas barras pode exceder 2 m.s⁻¹ (Lima & Vale, 1980).

1.5. Parâmetros físico-químicos

A Ria Formosa não possui nenhum rio importante seu tributário. As entradas de água doce são pouco numerosas e frequentemente intermitentes, apenas ocorrendo em períodos de precipitação, pelo que a sua influência apenas se verifica durante um número reduzido de dias (Pera, 1986). Este facto é confirmado pelos valores de

salinidade que se mantêm praticamente constantes ao longo do ano, variando entre 35,5 e 36,9 PSU, excepto durante os períodos esporádicos de precipitação intensa, em que a salinidade à superfície pode ser menor (Falcão *et al.*, 1985).

A temperatura da água junto da costa varia entre 19,5 e 21 °C (valores mensais médios), de Junho a Outubro, e entre 14 a 17 °C nos outros meses. Dentro da Ria, a temperatura da água pode mesmo ultrapassar os 27 °C, principalmente em locais pouco profundos e nos meses de Verão (Lima & Vale, 1980; Asmus *et al.*, 2000).

Devido à pouca profundidade dos seus canais, à turbulência provocada na coluna de água pelo vento e às fortes correntes provocadas pelas marés, associados ao reduzido tempo de residência da água, pode-se definir a Ria Formosa como sendo um sistema não estratificado (Assis *et al.*, 1984). Os níveis de concentração de oxigénio estão frequentemente próximos da saturação (Lima & Vale, 1980; Brotas *et al.*, 1990), facto que se fica a dever ao elevado prisma de maré e à elevada taxa de fotossíntese bentónica (Asmus *et al.*, 2000). No entanto, podem ocorrer situações de anóxia, devido à actividade bacteriana desenvolvida na decomposição da matéria orgânica lançada pelos efluentes urbanos (Nunes, 1984). Situações de anóxia podem também ocorrer em zonas cobertas por tapetes de macroalgas durante a noite, devido à sua elevada taxa de respiração (Lobban & Harrison, 1994).

No período que decorreu entre 1985 e 1990 foram observadas, na coluna de água, as seguintes concentrações médias de nutrientes: 0,77 $\mu\text{mol/L}$ para o ião fosfato (PO_4^{3-}); 0,31 $\mu\text{mol/L}$ para os nitratos ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) e as concentrações para o ião amónio (NH_4^+) são cinquenta vezes maiores do que para os nitratos (Falcão *et al.*, 1985; Bröckel, 1990). Na coluna de água, observaram-se concentrações médias de matéria orgânica particulada de 3,7 mg/L e de 1,3 mg/L de carbono orgânico particulado (Falcão, 1988).

1.6. Produtividade

O elevado nível de troca de nutrientes entre a coluna de água e o sedimento, aliado às condições de luminosidade favoráveis, propiciam ciclos de produção e remineralização rápidos. Por outro lado, em sistemas pouco profundos como a Ria Formosa, devido ao reduzido volume de água comparativamente à área de fundo, as trocas de nutrientes entre o sedimento e o plâncton podem ser intensas (Falcão & Vale, 1990). Deste modo, a elevada produtividade deste sistema baseia-se em dois

importantes processos de troca de nutrientes e matéria orgânica: entre a coluna de água e o sedimento e entre o interior do sistema e a zona marinha adjacente (Falcão & Vale, 1990). Por outro lado, como foi evidenciado por Monteiro (1989), a Ria Formosa contribui de forma importante para a produtividade da ictiofauna, da área costeira adjacente.

No que se refere às trocas entre o interior do sistema e a zona marinha adjacente, são de salientar as trocas de oxigénio e nutrientes. Concretamente a importação de oxigénio dissolvido pela Ria Formosa e a exportação de nutrientes inorgânicos para o oceano (Bröckel, 1990).

Na Ria Formosa, a produção primária parece ser dominada por macrófitas bentónicas (*Spartina* sp., fanerogâmicas marinhas e algas), restringindo-se a contribuição planctónica importante apenas aos meses de Verão e junto às barras (Sprung, 1994). Em relação à produção secundária, os valores mais elevados da razão P/B (produção/biomassa média) observados na Ria Formosa, indicam, segundo Sprung (1994) que a biomassa macrobentónica, de um modo geral, é inferior à observada em ecossistemas semelhantes. Esta situação poderá resultar, segundo este autor, da menor duração da vida dos principais animais bentónicos (*e.g.* a longevidade de *Cardium edule* é 2 anos na Ria Formosa e 5 anos no Mar de Wadden), bem como das taxas elevadas de predação que mantêm a fauna num estado jovem da sucessão.

1.7. Importância económica

As condições ambientais anteriormente descritas, fazem deste sistema uma área privilegiada para a exploração económica de sistemas de aquaculturas (pisciculturas e viveiros de bivalves). Nestes sistemas, a principal produção é de amêijoas boas, *Ruditapes decussatus*, que representa 92 % do total da produção da aquacultura da região. A dourada, *Sparus aurata*, e a ostra, *Crassostrea angulata*, constituem respectivamente, 4,7 % e 3,2 % da mesma produção (Morais & Carvalho, 1992). A nível nacional, por reunir as condições mais propícias para a reprodução e desenvolvimento da amêijoas boas, a Ria Formosa constitui o mais importante centro de exploração desta espécie de elevado valor comercial (Vilela, 1950; Morais & Carvalho, 1992). A produção realizada na Ria Formosa constitui cerca de 80 % das amêijoas comercializadas em Portugal. O cultivo é realizado em viveiros, explorados por mariscadores, organizados em associações. Uma estimativa conservativa indica que existem mais de mil viveiros na Ria Formosa. Embora, presentemente a pesca

tradicional esteja em risco de desaparecer da Ria Formosa, há que salientar a sua importância sócio-económica, juntamente com cultivo de bivalves, estando envolvidas nestas duas actividades cerca de dez mil pessoas (Andrade *et al.*, 1984; Cachola, 1988).

2. DESCRIÇÃO DOS LOCAIS DE AMOSTRAGEM

2.1. Descrição da área de estudo

A área de estudo localizou-se na zona Oeste da Ria Formosa, sendo limitada a Norte pelo Aeroporto e a Sul pela Praia de Faro (Figura 2.3).

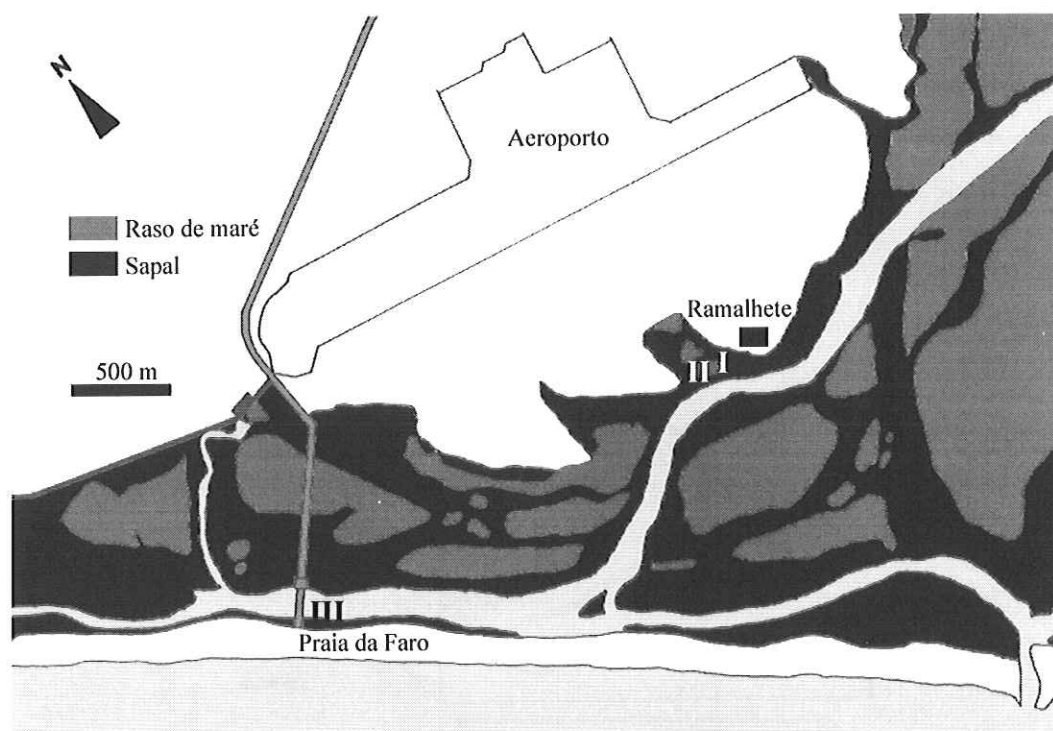


Figura 2.3: Área da Ria Formosa em que se situou o presente estudo (I, II e III assinalam as estações de amostragem).

A escolha deste local prendeu-se com o facto de, em anos anteriores, se ter observado o aparecimento recorrente de “blooms” de Ulvales nesta zona.

2.2 Caracterização das estações de amostragem

Resultados preliminares levaram à escolha de três locais de amostragem, situados nos rasos de maré, tendo em atenção os seus diferentes regimes hidrodinâmicos (Aníbal, 1998). Os rasos de maré (“tidal flats”) são fundos intertidais desprovidos de vegetação halófito, de morfologia habitualmente aplanada ou escassamente ondulada, arenosos (“sand flats”), siltoargilosos (“mud flats”) ou arenolodosos (“mixed flats”) e que geralmente estabelecem transição entre os sapais e os canais ou fundos subtidais (Andrade, 1990).

Foram escolhidos locais de amostragem, de aproximadamente 50 m² de área, em rasos de maré que continham Ulvales na altura do início da experiência (Janeiro de 1999). Dois dos locais de amostragem ficaram situados em substratos vaso-arenosos (estações I e II), e o terceiro em sedimento de areia-vasosa (estação III).

A cartografia superficial do sedimento foi baseada no trabalho de Andrade (1990), actualizada com fotografias aéreas do início de 1999 (A. Dias, comunicação pessoal), de forma a incluir a nova barra aberta em 23 Junho de 1997 (Vila-Concejo *et al.*, 2003), a Este da Praia de Faro.

As estações I e II localizaram-se na zona do Ramalhete. A estação I situou-se na zona mais alta do raso de maré (zona convexa), e a estação II na zona de depressão adjacente (zona côncava) (Figura 2.4).

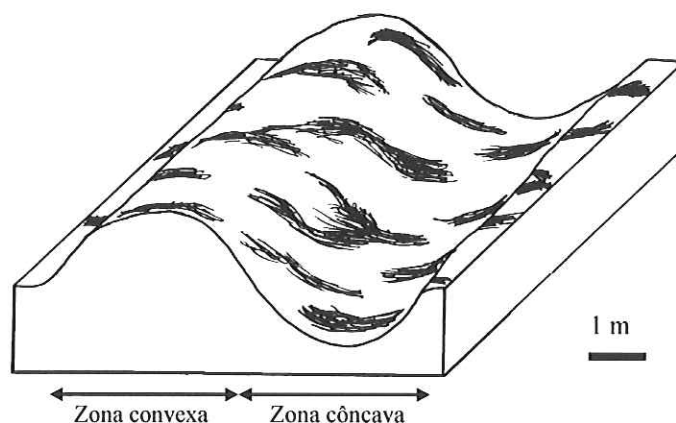


Figura 2.4: Representação esquemática das zonas côncava e convexa de um raso de maré de sedimento vaso-arenoso.

A estação III ficou situada na zona Norte do cordão dunar da Praia de Faro, a Este da ponte que dá acesso à referida praia (Figura 2.3).

3. ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM

3.1. Considerações gerais

A escolha do número e localização das estações foi baseada nos trabalhos de Aníbal (1998) e Aníbal & Sprung (1999). Nestes trabalhos foram descritos três tipos distintos de superfícies sedimentares, onde ocorrem geralmente “blooms” de Ulvales: zonas planas de areias vasosas junto aos canais principais; zonas vaso-arenosas de conformação convexa e outras de conformação côncava. O agrupamento dos vários tipos de superfície sedimentar em grandes grupos permitiu diminuir o número de estações amostradas, sem que dessa forma se perdesse informação.

Ao ter sido posta de lado a hipótese da macroepifauna controlar o “bloom” de Ulvales através de herbívoros (Aníbal & Sprung, 1998), levanta-se a questão deste poder ser controlado pela disponibilidade de nutrientes. Em consequência, três factores tiveram de ser estudados: a dinâmica de Ulvales, o microfitobentos e a disponibilidade de nutrientes.

A componente prática de campo deste trabalho esteve dividida em duas fases. A primeira fase consistiu em amostragens mensais de macroalgas verdes, desde Janeiro de 1999 até Dezembro de 2001. A segunda fase, também realizada mensalmente entre Outubro de 2000 e Setembro de 2001, visou a recolha de amostras de outros parâmetros, bióticos e abióticos, nos mesmos locais onde foram colhidas as algas. As recolhas de macroalgas verdes tiveram como objectivo confirmar, de uma forma quantitativa e plurianual, a sazonalidade da dinâmica de Ulvales, ao longo de um período mais longo do que tinha sido realizado por Aníbal (1998).

A segunda fase deste trabalho serviu para recolher material sedimentológico, necessário ao estudo da disponibilidade de nutrientes e à possível competição entre o microfitobentos e Ulvales por esses mesmos nutrientes. Nesta fase de trabalho e por razões de ordem logística, a recolha de amostras foi dividida por dois dias de amostragem. Uma das saídas serviu para recolha de material biológico: macroalgas e microfitobentos. Na outra, foram recolhidos testemunhos verticais (“cores”) de sedimento, em zonas não cobertas por macroalgas, com o objectivo de se determinarem posteriormente teores de nutrientes (amónia, nitratos e fosfatos) e fitopigmentos, bem como humidade e matéria orgânica. As amostragens, quer biológicas, quer sedimentológicas, fizeram-se sempre de manhã, sensivelmente à mesma hora solar e independentemente da amplitude da maré. As amostragens

sedimentológicas foram realizadas na vazante, a partir do momento em que a estação ficou exposta ao ar. Este procedimento foi realizado com os seguintes objectivos: 1) evitar que o sedimento perdesse demasiada água intersticial, o que dificultaria a determinação dos nutrientes dissolvidos; 2) evitar a penetração de bolhas de ar no sedimento, devido à sua desidratação, as quais iriam introduzir erros nos cálculos das concentrações dos nutrientes, e alterar o equilíbrio entre as suas fracções sorvidas e dissolvidas (Rocha, 1998); e 3) tornar comparáveis as amostras colhidas nos diferentes meses.

A amostragem do microfitobentos teve como objectivo a determinação dos principais *taxa* que constituíram este grupo. Paralelamente, a determinação dos fitopigmentos (clorofila *a* e feopigmentos) visou qualificar e quantificar a comunidade microfitobentónica coexistente com as macroalgas Ulvales.

A matéria orgânica foi determinada como um indicador potencial, quer da biomassa de algas detriticas, quer de matéria prima disponível para a remineralização bacteriana (Valiela, 1995). A determinação do conteúdo de água do sedimento (humidade) serviu para determinar a sua porosidade. Este parâmetro é essencial para o cálculo das concentrações dos nutrientes no sedimento inteiro, o qual é constituído pela fracção particulada mais a água intersticial (Domenico & Schwartz, 1990).

Sistemas como a Ria Formosa exportam, em geral, nutrientes do sedimento para a coluna de água (Falcão, 1996). Amostras de água apenas fornecem informação pontual no espaço e no tempo do que ocorre num determinado local, visto estarem em constante movimento, não permitindo caracterizar o ambiente nutricional de uma estação bentónica. Por estas razões, a amostragem dos nutrientes foi efectuada apenas no sedimento. A análise de nutrientes foi realizada de forma a reflectir o pressuposto de que o desenvolvimento algal é condicionado pela disponibilidade do nutrientes limitante. No meio marinho esse nutriente é geralmente o azoto, ao passo que nos meios de água doce é o fósforo (Odum, 1988). Por esta razão foram determinadas concentrações de nitratos mais nitritos ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$), doravante referidos como nitratos, amónia (NH_4^+) e ortofosfatos (PO_4^{3-}).

No caso da amónia foram feitas duas determinações distintas: amónia dissolvida na água intersticial e amónia sorvida ao sedimento. Isto deveu-se ao facto da amónia sorvida poder passar muito rapidamente para a fracção dissolvida, consoante a alteração das condições do meio, como por exemplo devido à imersão do sedimento durante a enchente (Rocha, 1998). Devido a essa rápida cinética, pode-se

considerar que num estudo sazonal, com amostragens mensais, quer a amónia dissolvida, quer a amónia sorvida estão potencialmente biodisponíveis. Este facto leva à determinação da concentração de amónia total, como sendo resultante da soma da fracção dissolvida com a sorvida.

Todo o material utilizado na amostragem sedimentológica foi limpo e descontaminado com ácido clorídrico (10%), neutralizado com hidróxido de sódio (10%) e lavado com água desionizada.

3.2. Trabalho de campo

3.2.1. Macroalgas

Em cada estação efectuaram-se cinco réplicas, utilizando um cilindro de 30 cm de altura, com uma secção de 0,028 m².

A biomassa macroalgal pode ser estimada através de diferentes métodos de amostragem, consoante a sua distribuição espacial e o objectivo do estudo (Sfriso *et al.*, 1991). A escolha da área de amostragem e do número de réplicas realizadas por estação foi baseada no pressuposto descrito por McIntyre *et al.* (1984). Estes autores referem que uma área de amostragem total (soma das réplicas), por estação, entre 0,1 e 0,2 m² é suficiente para a amostragem ser representativa da população.

A técnica de recolha de amostras foi baseada na colheita das macroalgas presentes na superfície e nos primeiros milímetros do sedimento. O material recolhido foi colocado em sacos previamente identificados e conservado em caixas isotérmicas, refrigeradas com acumuladores térmicos, até ao seu processamento em laboratório.

Como as várias réplicas foram sempre recolhidas aleatoriamente dentro das áreas de cada estação que apresentavam a presença de macroalgas, foi preciso ampliar o resultado de forma a ser representativo de toda a estação. Para se poder extrapolar a informação recolhida para toda a estação de amostragem, foi registado o Índice de Cobertura (*IC*) de macroalgas de cada local, durante a baixa-mar. O método utilizado consistiu em aplicar sobre a área de cada estação, uma malha com quadrículas de 1 m², e registar na intercepção das linhas, a presença ou ausência de algas (Greig-Smith, 1964; Kershaw, 1973):

$$IC = \frac{p^u}{p^t}$$

onde p_u corresponde ao número de pontos de intercepção das quadriculas em que havia macroalgas, e p_t o número de pontos total da malha (Figura 2.5).

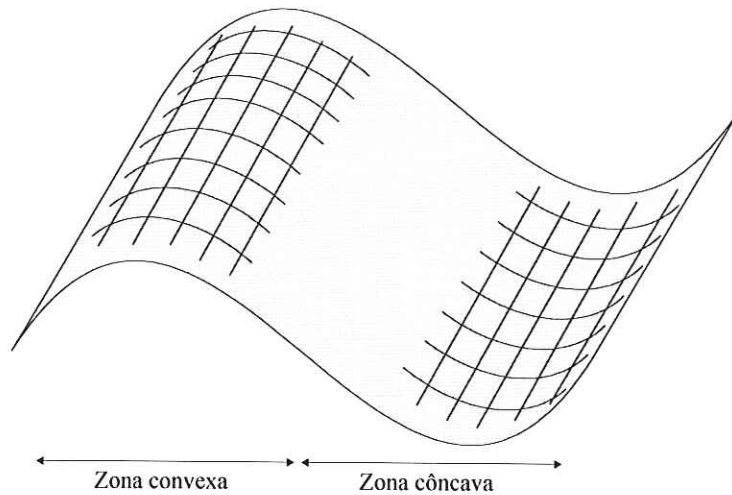


Figura 2.5: Representação esquemática da grelha de amostragem aplicada em todas as estações.

A fracção da área de estudo recoberta por macroalgas verdes, foi registada através da compilação cartográfica, das observação mensais *in loco*. Tal registo permitiu obter, de modo semi-quantitativo, a variação temporal da área coberta por macroalgas, na zona de estudo.

3.2.2. Microfitobentos

Durante um ciclo anual (Outubro de 2000 a Setembro de 2001) recolheram-se mensalmente amostras de sedimento em todas as estações da amostragem. As amostras foram colhidas utilizando um cilindro com 10 cm de diâmetro. Do sedimento recolhido apenas o primeiro centímetro foi guardado num frasco de boca larga descontaminado. As amostras foram de imediato colocadas dentro de uma caixa térmica a baixa temperatura (< 5 °C).

3.2.3. Fitopigmentos, humidade e matéria orgânica

Em cada estação amostrada foram recolhidos 6 “cores” de sedimento, utilizando seringas de plástico de 100 mL sem fundo (Figura 2.6).

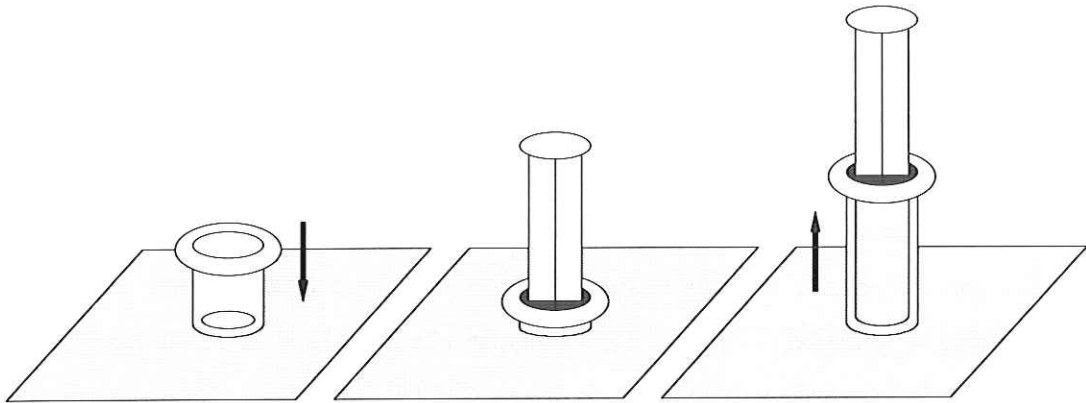


Figura 2.6: Recolha de amostra de sedimento com o auxílio de uma seringa.

Cada “core” foi fatiado com o auxílio de uma faca e uma régua aos 1, 4, 7 e 10 cm de profundidade, tendo cada fatia de sedimento sido colocada num tubo “falcon” (Greiner) de 50 mL previamente identificado (Figura 2.7).

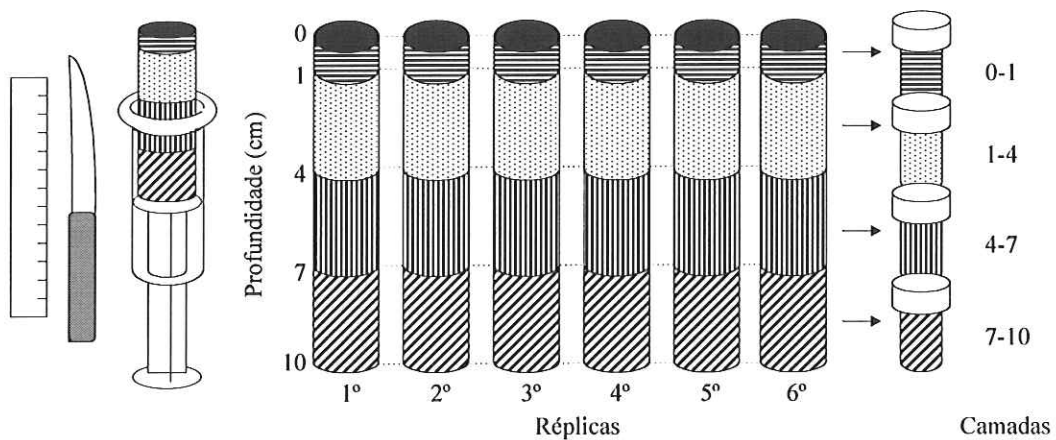


Figura 2.7: Representação esquemática da divisão das amostras de sedimento em camadas ao longo da profundidade.

Todo este processo realizou-se em menos de 2 minutos, de modo a evitar a migração, entre camadas, de solutos intersticiais por difusão e a penetração de oxigénio por contacto com o ar (Kruikov & Manheim, 1982). Os tubos foram de imediato colocadas dentro de uma caixa térmica a baixa temperatura ($< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), de

forma a minimizar a alteração das concentrações dos solutos intersticiais (Rocha *et al.*, 1995).

3.2.4. Nutrientes

De modo a evitar posteriores contaminações por oxigénio ou adulterações devido à manipulação (Kruikov & Manheim, 1982), as amostras de sedimento retiradas para posterior determinação dos teores de nutrientes, foram colocadas noutros tubos de plástico (100 mL). Para garantir a existência de um volume de água intersticial suficiente para a determinação dos nutrientes dissolvidos, foram recolhidas duas séries de 6 “cores” de sedimento. Cada série foi fatiada em separado, e cada “pool” de sedimento de cada profundidade foi colocado num tubo próprio, devidamente identificado. Este processo foi efectuado como anteriormente foi descrito (Figura 2.7).

Paralelamente foi registada a temperatura do sedimento em cada estação, de forma a poder-se recriar essa condição aquando do manuseamento de amostras de sedimento em laboratório (de Lange *et al.*, 1992).

3.3. Trabalho de laboratório

3.3.1. Macroalgas

As amostras de macroalgas foram cuidadosamente lavadas, através de um crivo de 500 µm, em água corrente. A lavagem destinou-se a remover os restos de sedimento vasoso, areias finas e detritos que podessem existir. De seguida, as amostras lavadas foram colocadas em tinas de plástico e recobertas com água corrente. As macroalgas foram processadas de imediato e a sua biomassa determinada.

3.3.2. Microfitobentos

As amostras de microfitobentos, ao chegarem ao laboratório, foram processadas de imediato.

3.3.3. Fitopigmentos, humidade e matéria orgânica

Todos os tubos de sedimento, recolhido para a determinação dos fitopigmentos, humidade e matéria orgânica, foram homogeneizados no vortex.

O processamento de amostras para determinação da humidade e matéria orgânica foi realizado de imediato.

Para a determinação dos fitopigmentos, foi retirado de cada tubo cerca de 1 g de amostra e colocada num frasco escuro de 15 mL. Os frascos de vidro contendo as amostras de sedimento foram mantidos a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante um mês. Este procedimento visou diminuir o teor de água das amostras, o que irá maximizar a eficiência do solvente orgânico utilizado na extracção dos fitopigmentos (Hansson, 1988).

3.3.4. Nutrientes

As amostras de água intersticial, onde foram posteriormente determinadas as concentrações de fosfatos, nitratos e amónia dissolvida, foram extraídas por centrifugação (Heraeus Instruments Megafuge 1.0R). Os tubos foram mantidos sempre fechados até à extracção da água intersticial, visando diminuir os riscos de contaminações ou alteração do potencial redox do sedimento, o que poderia alterar o equilíbrio entre os nitratos, nitritos e a amónia (Kruikov & Manheim, 1982). O processo de separação entre o sedimento e a água intersticial foi realizado à temperatura do sedimento no campo, de forma a não alterar o equilíbrio entre a amónia dissolvida e a amónia adsorvida (de Lange *et al.*, 1992)

Antes de serem conservadas, todas as amostras de água intersticial foram passadas por filtros de acetato de celulose com uma porosidade de $0,45\text{ }\mu\text{m}$. Este procedimento destina-se a reter as partículas sedimentares que ainda pudessem estar suspensas na água intersticial.

As amostras recolhidas para a posterior determinação de nutrientes foram todas conservadas com cloreto de mercúrio (Hg_2Cl_2) e mantidas refrigeradas ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pretendeu-se desta forma reduzir ao mínimo a actividade bacteriológica, responsável pela mineralização do carbono orgânico dissolvido, a qual iria interferir nos equilíbrios heterogéneos dos nutrientes presentes, devido aos seus acréscimos artificiais pós-colheita (Henriksen & Kemp, 1988).

Todos estes procedimentos referentes à obtenção das amostras de água, nas quais foram determinados os vários nutrientes encontram-se descritos na Figura 2.8.

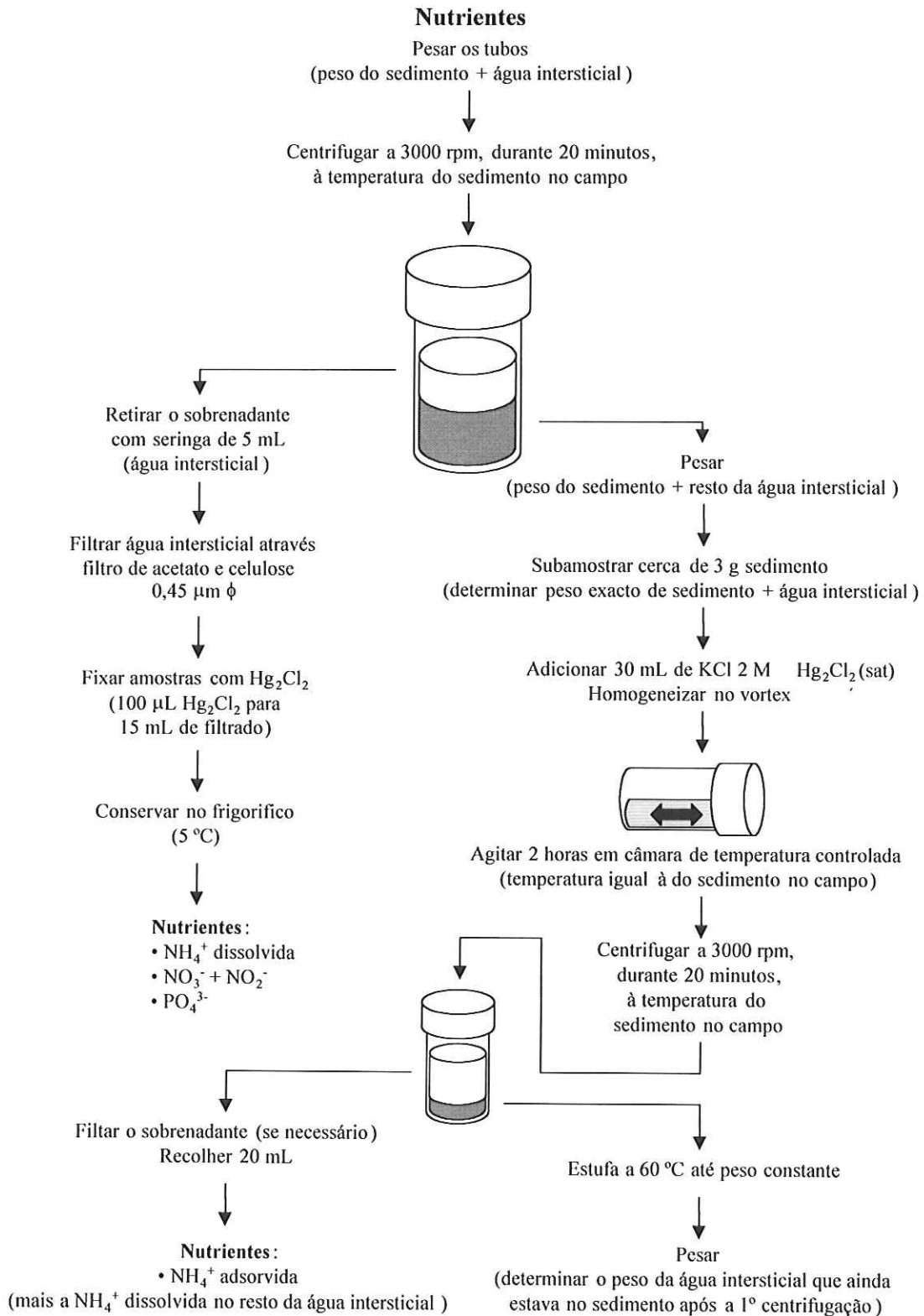


Figura 2.8: Representação esquemática do procedimento necessário à obtenção das amostras de nutrientes.

3.4. Aquisição de dados climáticos

Com o objectivo de observar possíveis relações entre a dinâmica da comunidade em estudo e os factores climáticos que sobre ela actuam realizaram-se, em simultâneo com as recolhas de amostras de nutrientes, registos da temperatura da água, ar e sedimento. Foram também adquiridos dados, referentes ao período entre Janeiro de 1999 a Dezembro de 2001, sobre a variação diária da pluviosidade, temperatura do ar e luminosidade, no Centro de Experimentação Hortofrutícola do Patação da Direcção Regional de Agricultura do Algarve.

4. PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS

4.1. Macroalgas

As amostras de macroalgas foram colocadas na sua totalidade (não se realizou subamostragem) em tinas de plástico e recobertas com água corrente; foi então realizada a triagem dos *taxa* presentes. Todas as espécies faunísticas foram desprezadas. As amostras de algas foram lavadas em água destilada de forma a eliminar os restos de sais provenientes da água salgada e da torneira. A identificação das macroalgas realizou-se até à determinação do género (Boraso, 1975; Hoeksema & Hoek, 1983; Koeman, 1985).

A biomassa das macroalgas foi determinada como teor de matéria orgânica calculado através do peso seco livre de cinzas. Para tal, utilizaram-se cadinhos de alumínio para secar as amostras numa estufa a 60 °C até peso constante (Winberg, 1971). As pesagens necessárias à determinação da biomassa foram realizadas numa balança de precisão (Precisa Instruments AG - 0,1 mg).

O teor de matéria orgânica foi determinado por incineração dos tecidos numa mufla a 450 °C durante 180 minutos. Com efeito (Grove, 1961 *in* Winberg, 1971) a incineração deve realizar-se a temperaturas entre os 400 e os 450 °C, de forma a evitar, por um lado, a incineração incompleta do material inorgânico que resultaria da utilização de temperaturas inferiores, e por outro lado, a volatilização dos carbonatos de cálcio, sódio e potássio que compõem as amostras, caso a temperatura escolhida fosse superior.

Por diferença entre o peso seco e o peso do material incinerado obtém-se o peso seco livre de cinzas (PSLC). O valor obtido deste modo foi dividido pela área do cilindro de amostragem, de forma a obter-se o número de gramas de PSLC de macroalgas por metro quadrado. A partir dos dados obtidos determinou-se, para cada réplica, de cada estação e em cada mês, a biomassa (b_a) por *taxon* de Ulvales. Os valores iniciais de biomassa (b_{ai}) foram multiplicados pelo respectivo índice de cobertura de macroalgas verdes (IC), com o objectivo de se poder comparar directamente as biomassas (g PSLC.m⁻²) de diferentes estações:

$$b_a = b_{ai} \cdot IC$$

Foi também determinada a biomassa média anual para cada *taxa* de Ulvales.

A produção (P) primária anual das algas ($\text{g PSLC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) foi determinada pelo método de Milner & Hughes (1968), que consiste no somatório das variações positivas da biomassa entre sucessivas amostragens (Δb), ajustado a 365 dias:

$$P = \sum_{i=1}^n (\Delta b_i)$$

Por fim, calculou-se a razão entre produção primária e a biomassa média anual (P/B) para todos os *taxa* de Ulvales.

4.2. Microfitobentos

Os organismos microfitobentônicos que se encontravam nas amostras de sedimento foram ressuspensos, em 10 mL de água salgada filtrada, por agitação suave. Dessa ressuspensão foram retirados 25 μL , que foram colocados numa câmara de Bürker ($0,0025 \text{ mm}^2 \times 0,1 \text{ mm}$ de profundidade) e observados ao microscópio com uma ampliação de 400 vezes. Os organismos observados foram identificados, sempre que possível, até ao género (Sournia, 1986; Ricard, 1987; Delgado & Fortuño, 1991).

4.3. Clorofila *a* e feopigmentos

Os fitopigmentos foram extraídos do sedimento utilizando acetona a 90% (Hansson, 1988). As concentrações de clorofila *a* e feopigmentos foram medidas espectrofotometricamente e calculadas através das equações de Lorenzen (Lorenzen, 1967; Lorenzen & Jeffrey, 1980; APHA *et al.*, 1995), de forma a serem expressas em μg de pigmento(s) por g de sedimento inteiro (“bulk”).

4.4. Humidade, porosidade e matéria orgânica

A percentagem de humidade do sedimento foi determinada por perda de peso após secagem a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ até peso constante (peso seco):

$$\% \text{humidade} = \frac{\text{peso húmido} - \text{peso seco}}{\text{peso húmido}}$$

A porosidade (ϕ) de um sedimento corresponde à percentagem de espaço que existe entre os grãos de um determinado volume de sedimento, e que é ocupada pela

água intersticial. A porosidade foi determinada aplicando a equação descrita por Dullien (1992), onde 2,56 corresponde à densidade média do sedimento saturado em água (Rocha & Cabral, 1998):

$$\phi = \frac{\% \text{humidade}}{\% \text{humidade} + \left(\frac{1 - \% \text{humidade}}{2,56} \right)}$$

A percentagem de matéria orgânica do sedimento foi determinada por perda por ignição (“Loss on Ignition”-LOI) a 450 °C durante 180 minutos (peso seco livre de cinzas):

$$\% \text{matéria orgânica} = \frac{\text{peso seco} - \text{peso seco livre de cinzas}}{\text{peso húmido}}$$

4.5. Nutrientes

4.5.1. Fosfatos

A concentração de fosfatos (PO_4^{3-}) foi determinada segundo o método espectrofotométrico descrito por Koroleff (*in* Grasshoff *et al.*, 1983). Este método baseia-se na reacção dos iões de fosfato inorgânico com uma solução de molibdato, em meio ácido, o que origina um complexo de fosfomolibdato, de cor amarela. Esse complexo é posteriormente reduzido por uma solução de ácido ascórbico, originando uma solução de cor azul escura, cuja absorvância é determinada a 880 nm (APHA *et al.*, 1995).

Os valores da concentração de fosfatos foram multiplicados pelo respectivo valor de porosidade (ϕ) do sedimento de onde foram extraídos. Desta forma, transformou-se a concentração de fosfatos na água intersticial, em concentração no sedimento inteiro ($\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ “bulk”).

4.5.2. Nitratos

A determinação dos nitratos (NO_3^-) foi realizada reduzindo-os a nitritos (NO_2^-) através de uma coluna de cádmio tratada com sulfato de cobre, e quantificando posteriormente os nitritos totais da amostra (APHA *et al.*, 1995). Como no meio marinho a concentração de nitritos é geralmente muito baixa ($<0,1 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$), o

resultado obtido por esta determinação pode ser encarado como sendo apenas de nitratos (Grasshoff *et al.*, 1983).

A quantificação da concentração de nitratos, correspondente aos nitratos mais nitritos, foi realizada através da adição de uma solução de sulfanilamida e uma solução de hidrócloro de N-(1-naftil)-etilenodiamina, em meio ácido. Estes compostos reagem com os nitritos formando um composto azotado de cor avermelhada, o qual pode ser quantificado espectrofotometricamente a 540 nm (APHA *et al.*, 1995).

Os valores da concentração de nitratos foram multiplicados pelo respectivo valor de porosidade (ϕ) do sedimento de onde foram extraídos. Desta forma, transformou-se a concentração de nitratos na água intersticial, em concentração no sedimento inteiro ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”).

4.5.3. Amónia

As concentrações de amónia (NH_4^+), quer dissolvida, quer sorvida ao sedimento, foram determinadas segundo o método descrito por Koroleff (1969 *in* Grasshoff *et al.*, 1983). Este método baseia-se na reacção, em meio alcalino, da amónia com o hipoclorito formando monocloroamina. Esse composto, na presença do fenol e do hipoclorito em excesso forma o azul de indofenol, que é quantificado por colorimetria a 630 nm (APHA *et al.*, 1995).

Os valores da concentração de amónia dissolvida foram multiplicados pelo respectivo valor de porosidade (ϕ) do sedimento de onde foram extraídos. Desta forma, transformou-se a concentração de amónia dissolvida na água intersticial, em concentração no sedimento inteiro ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”). Por outro lado, os valores da concentração de amónia sorvida foram multiplicados pelo respectivo valor da percentagem ocupada pelas partículas do sedimento ($1 - \phi$). Desta forma, transformou-se a concentração de amónia sorvida ao sedimento, em concentração no sedimento inteiro ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”).

5. ANÁLISE DE DADOS

5.1. Considerações gerais

A análise dos dados foi efectuada de duas formas: 1) estudo das relações entre os vários parâmetros medidos durante o ciclo anual, de Outubro de 2000 a Setembro de 2001 e 2) aplicação dessas relações num modelo geral para as três estações, de forma a simular a dinâmica de Ulvales. É por esta razão que os dois capítulos seguintes são compostos por resultados e respectiva discussão. A discussão das relações entre macroalgas, microfítobentos, nutrientes e factores climáticos (capítulo III), vai servir de base às escolhas necessárias para a elaboração do modelo (capítulo IV).

A primeira análise dos dados foi efectuada por etapas: primeiro analisou-se a informação referente aos factores climáticos como agentes condicionadores de todos os processos; em seguida estudaram-se os nutrientes, visto eles serem a base de todos os processos analisados neste trabalho; depois analisou-se o microfítobentos, pois este grupo está em posição privilegiada para o consumo dos nutrientes; e por fim as macroalgas.

5.2. Relações entre macroalgas, microfítobentos e nutrientes

De forma a analisar a variação dos parâmetros referentes ao sedimento, nutrientes e fitopigmentos, realizaram-se gráficos da variação mensal em profundidade, por estação. A partir desses dados, calcularam-se médias mensais integradas, as quais caracterizam a reserva contida no sedimento de um determinado parâmetro.

Os dados de clorofila *a* e feopigmentos foram cruzados com a análise da variação mensal da composição taxonómica do microfítobentos presente nas amostras de cada estação, de forma a tentar caracterizar a dinâmica deste grupo.

Em relação às Ulvales, começou-se por analisar a normalidade da distribuição dos valores de biomassa, através de um teste de Kolmogorov-Smirnov com um grau de significância de $\alpha = 0,05$ (Sokal & Rohlf, 1981) Em seguida, analisaram-se a variação da cartografia *in loco* e biomassas de Ulvales durante os três anos em que decorreu o estudo (Janeiro 1999 a Dezembro de 2001), visando encontrar padrões cíclicos anuais. Foram também estudadas as variações da biomassa mensal das

macroalgas (por *taxon*), e do respectivo índice de cobertura (Outubro de 2000 a Setembro de 2001).

Os dados climáticos foram analisados mensalmente de forma a poderem-se relacionar com as variações dos outros parâmetros.

Por fim, tentou-se avaliar, em cada estação, a correlação entre as médias mensais dos vários parâmetros abióticos e bióticos analisados (coeficiente de correlação de Spearman), com um grau de significância de $\alpha = 0,05$. Devido ao elevado número de variáveis envolvidas na análise de correlação, foi utilizada a correcção do nível de significância sugerida por Bonferroni (Snedecor & Cochran, 1980), em que para um número de correlações n :

$$\alpha' = \alpha / n.$$

As análises estatísticas mencionadas foram realizadas utilizando o programa informático “SigmaStat 2.03” (SPSS Inc.). De forma a simplificar a visualização dos coeficientes de correlação de Spearman, entre os vários parâmetros, foram elaborados dendrogramas (Rohlf, 1998), utilizando o programa informático NTSYSpc 2.02c (Applied Biostatistics Inc.)

5.3. Elaboração do modelo descritivo da dinâmica das macroalgas

A partir das relações encontradas anteriormente, elaborou-se um modelo matemático dinâmico e determinístico, utilizando a linguagem “STELLA”, de forma a simular os fenómenos ocorridos nas três estações.

Os dados, referentes a todos os parâmetros estudados, foram referenciados ao dia Juliano correspondente à sua obtenção, sendo o primeiro dia o 1 de Janeiro de 1999 (Quadros I e II no Anexo I).

III. RELAÇÕES ENTRE MACROALGAS, MICROFITOBENTOS, NUTRIENTES E FACTORES CLIMÁTICOS

1. RESULTADOS

1.1. Considerações gerais

A escolha das três estações utilizadas neste estudo decorreu do facto delas caracterizarem os três tipos de locais onde ocorrem os “blooms” de Ulvales na zona ocidental da Ria Formosa (Aníbal, 1998). A apresentação dos resultados foi feita por estação, de forma a tornar mais simples a relação entre os parâmetros medidos, bióticos e abióticos, e o regime hidrodinâmico a que estão sujeitos.

A caracterização física do substrato sedimentar incidiu na determinação de dois parâmetros: percentagem de humidade e teor de matéria orgânica. O primeiro teve como objectivo a determinação da porosidade, em função da humidade, a qual é essencial para a conversão da concentração de nutrientes. Como os dados de percentagem de humidade só serviram para calcular a respectiva porosidade, optou-se por apresentar somente este último parâmetro de forma a não repetir informação. A matéria orgânica teve uma abordagem mais pormenorizada, visto ser ela a matéria prima a partir da qual os nutrientes podem ser produzidos, pelos vários processos de remineralização bacteriana (Valiela, 1995).

A concentração de nutrientes (amónia, fosfatos e nitratos) presentes na água intersticial vem expressa em μmol por dm^3 de sedimento inteiro (“bulk”). Acontece o mesmo com os parâmetros biológicos (clorofila *a* e feopigmentos) que vêm expressos em μg por g de sedimento inteiro (“bulk”). Desta forma os resultados obtidos, em diferentes alturas do ano, são directamente comparáveis.

Na elaboração dos gráficos utilizou-se uma sinalética específica, por forma a reconhecer mais facilmente o parâmetro apresentado. No caso dos nutrientes, colunas e círculos brancos representam nutrientes dissolvidos; círculos e colunas pretas representam nutrientes sorvidos. Em relação ao microfitobentos, colunas brancas representam pigmentos viáveis (clorofila *a*), enquanto que colunas pretas representam feopigmentos.

Após a triagem das amostras de macroalgas, observou-se que estas eram exclusivamente compostas por espécies dos géneros *Enteromorpha* e *Ulva*, da ordem Ulvales. Embora a distribuição, quer de Ulvales em geral, quer de *Enteromorpha* e *Ulva* em particular, não tenha apresentado uma distribuição normal (teste de Kolmogorov-Smirnov; $0,1986 < d < 0,3482$; $p < 0,01$), optou-se por utilizar a média como medida de tendência central, porque existiram meses em que apenas foram

recolhidas Ulvales em uma ou duas das cinco réplicas realizadas em cada estação. Se nestes casos se optasse por utilizar a mediana, estar-se-ia a atribuir biomassas nulas em locais onde, embora em pequena quantidade, existiam Ulvales (Aníbal, 1998).

A dinâmica de Ulvales observada desde 1988, referenciada pela primeira vez por Sprung em 1994 e quantificada em 1998 por Aníbal, voltou a repetir-se durante os três anos que duraram este estudo. Essa dinâmica é caracterizada por um “bloom” no Outono, que persiste no Inverno e que começa a desaparecer durante a Primavera, sendo praticamente nula a biomassa de Ulvales ao longo do Verão (Figuras 3.1, 3.2 e 3.3).

A cartografia apresentada nestas figuras permite comprovar a coerência sazonal da dinâmica das macroalgas Ulvales, a qual é reforçada pela análise da variação dos valores de biomassa mensais (Figura 3.4).

Destas variações há a salientar uma dominância de *Enteromorpha* sobre *Ulva*, devendo-se a biomassa de Ulvales quase exclusivamente à contribuição do primeiro género. Tal como na observação *in loco* da dinâmica de Ulvales, também os valores de biomassa, de toda a área de estudo, apresentam valores mínimos durante o Verão, valores máximos durante o Inverno, sendo o “bloom” iniciado entre os meses de Setembro a Novembro.

Os valores mínimos registados no Verão foram de 1,0 g.m⁻² em Setembro de 1999; 0,6 g.m⁻² em Agosto de 2000 e 1,5 g.m⁻² em Agosto de 2001. Os valores máximos foram de 39,0 g.m⁻² em Janeiro de 1999; 143,0 g.m⁻² em Janeiro de 2000; 26,0 g.m⁻² em Janeiro de 2001 e 27,2 g.m⁻² em Novembro de 2001.

O valor registado em Janeiro de 2000 é realmente muito elevado quando comparado com os outros valores máximos anuais observados neste estudo, ou no estudo de Aníbal (1998), onde o valor máximo registado foi de 44,4 g.m⁻².

Os elevados valores do desvio padrão observados indicam que a distribuição espacial de Ulvales é agregada. É, por isso, de esperar uma elevada variabilidade entre os valores das várias réplicas, mesmo dentro dos mantos de algas que cobrem cada estação (Figura 3.4).

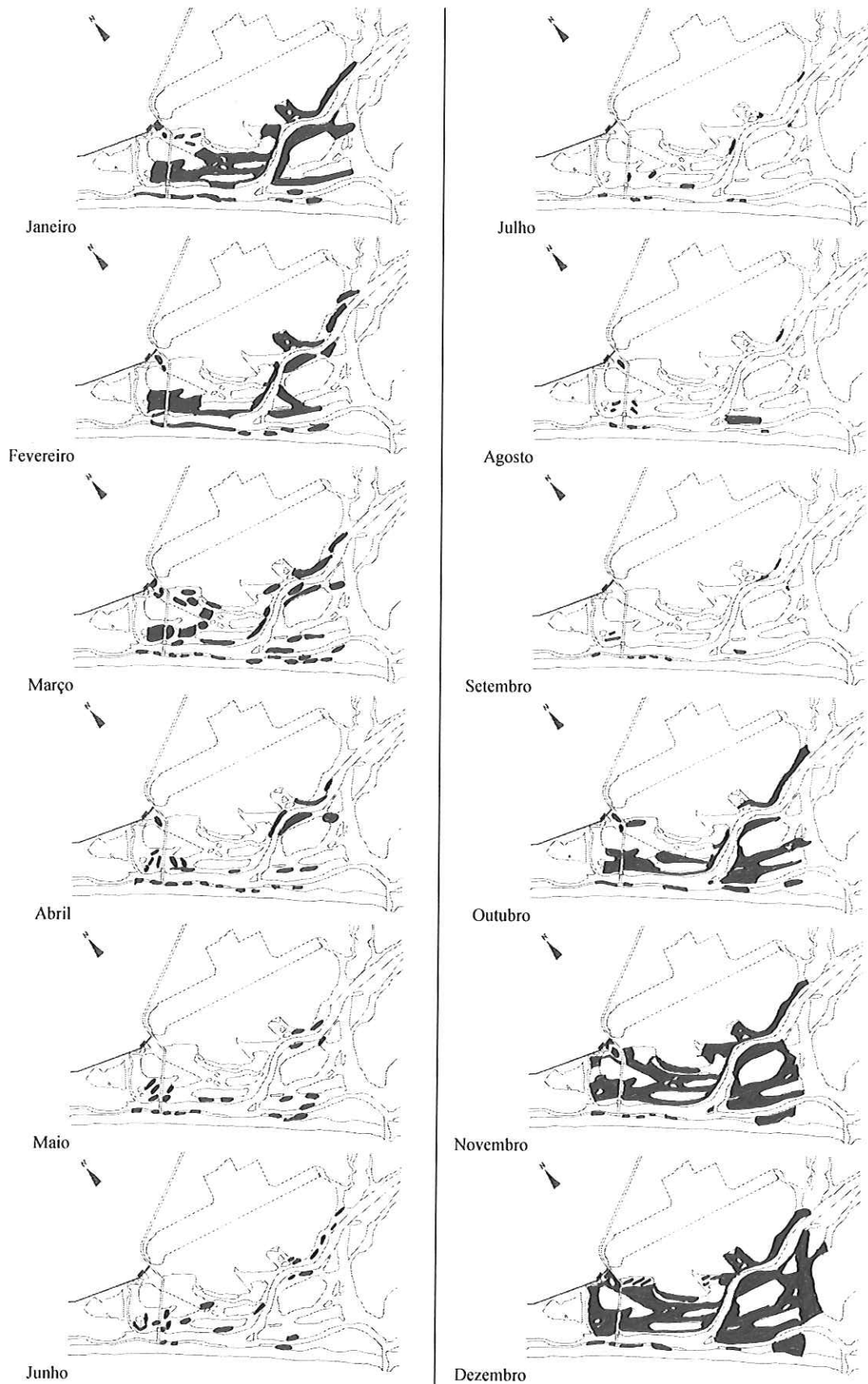


Figura 3.1: Cartografia mensal da área ocupada por Ulvaes (mancha a preto), de Janeiro a Dezembro de 1999.

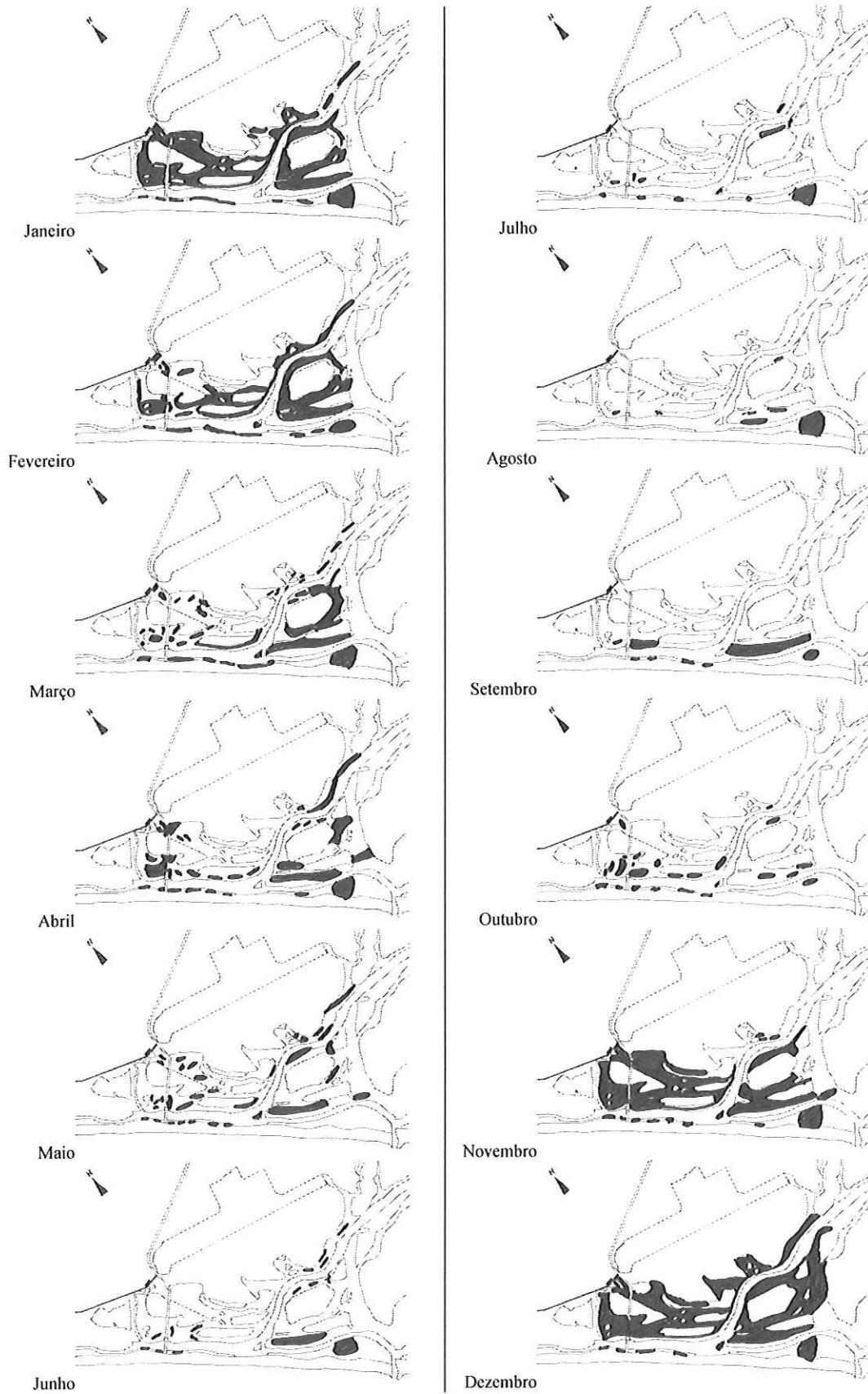


Figura 3.2: Cartografia mensal da área ocupada por Ulvales (mancha a preto), de Janeiro a Dezembro de 2000.

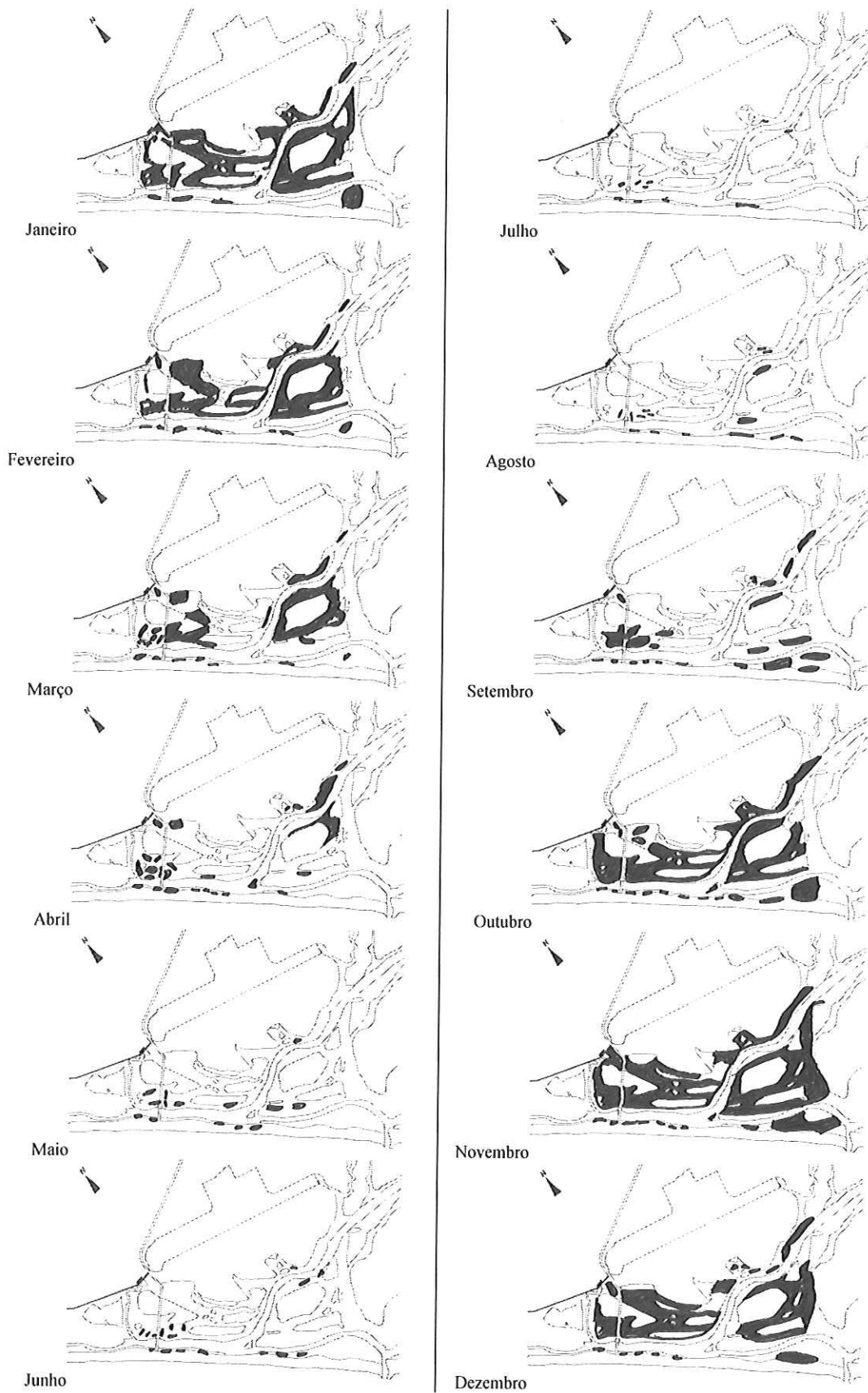


Figura 3.3: Cartografia mensal da área ocupada por Ulvaes (mancha a preto), de Janeiro a Dezembro de 2001.

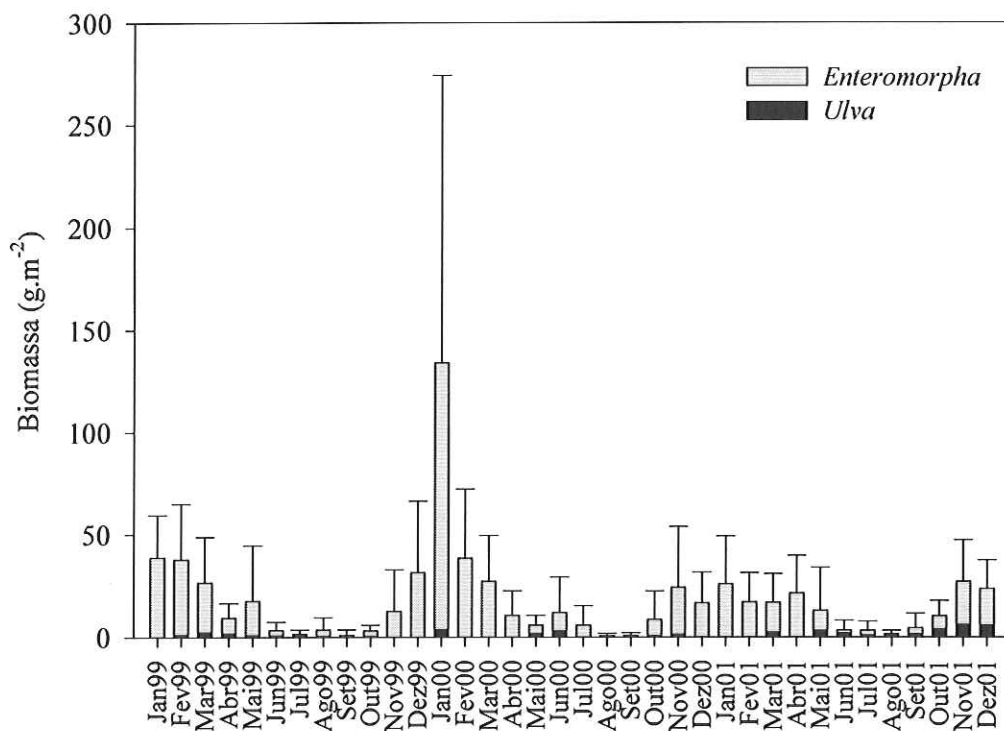


Figura 3.4: Variação mensal dos valores médios e desvios padrão da biomassa (g.m⁻²) de Ulvales (*Enteromorpha* mais *Ulva*) na área de estudo, de Janeiro de 1999 a Dezembro de 2001.

1.2. Dados climáticos

Excepção feita aos dados referentes à temperatura da água e do sedimento, os quais foram obtidos durante as amostragens de campo, todos os outros dados foram obtidos a partir do Posto Meteorológico Automático do Patacão, da Direcção Regional de Agricultura do Algarve.

Como seria de esperar a temperatura da água apresenta uma variação anual típica (Figura 3.5), com valores máximos no Verão (22,5 °C em Setembro) e valores mínimos no Inverno (14,5 °C no mês de Janeiro).

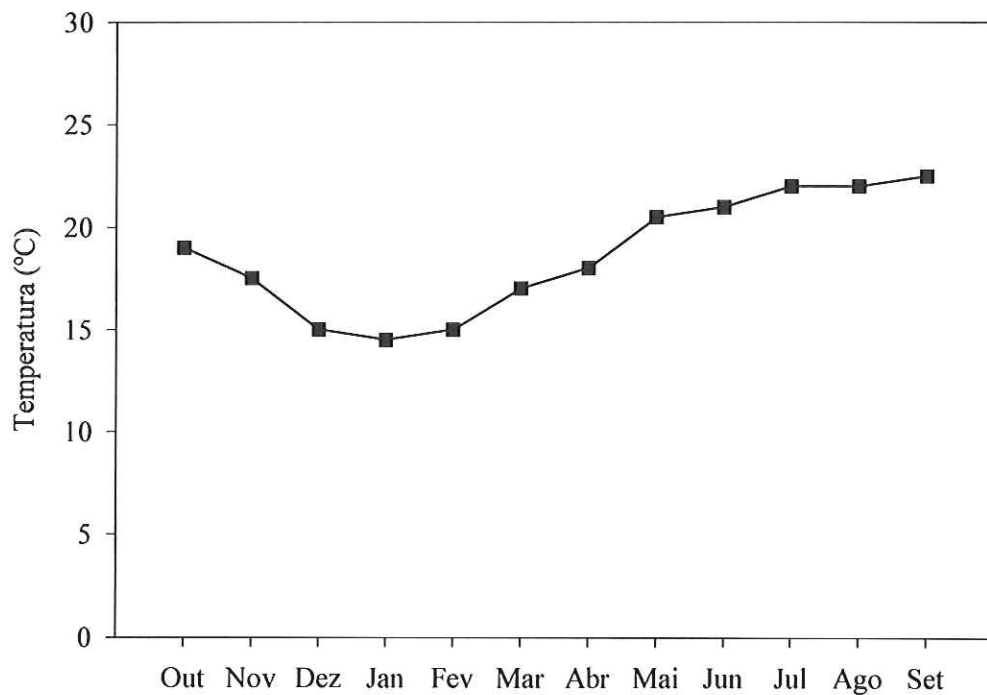


Figura 3.5: Variação mensal da temperatura (°C) da água, durante o período de amostragem (Outubro de 2000 a Setembro de 2001).

Os dados referentes à temperatura do sedimento, em cada uma das estações, serão apresentados nos subcapítulos respectivos.

A variação anual da temperatura do ar foi semelhante à da temperatura da água, só que com uma maior amplitude de valores (Figura 3.6). Os valores máximos verificaram-se nos meses de Verão (30 °C em Julho), e os mínimos nos meses de Inverno (7,1 °C no mês de Fevereiro). As temperaturas médias mensais oscilaram entre em os 12,2 °C em Janeiro e os 23,9 °C no mês de Agosto.

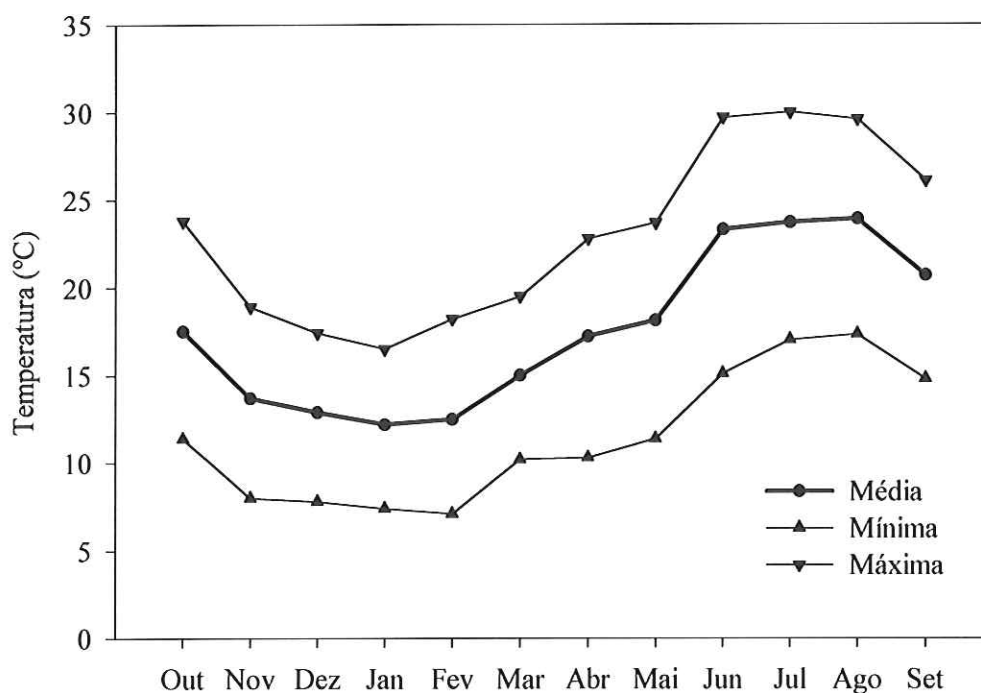


Figura 3.6: Variação dos valores médios mensais da temperatura (°C) média, mínima e máxima do ar, durante o período de amostragem (Outubro de 2000 a Setembro de 2001).

A variação da precipitação ao longo do ano evidenciou uma dinâmica típica da latitude onde se efectuou o estudo, com ocorrência de chuva desde o Outono até à Primavera e um Verão seco (Figura 3.7). Foram observados três picos de precipitação em Dezembro (201,4 mm), Março (129,8 mm) e Setembro (121,6 mm). Nos meses de Abril a Junho os valores foram inferiores a 0,6 mm, não tendo ocorrido precipitação em Julho e Agosto. É de salientar que as primeiras chuvas a seguir ao Verão, ocorreram nos meses de Outubro de 2000 e Setembro de 2001.

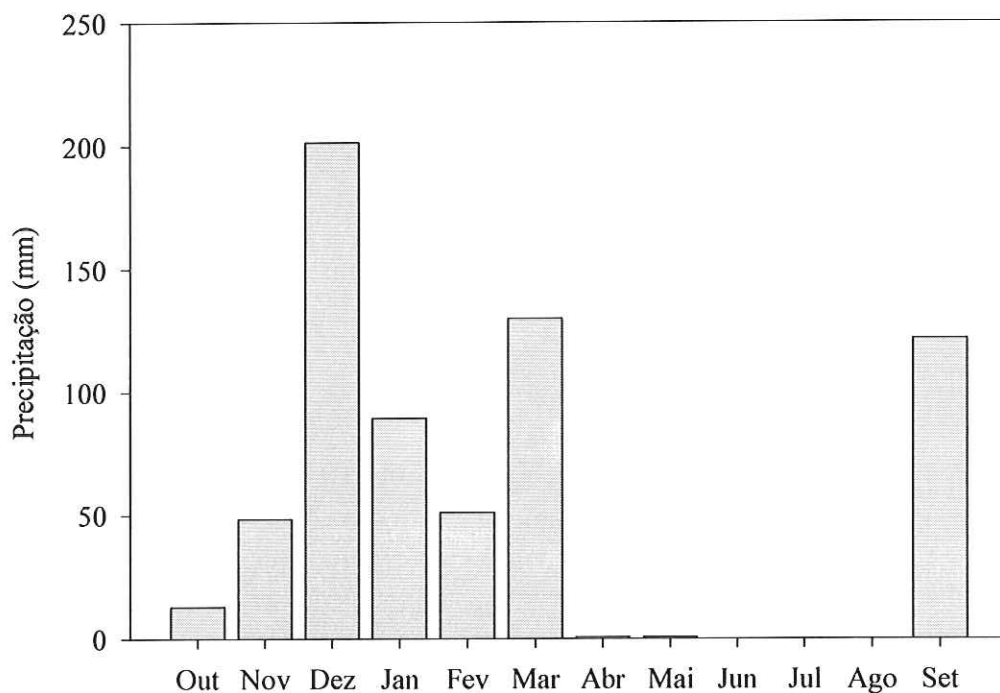


Figura 3.7: Variação da precipitação acumulada mensalmente (mm), durante o período de amostragem (Outubro de 2000 a Setembro de 2001).

A humidade relativa do ar, como seria de esperar, acompanha a ocorrência de precipitação, com máximos no Inverno e mínimos no Verão (Figura 3.8).

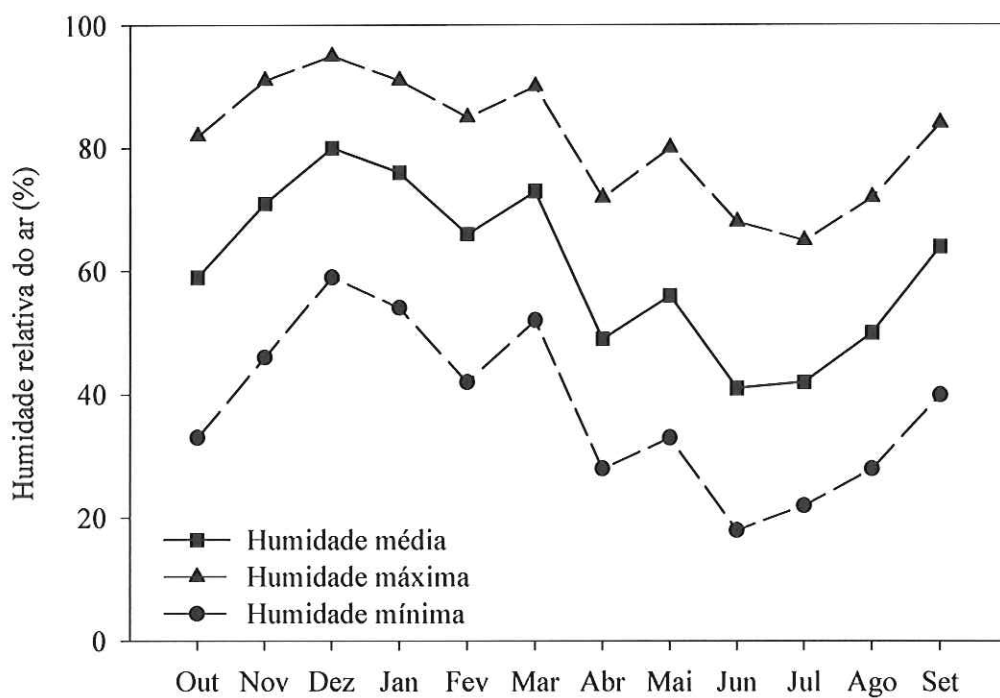


Figura 3.8: Variação dos valores médios mensais da humidade relativa (%) média, máxima e mínima, durante o período de amostragem (Outubro de 2000 a Setembro de 2001).

O valor máximo de humidade relativa do ar foi observado no mês de Dezembro (95 %), e o mínimo em Junho (18 %). Os valores médios mensais oscilaram entre os 41 % (Junho) e os 80 % (Dezembro).

A variação dos valores de radiação solar global foi típica da região Sul de Portugal, com máximos no Verão e mínimos no Inverno (Figura 3.9). Os valores da radiação média variaram entre os 76 W.m^{-2} em Dezembro, e os 329 W.m^{-2} no mês de Junho. Foi registado um valor máximo no mês de Maio de 1078 W.m^{-2} .

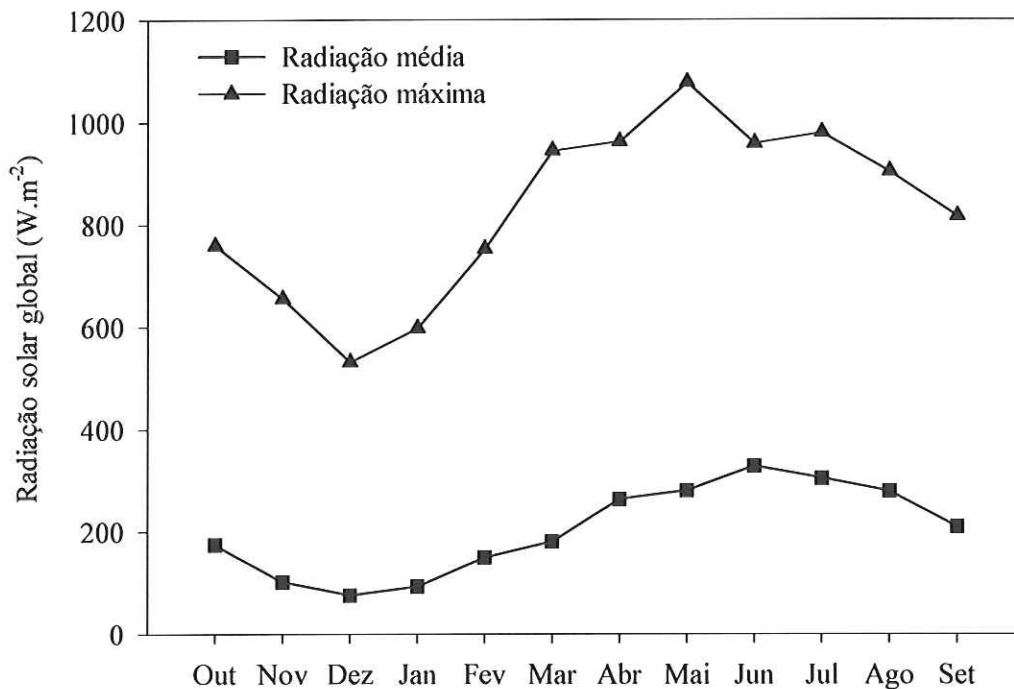


Figura 3.9: Variação dos valores médios mensais da radiação solar global (W.m^{-2}) média e máxima, durante o período de amostragem (Outubro de 2000 a Setembro de 2001).

1.3. Estação I

1.3.1. Sedimento

A porosidade do sedimento apresentou uma tendência de diminuição ao longo da profundidade (Quadro 3.1). Os valores mensais não apresentaram nenhuma tendência nítida ao longo do período de amostragem. Os teores de porosidade variaram entre os 0,50 (Junho; camada 7-10) e os 0,75 (Fevereiro, Abril e Agosto; camada 0-1).

Quadro 3.1: Variação mensal da porosidade por camada de sedimento inteiro, na estação I.

Ano	Mês	Camadas (cm)			
		0-1	1-4	4-7	7-10
2000	Outubro	0,67	0,58	0,56	0,57
	Novembro	0,52	0,53	0,56	0,53
	Dezembro	0,71	0,64	0,56	0,56
2001	Janeiro	0,65	0,61	0,54	0,58
	Fevereiro	0,75	0,66	0,61	0,55
	Março	0,72	0,60	0,60	0,59
	Abril	0,75	0,63	0,58	0,53
	Maio	0,72	0,73	0,61	0,62
	Junho	0,66	0,51	0,55	0,50
	Julho	0,73	0,61	0,59	0,53
	Agosto	0,75	0,59	0,61	0,63
	Setembro	0,66	0,59	0,54	0,56

Em profundidade, a variação da matéria orgânica apresentou, geralmente, um perfil com valores mais baixos à superfície, e mais elevados consoante o aumento da profundidade (Figura 3.10). Esta tendência foi invertida em Janeiro, quando se registou o valor mais alto de matéria orgânica à superfície. A partir desse mês a matéria orgânica foi sistematicamente aumentando nas camadas mais profundas e diminuindo à superfície, até se atingir o valor máximo em Agosto. No mês de Setembro houve a salientar uma diminuição do valor de matéria orgânica em todas as camadas.

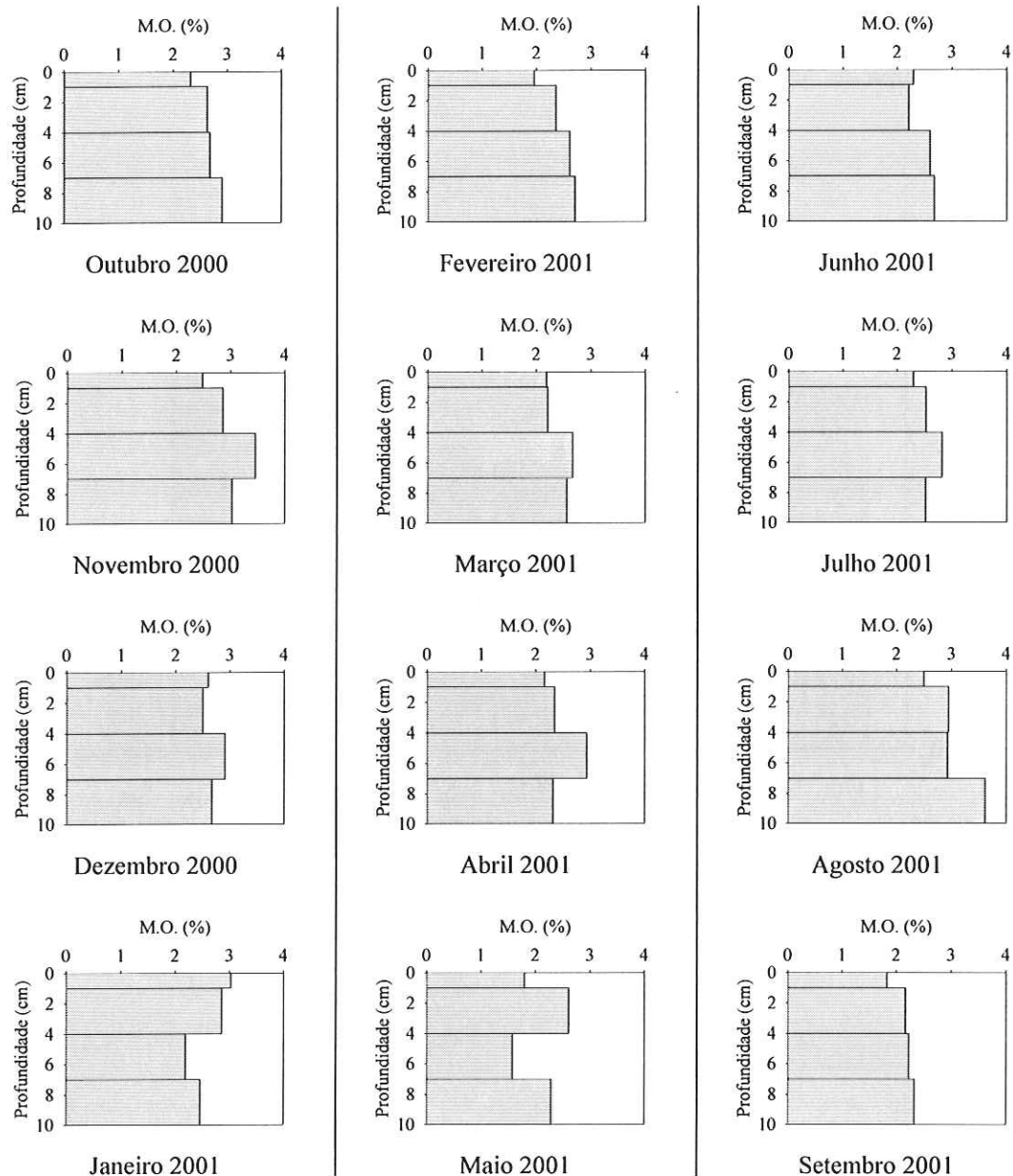


Figura 3.10: Variação dos valores de matéria orgânica (% peso húmido) por camada de sedimento inteiro, na estação I.

A integração dos valores em profundidade, de qualquer dos parâmetros amostrados neste estudo, permitiu observar a variação dos seus valores médios mensais. Em relação à matéria orgânica contida no sedimento (Figura 3.11), essa variação apresentou valores máximos nos meses de Novembro (3,05 %) e Agosto (3,10 %), e mínimos nos meses de Maio (2,12 %) e Setembro (2,20 %). Estes teores de matéria orgânica coincidiram com valores muito altos de temperatura no sedimento (Figura 3.12), a qual foi mais elevada durante o Verão, e menor no

Inverno. A temperatura mínima do sedimento foi registada no mês de Janeiro (12,5 °C) e a máxima em Maio e Agosto (24 °C).

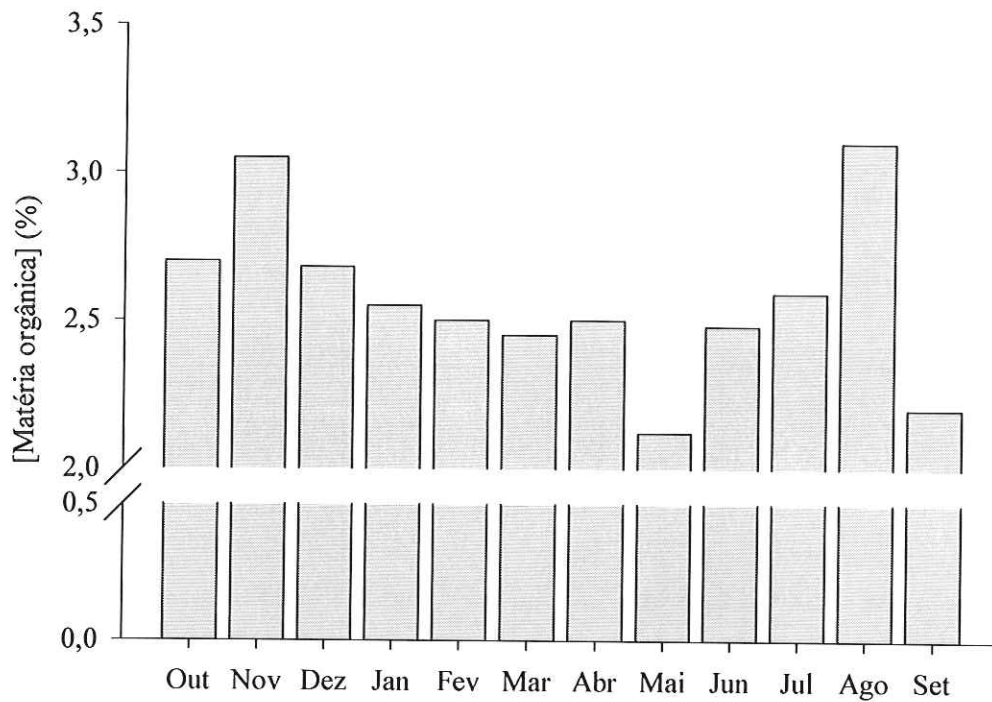


Figura 3.11: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos valores médios de matéria orgânica (% peso húmido) no sedimento, na estação I.

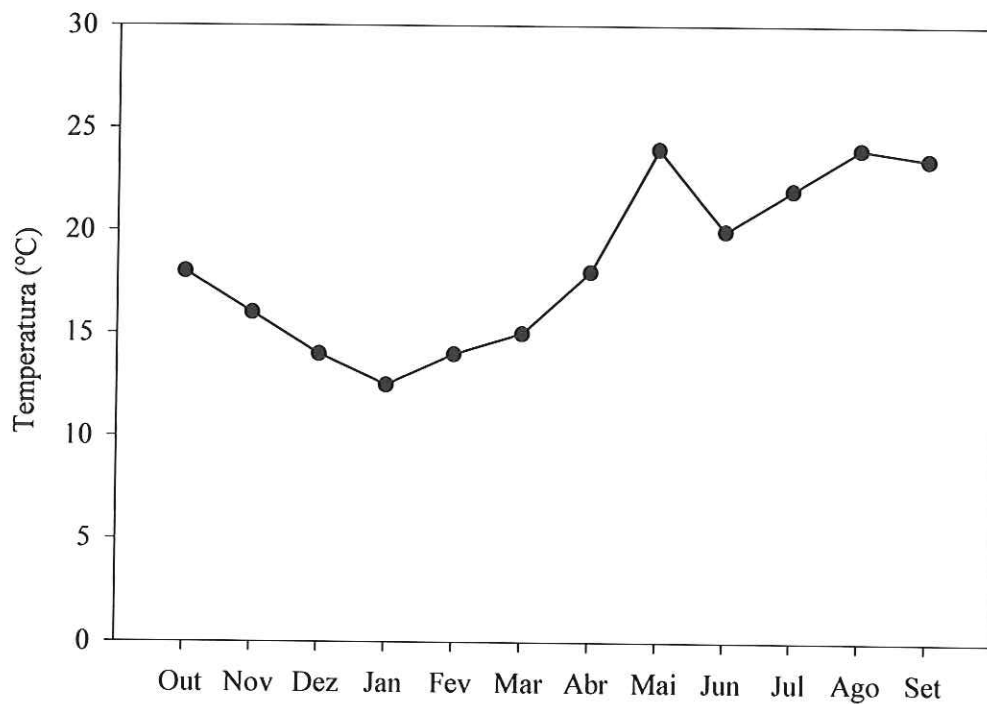


Figura 3.12: Variação mensal da temperatura (°C) do sedimento, na estação I.

1.3.2. Nutrientes

A variação em profundidade da concentração de amónia, quer dissolvida, quer sorvida, por camada de sedimento apresentou geralmente valores mínimos à superfície (Figura 3.13). Os valores de amónia dissolvida foram sistematicamente mais elevados do que a sorvida, excepto nos meses de Outubro e Novembro, onde a diferença entre estes parâmetros foi menor, especialmente nas camadas mais superficiais.

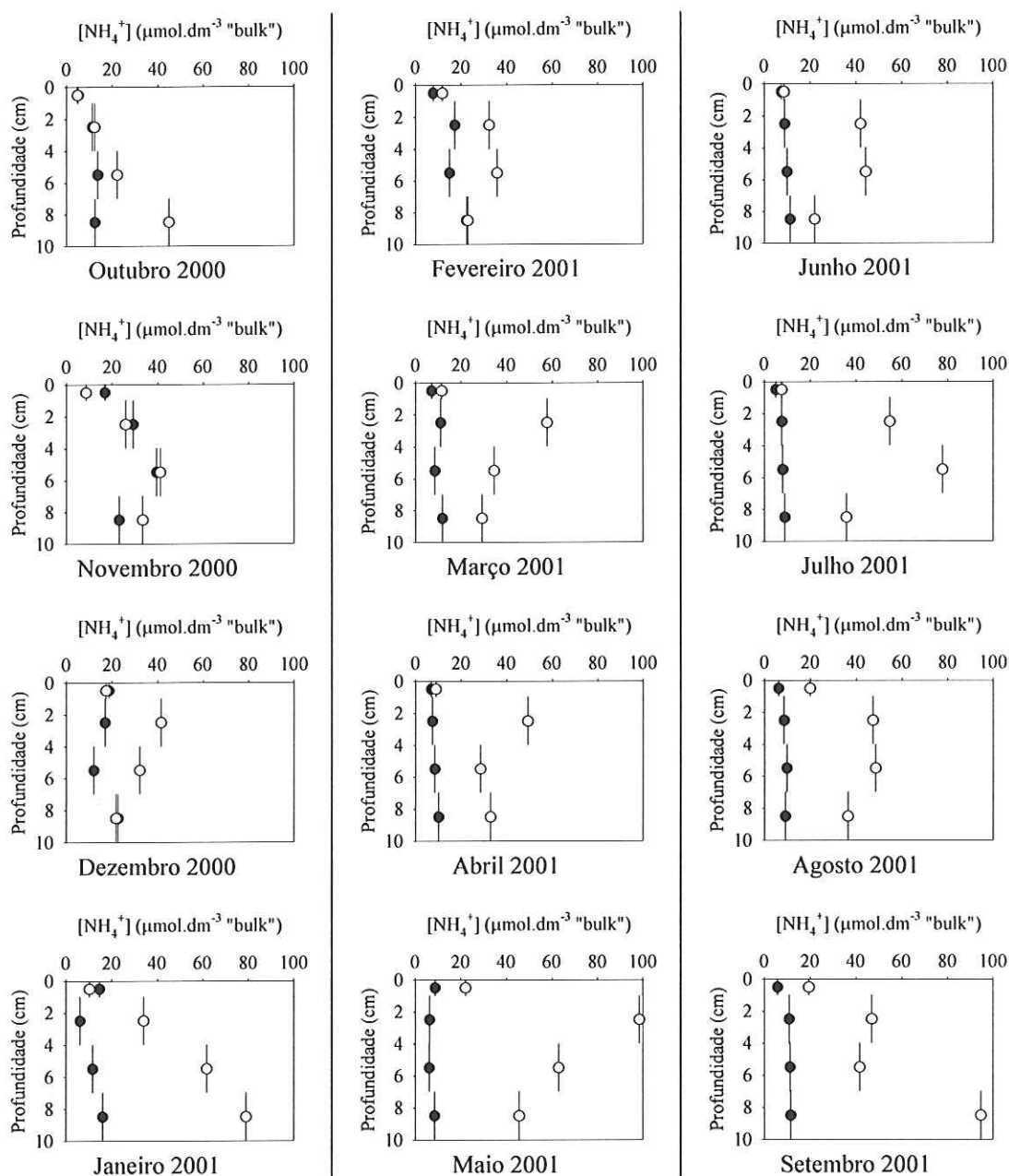


Figura 3.13: Variação da concentração de amónia dissolvida (o) e sorvida (●) ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk") por camada de sedimento inteiro, na estação I.

As variações mensais dos teores de amónia, tal como as respectivas variações em profundidade, apresentaram valores mais elevados de amónia dissolvida do que sorvida (Figura 3.14). Embora esta tendência se estenda a todo o período de amostragem, há a salientar que durante os meses de Inverno, a diferença entre as duas fracções de amónia é menor, do que nos restantes meses. Isto levou a amónia dissolvida a apresentar um nível máximo em Maio ($64,4 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”), ao passo que a fracção sorvida teve o seu maior valor em Novembro ($29,3 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”). Analisando a amónia total no sedimento, há a salientar as elevadas concentrações dos meses de Janeiro ($65,3 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”), Maio ($71,6 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”) e Setembro ($67,7 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”), as quais coincidem com alturas em que o teor de matéria orgânica no sedimento é menor.

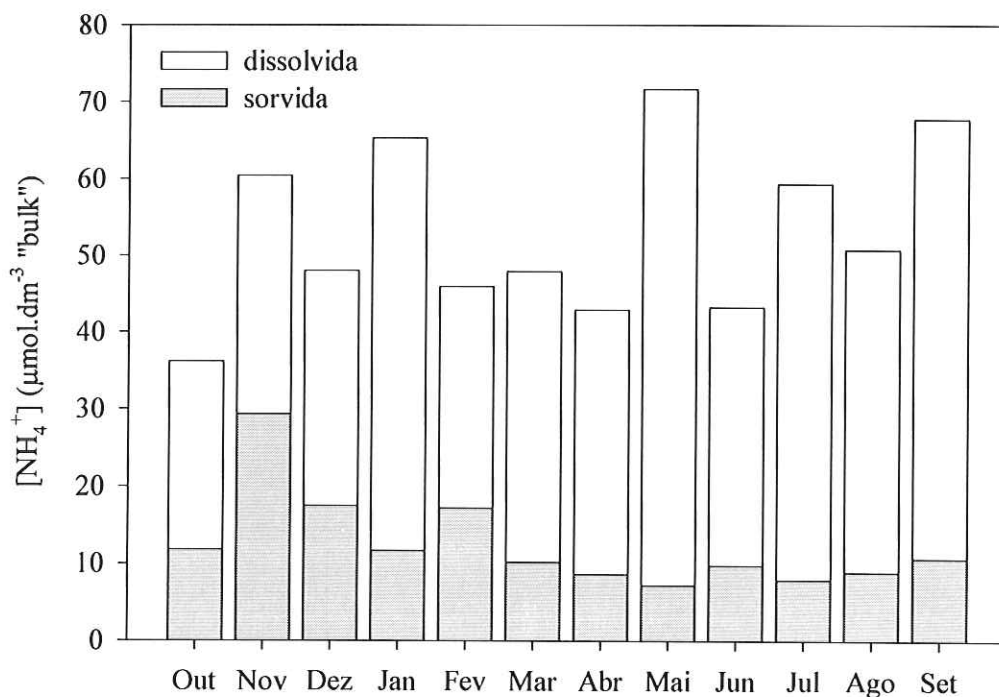


Figura 3.14: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) da amónia dissolvida (branco) e sorvida (cinzento) ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”) no sedimento inteiro, na estação I.

As concentrações de nitratos, quer em profundidade, quer em sazonalidade, apresentaram valores menores do que a amónia (Figura 3.15 e 3.16). Em profundidade, os níveis mínimos foram observados durante os meses de Verão, especialmente no mês de Junho ($\leq 0,5 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”). Os teores mais elevados de

nitratos foram geralmente encontrados nas duas primeiras camadas de sedimento, onde há a salientar o valor máximo de $21,4 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk” no mês de Novembro na camada entre a superfície e o primeiro centímetro.

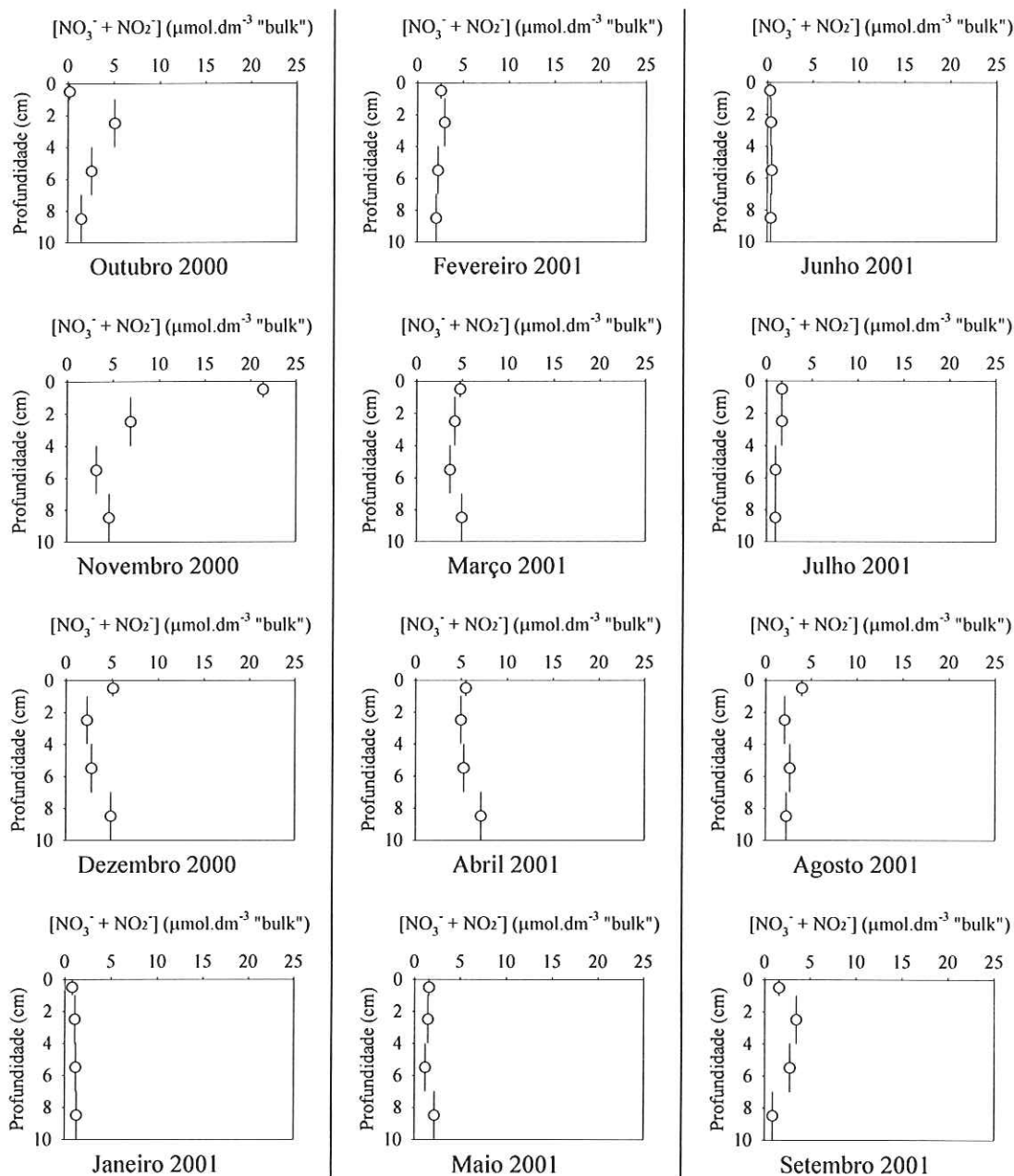


Figura 3.15: Variação da concentração de nitratos ($[\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-]$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ “bulk”)) por camada de sedimento inteiro, na estação I.

A variação mensal da concentração de nitratos (Figura 3.16) reflectiu a dinâmica apresentada na figura anterior. Sazonalmente, há a salientar a existência de três períodos distintos na dinâmica dos nitratos: Outono (Outubro a Dezembro);

Inverno e Primavera (Janeiro a Maio) e Verão (Junho a Setembro). Nestes períodos foram registados valores mínimos em Junho ($0,4 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”) e máximos nos meses de Novembro ($6,6 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”), Abril ($5,8 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”) e Agosto ($2,5 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”).

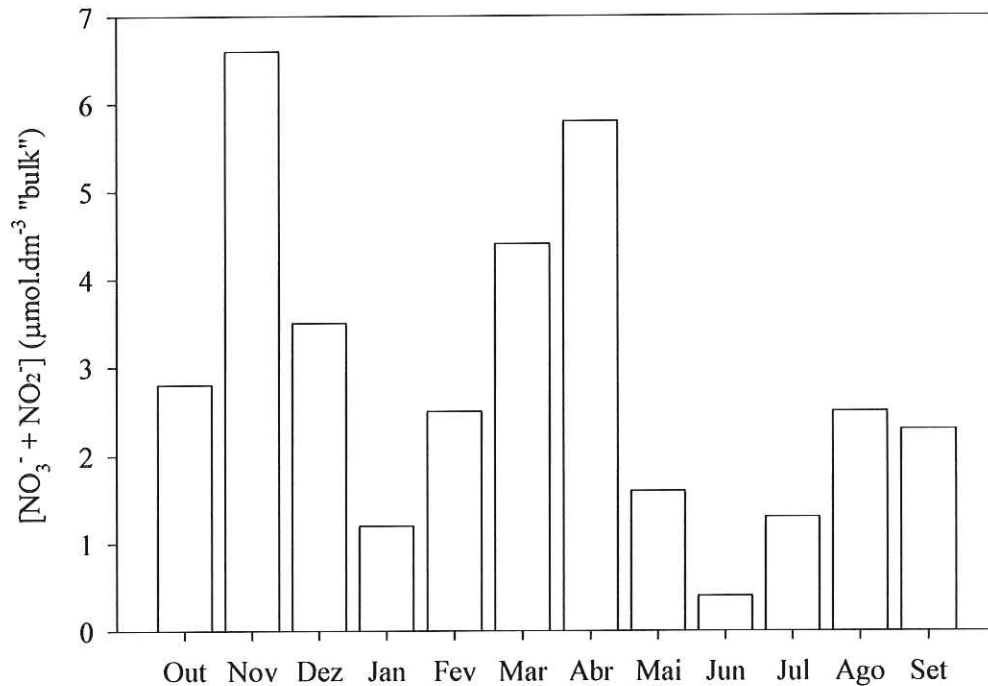


Figura 3.16: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos nitratos ($[\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-]$ ($\mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”)) do sedimento inteiro, na estação I.

Em relação à reserva de azoto no sedimento, há a salientar que a fracção mais reduzida (amónia) apresentou, em geral, concentrações mais elevadas numa ordem de grandeza, do que a fracção oxidada (nitratos).

A distribuição dos fosfatos dissolvidos em profundidade (Figura 3.17) apresentou uma dinâmica bem definida e dividida em três períodos: meses de Outono e Inverno; meses de Primavera e Verão e o mês de Setembro de 2001. No primeiro período, entre Outubro de 2000 e Fevereiro de 2001, registaram-se os valores mais altos nas concentrações de fosfatos, as quais oscilaram ao longo das várias camadas. A partir de Março, e durante os restantes meses até Agosto, o perfil, em profundidade, das concentrações de fosfatos não variou muito, sendo os seus valores, geralmente inferiores a $1 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”. No mês de Setembro, registou-se um aumento brusco na concentração de fosfatos, na camada entre os 4 e 7 centímetros, o que parece indicar uma dinâmica semelhante à do primeiro período.

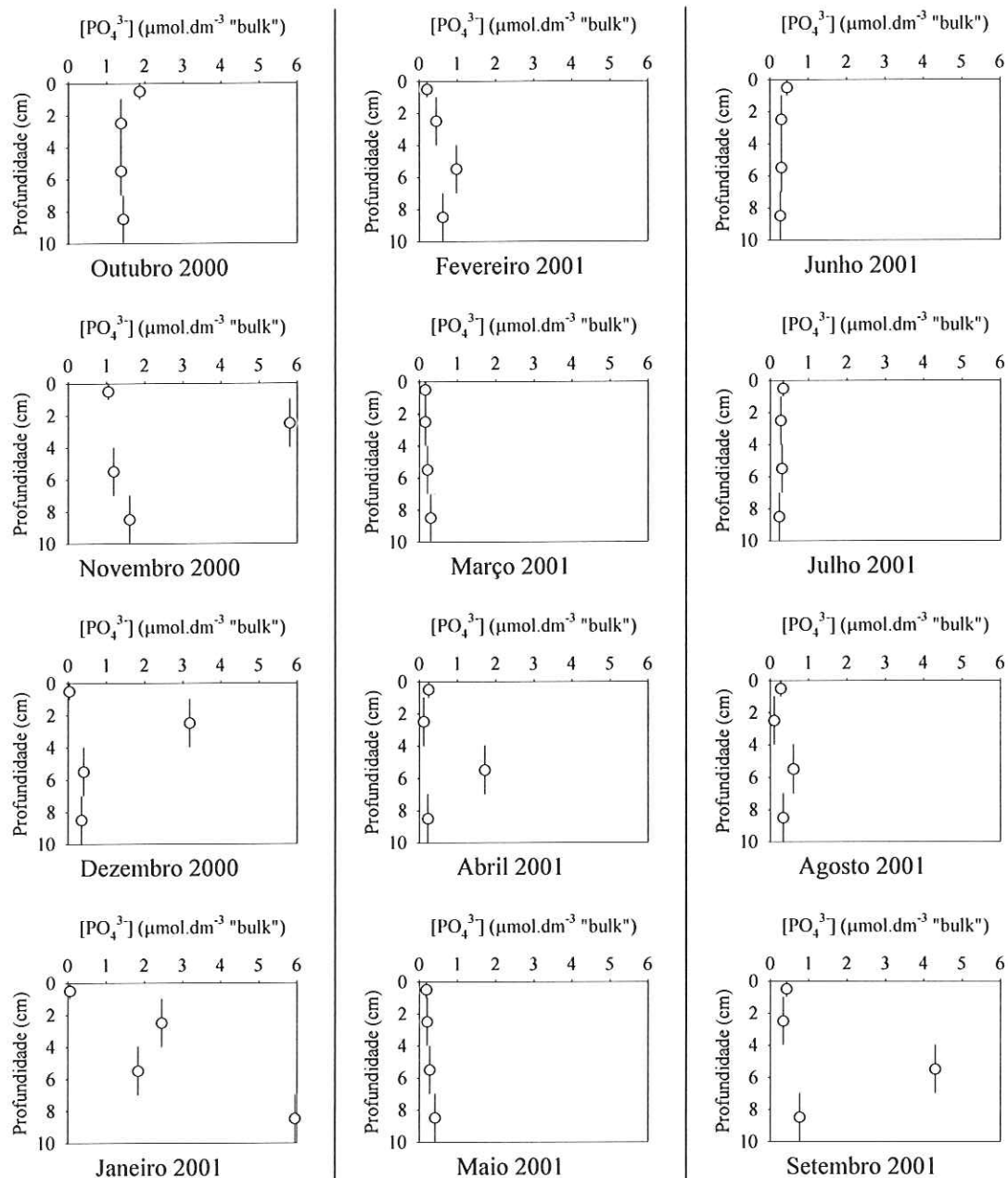


Figura 3.17: Variação da concentração de fosfatos ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk") por camada de sedimento, na estação I.

A dinâmica descrita anteriormente reflectiu-se na variação sazonal da concentração dos fosfatos, dissolvidos na água intersticial do sedimento (Figura 3.18). Também aqui se registaram os valores mais elevados entre os meses de Outono e Fevereiro, tendo os meses de Março a Agosto evidenciado as concentrações mais baixas de fosfatos. O aumento da concentração deste nutriente no mês de Setembro pareceu apontar para uma repetição do ciclo anual. É de salientar a complementaridade entre as variações dos fosfatos e a da razão entre o azoto e o fósforo (N/P) (Figura 3.19).

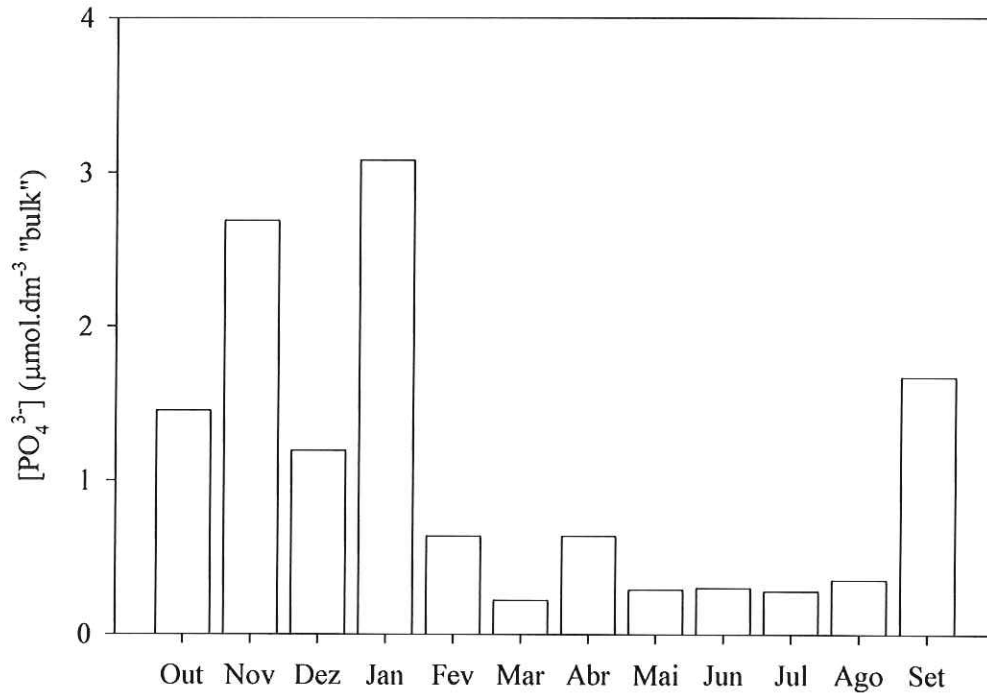


Figura 3.18: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos valores dos fosfatos ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk") no sedimento inteiro, na estação I.

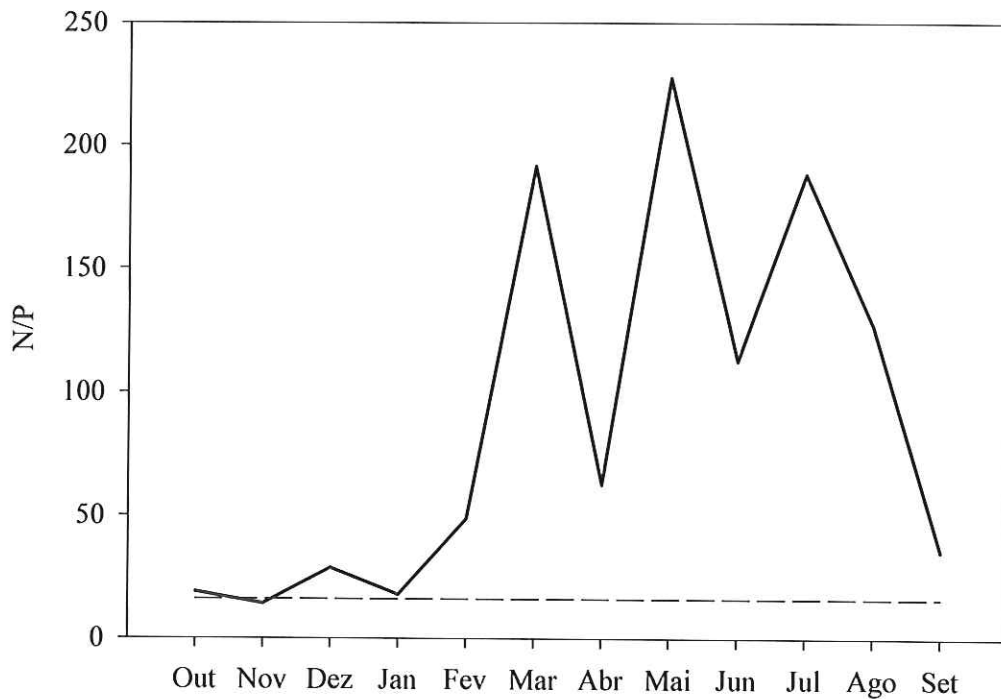


Figura 3.19: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos valores da razão entre o azoto e o fósforo, na estação I (a linha a tracejado representa o valor de $N/P=16$).

Este último parâmetro indicou, que a produção primária do sistema em estudo possui uma limitação pelo fósforo, durante quase todo o período de amostragem (Figura 3.19). Tal limitação foi menor durante os meses de Outubro a Janeiro, quando os valores da razão N/P se aproximaram ao valor teórico de 16, tendo o valor mínimo sido observado no mês de Novembro (N/P=14).

1.3.3. Microfitobentos

A análise taxonómica das amostras de microfitobentos revelou uma dominância quase absoluta de Diatomáceas Pennales sobre os outros taxa (Quadro 3.2). Os géneros mais observados foram *Tabellaria*, *Navicula* e *Pleurosigma*.

Quadro 3.2: Variação mensal da composição taxonómica do microfitobentos, na estação I.

Grupo	Género	2000			2001									
		Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	
Diatomáceas Pennales	<i>Tabellaria</i>													
	<i>Fragilaria</i>													
	<i>Navicula</i>													
	<i>Pleurosigma</i>													
	<i>Diploneis</i>													
	<i>Cocconeis</i>													
	<i>Cylindrotheca</i>													
	<i>Nitzschia</i>													
Cianofíceas														

A distribuição da densidade mássica dos fitopigmentos mostrou uma tendência decrescente da superfície para o fundo (Figura 3.20). Os valores de feopigmentos foram sempre mais elevados do que os de clorofila *a*. De Outubro a Abril, os valores de clorofila *a* foram sempre mais elevados à superfície. Por outro lado, durante os meses restantes, os teores de clorofila *a* aumentaram progressivamente nas camadas mais profundas e foram diminuindo à superfície.

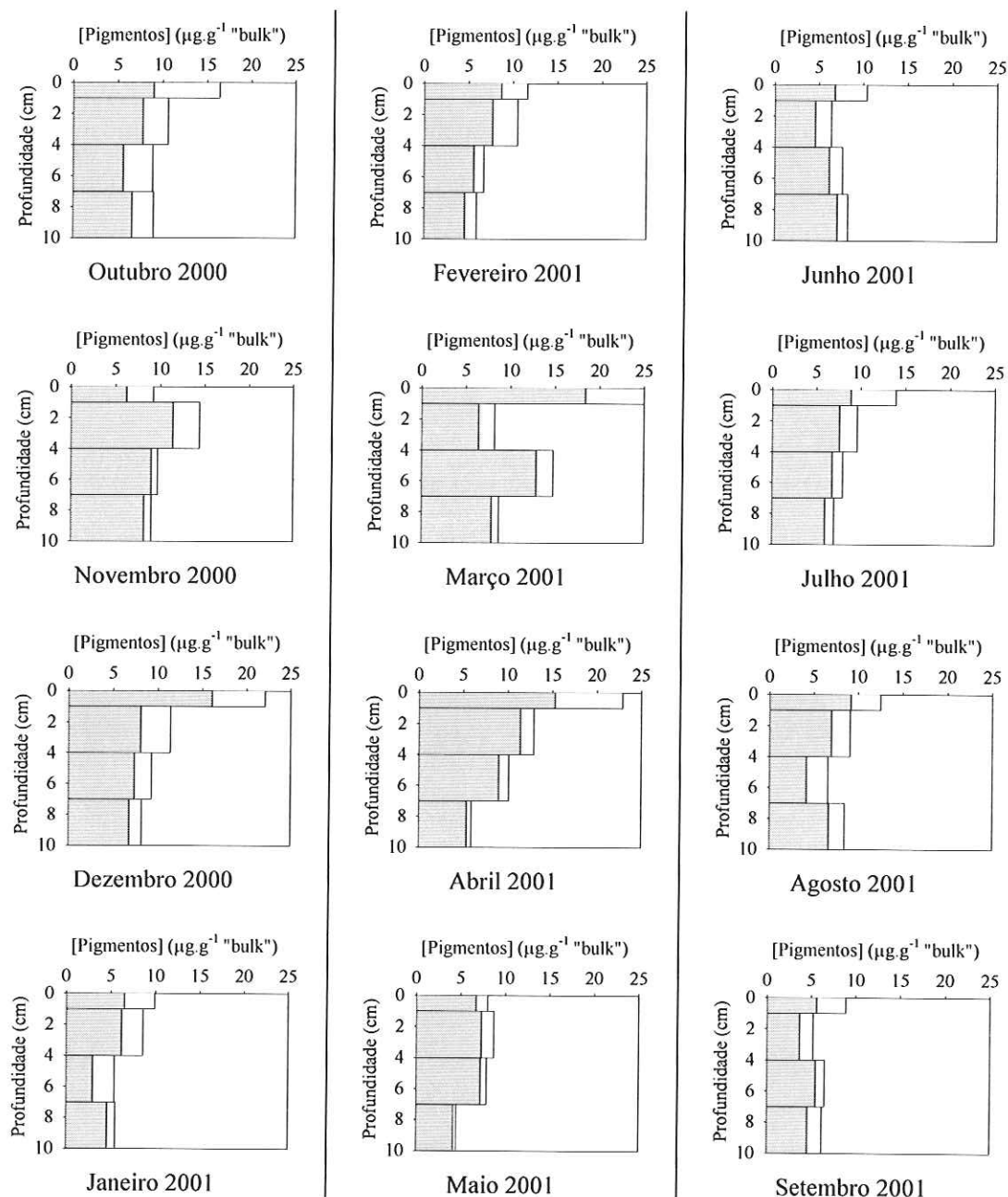


Figura 3.20: Variação dos valores de clorofila *a* (branco) e feopigmentos (cinzento) ($\mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk") por camada de sedimento inteiro, na estação I.

Há a salientar a observação de valores muito baixos de clorofila *a*, em todas as camadas de sedimento, durante o mês de Maio.

A variação sazonal dos teores de fitopigmentos (Figura 3.21) apresentou valores máximos nos meses de Março ($12,1 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk") e Abril ($11,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk") e mínimos nos meses de Janeiro ($6,8 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk") e Setembro ($6,2 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk").

É de salientar que a variação sazonal dos feopigmentos pareceu ter acompanhado a da matéria orgânica, durante o período englobado pela amostragem.

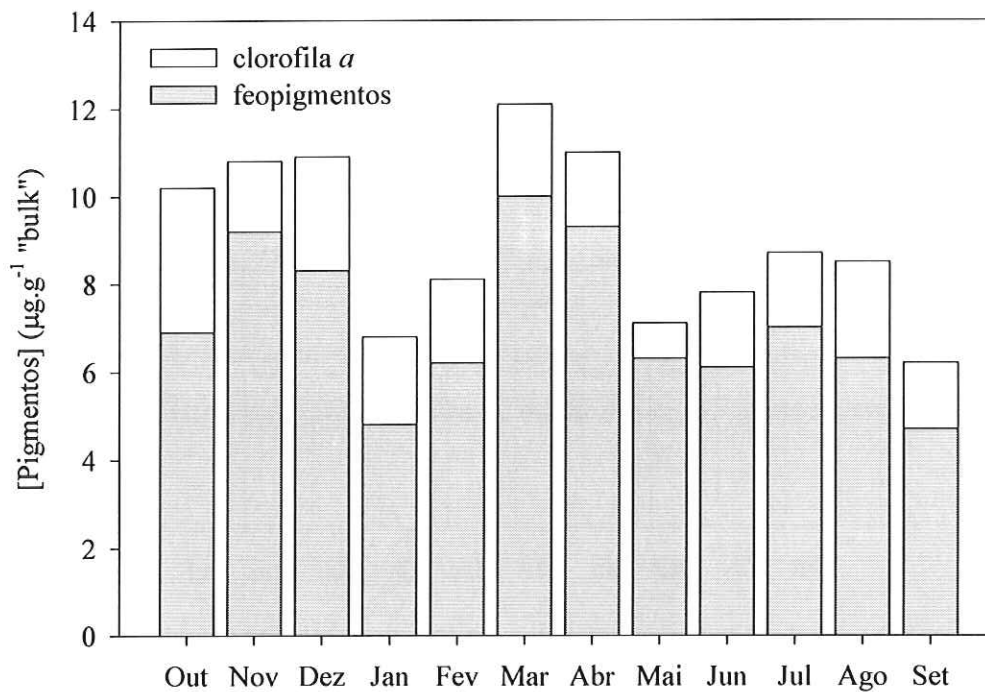


Figura 3.21: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos valores da clorofila *a* (branco) e dos feopigmentos (cinzento) ($\mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk") no sedimento interiro, na estação I.

A análise da clorofila *a* da 1ª camada do sedimento, desde a superfície até ao 1º centímetro, permitiu observar, de uma forma mais clara, as variações da clorofila *a* ao longo do período de amostragem (Figura 3.22). A clorofila *a* à superfície apresentou uma dinâmica com valores mais baixos durante o Inverno e Verão, e valores máximos nos meses de Outubro ($7,3 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk"), Março ($7,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk") e Abril ($7,7 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk"). Há ainda a salientar o valor mínimo de $1,3 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk", registado no mês de Maio. É interessante notar que as dinâmicas mensais, quer dos fitopigmentos, quer da clorofila *a* total, quer da clorofila *a* da 1ª camada, acompanharam a variação sazonal da concentração em nitratos.

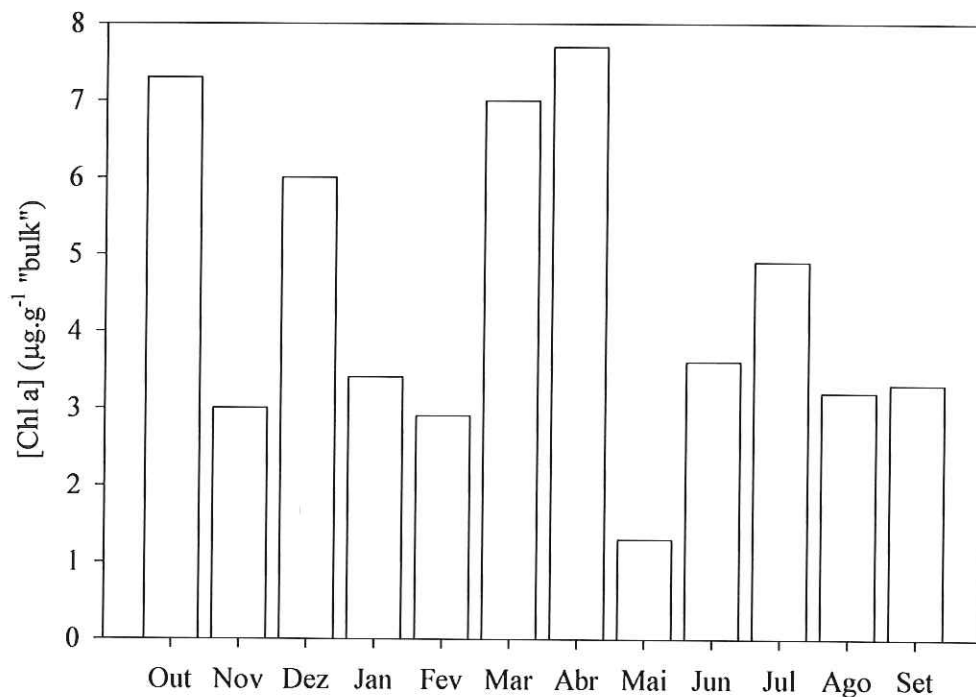


Figura 3.22: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos valores da clorofila *a* da 1ª camada do sedimento (0 a 1 cm) (µg.g⁻¹ "bulk"), na estação I.

1.3.4. Ulvales

Na estação I, apenas foram observadas algas entre os meses de Novembro e Abril (Figura 3.23), tendo o seu índice de cobertura variado entre 95 % (Dezembro e Janeiro) e 54 % (Abril).

Nesta estação, das Ulvales amostradas apenas foram observadas algas do género *Enteromorpha*, não havendo vestígios de qualquer outro *taxon*.

A variação mensal da biomassa de *Enteromorpha* apresentou um valor máximo no mês de Janeiro de 51,0 g.m⁻²; e valores nulos em Outubro e entre Maio e Setembro (Figura 3.24). É de salientar que os valores máximos de biomassa coincidiram com os picos das concentrações dos nutrientes e com os valores mais baixos da clorofila *a*. *Enteromorpha* apresentou um valor de biomassa média anual (B) de 14,4 g.m⁻²; um valor de produção anual (P) de 53,3 g.m⁻².a⁻¹; e uma razão P/B de 3,7 a⁻¹.

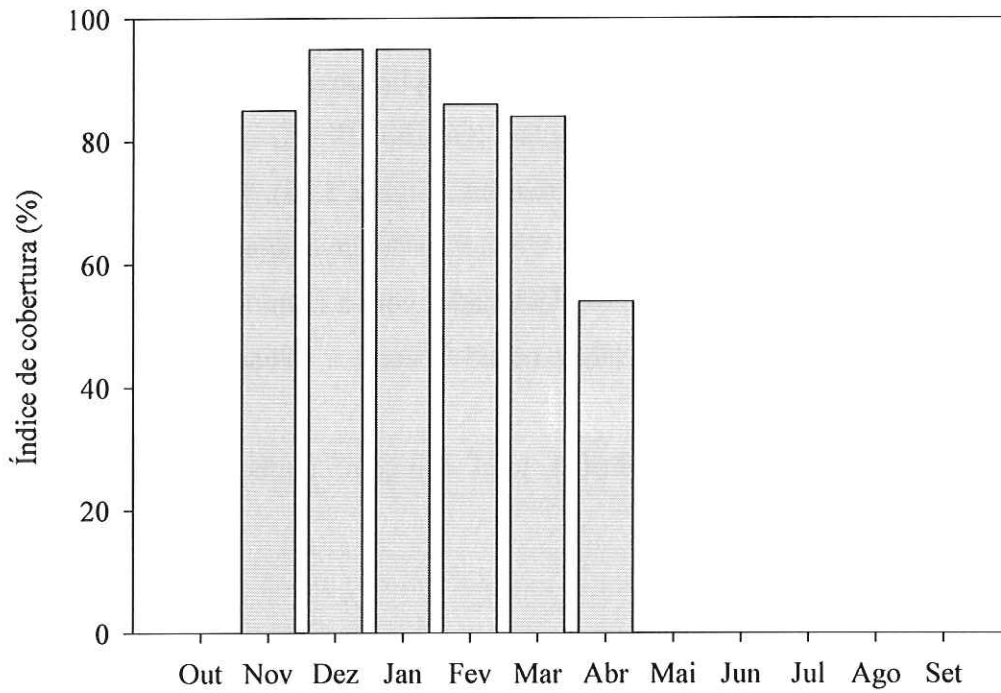


Figura 3.23: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos valores do índice de cobertura (%) de Ulvales na estação I.

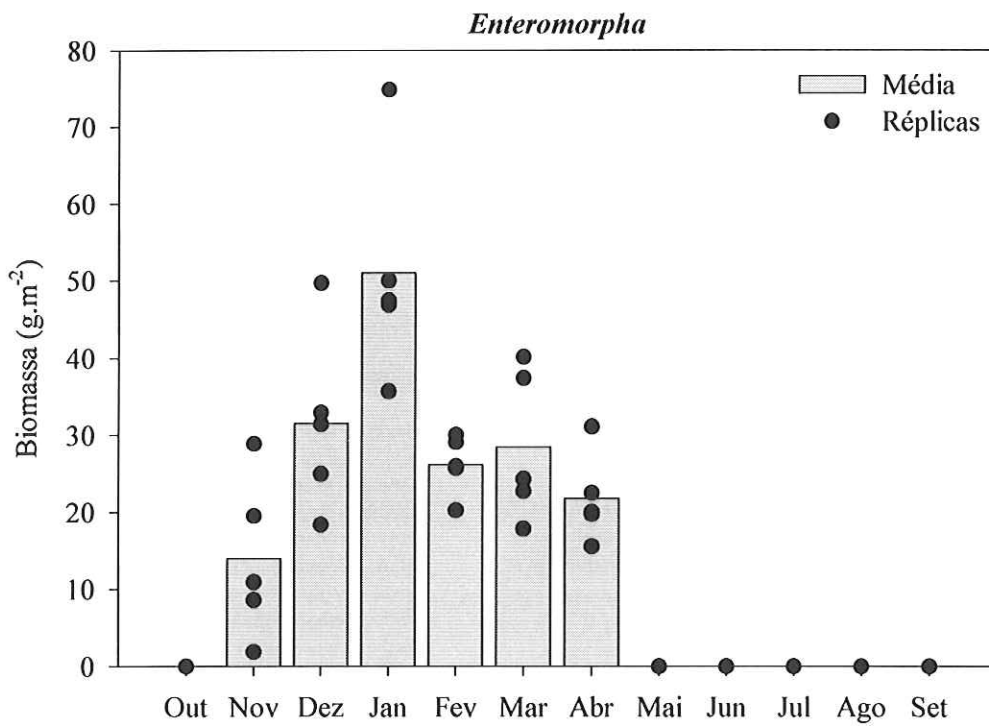


Figura 3.24: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos valores de biomassa de *Enteromorpha* (g.m⁻²) na estação I.

1.3.5. Análise estatística

A partir do teste de correlação de Spearman aplicado a 23 variáveis da estação I, foi possível obter uma matriz triangular (Quadro III no Anexo II), que foi posteriormente transformada num dendrograma (Figura 3.25). Da observação desta figura há a salientar que as macroalgas Ulvales estão inversamente correlacionadas com a temperatura, e directamente correlacionadas com a humidade e a precipitação. Também existe uma elevada correlação negativa entre a radiação solar e Ulvales, embora não seja significativa.

A matéria orgânica e a clorofila total denotam, também, uma correlação positiva.

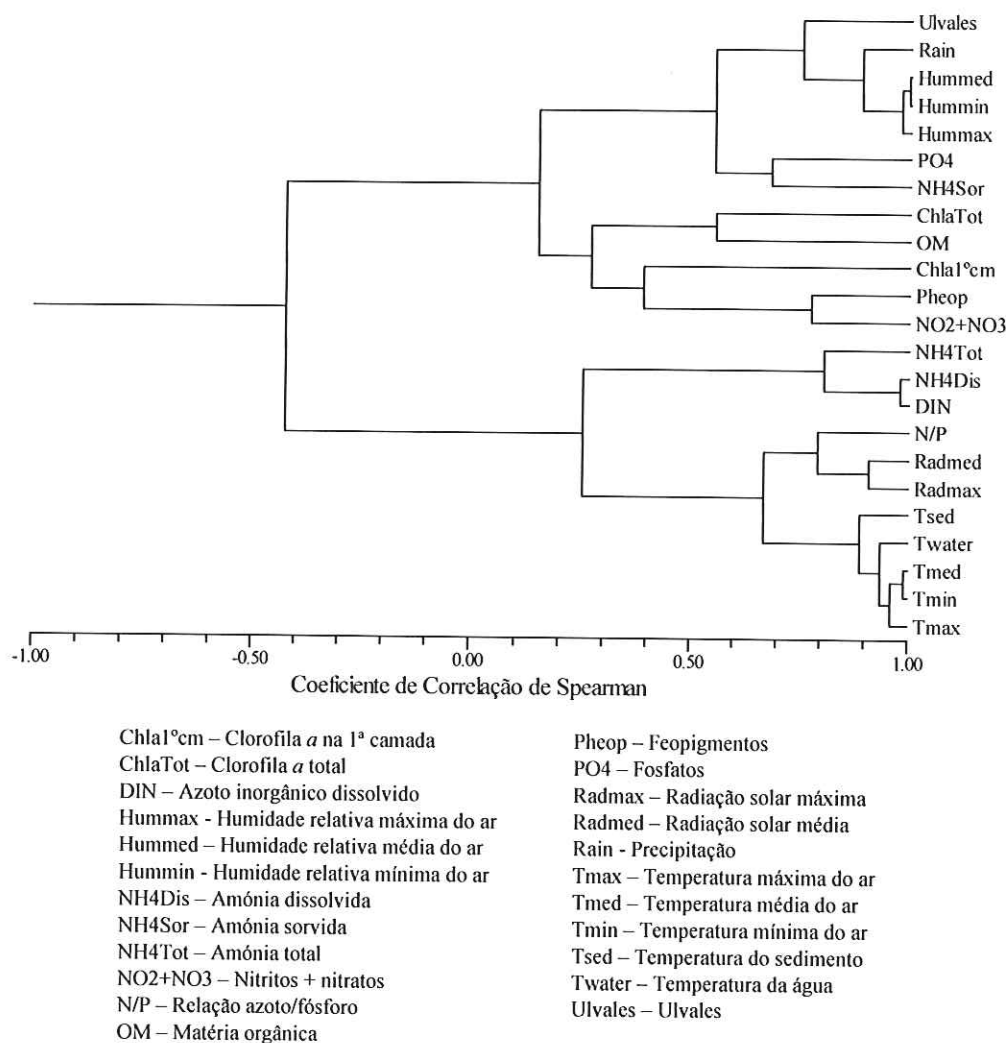


Figura 3.25: Dendrograma dos resultados da correlação de Spearman, para os dados bióticos e abióticos referentes à estação I

A reserva de azoto está muito correlacionada com a amónia total, especialmente com a amónia dissolvida, o que seria de esperar, uma vez que este nutriente, na forma dissolvida, constitui a fracção dominante das espécies azotadas quantificadas.

Os fosfatos estão correlacionados negativamente com a radiação solar e com a relação N/P, tal como a amónia sorvida, a qual está por sua vez correlacionada positivamente com a humidade.

Como seria de esperar existe uma forte correlação positiva entre a radiação e a temperatura, tal como entre a humidade e a precipitação, sendo a correlação entre estes dois grupos significativamente negativa.

1.4. Estação II

1.4.1. Sedimento

A porosidade apresentou uma tendência para a diminuição dos seus níveis com a profundidade (Quadro 3.3), apresentando valores ligeiramente mais baixos no Verão, principalmente à superfície. Registaram-se valores máximos de 0,83 na camada entre a superfície e o primeiro centímetro no meses de Dezembro e Abril; o valor mínimo foi de 0,49 no mês de Março (camada 7-10).

Quadro 3.3: Variação mensal da porosidade por camada de sedimento inteiro na estação II.

Ano	Mês	Camadas (cm)			
		0-1	1-4	4-7	7-10
2000	Outubro	0,79	0,74	0,59	0,53
	Novembro	0,74	0,70	0,53	0,57
	Dezembro	0,83	0,65	0,63	0,53
2001	Janeiro	0,75	0,76	0,51	0,55
	Fevereiro	0,82	0,75	0,69	0,61
	Março	0,76	0,69	0,61	0,49
	Abril	0,83	0,68	0,69	0,57
	Maio	0,76	0,73	0,68	0,61
	Junho	0,69	0,68	0,67	0,55
	Julho	0,62	0,59	0,57	0,51
	Agosto	0,69	0,67	0,68	0,67
	Setembro	0,78	0,70	0,58	0,60

A variação dos teores de matéria orgânica em profundidade, na estação II, apresentou valores ligeiramente superiores aos da estação I (Figura 3.26).

Em Outubro e Novembro, a matéria orgânica apresentou valores mais baixos à superfície e mais elevados em profundidade. No mês de Dezembro esta tendência inverteu-se. A partir desse mês, os teores de matéria orgânica foram aumentando nas camadas sucessivamente mais profundas, até ao restabelecimento, em Agosto, do perfil inicial.

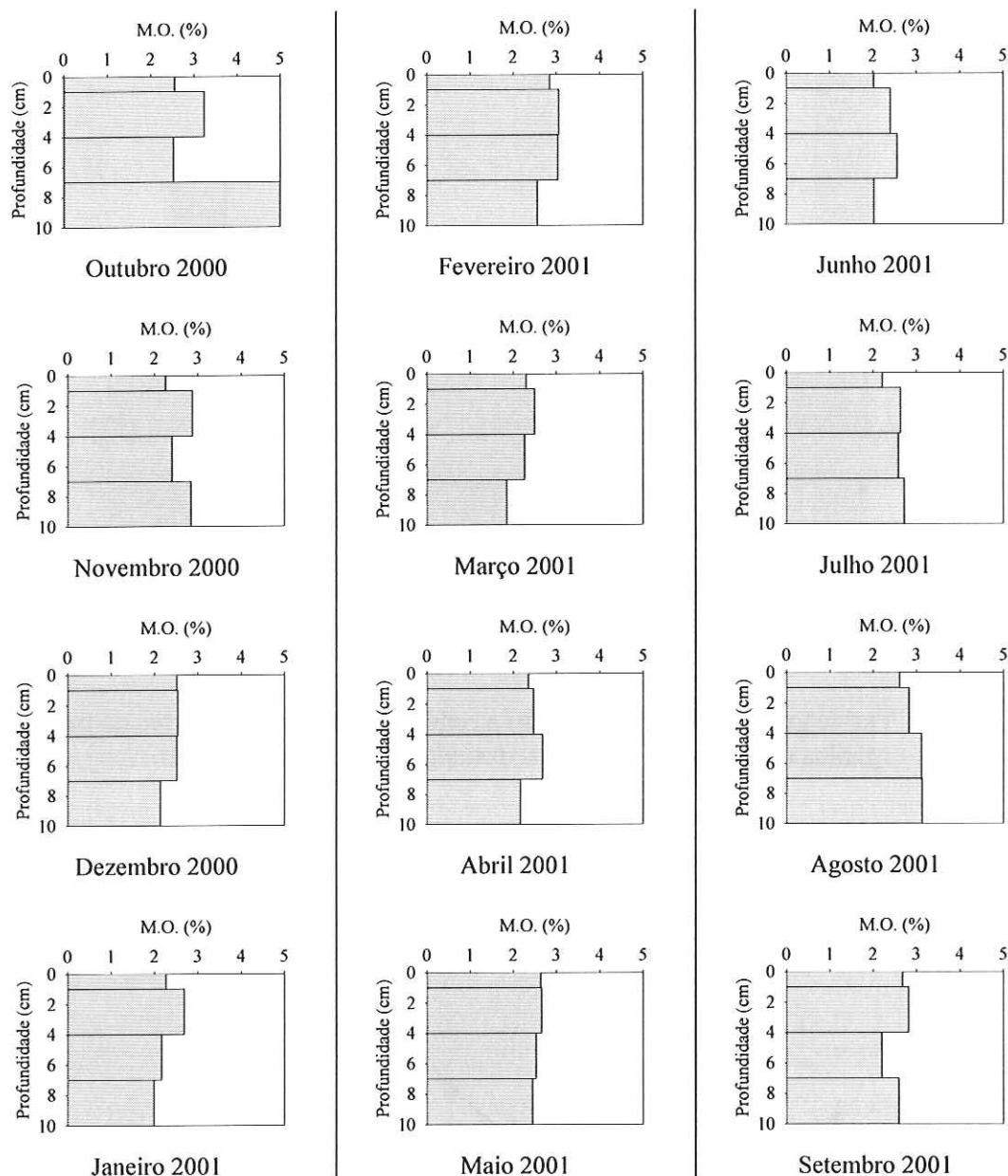


Figura 3.26: Variação da matéria orgânica (% peso húmido) por camada de sedimento inteiro, na estação II.

A evolução mensal da matéria orgânica (Figura 3.27) apresentou valores máximos nos meses de Outubro (3,49 %), Fevereiro (2,89 %) e Agosto (2,98 %); e valores mínimos em Janeiro (2,28 %), Março (2,22 %) e Junho (2,30 %).

A variação mensal da temperatura do sedimento apresenta, como seria de esperar, valores mais elevados no Verão e mais baixos no Inverno (Figura 3.28). A temperatura mínima foi registada no mês de Janeiro e foi de 13,5 °C; tendo a máxima (23,5 °C) sido observada durante o mês de Setembro.

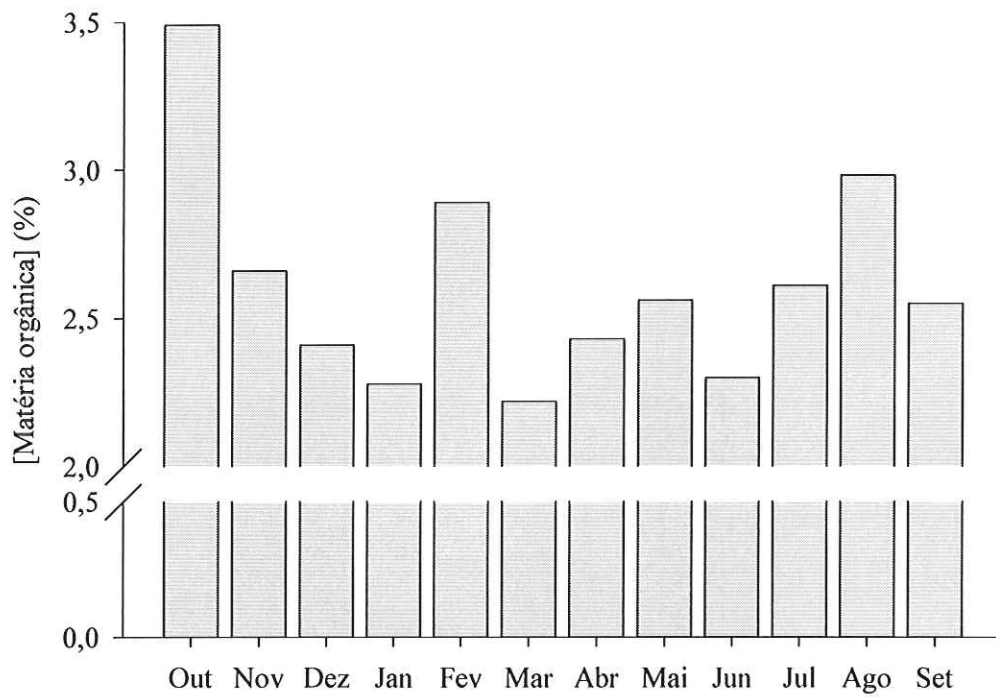


Figura 3.27: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) dos valores da matéria orgânica (% peso húmido) no sedimento inteiro, na estação II.

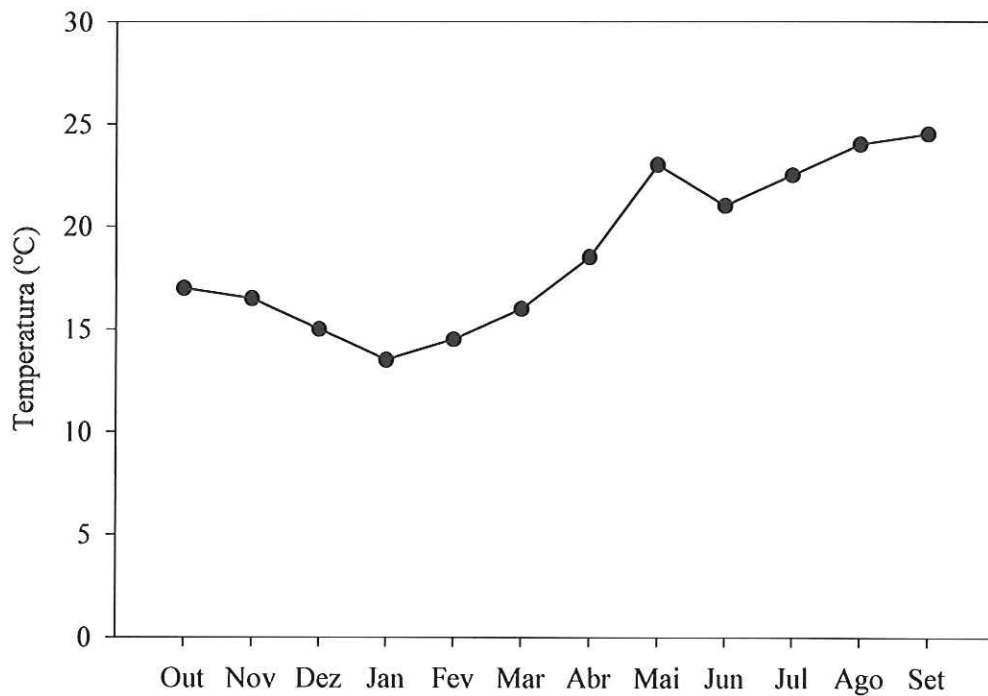


Figura 3.28: Variação mensal da temperatura (°C) do sedimento, na estação II.

1.4.2. Nutrientes

A variação dos teores de amónia, em profundidade, apresentou uma dinâmica semelhante à da estação I. Os menores valores de concentração foram sempre observados à superfície, tendo a amónia dissolvida valores mais elevados do que a sorvida. Também nesta estação se poderam estabelecer dois períodos distintos: no Outono, com valores mais altos de amónia sorvida; e nos restantes meses, com uma forte dominância da fracção dissolvida sobre a sorvida (Figura 3.29).

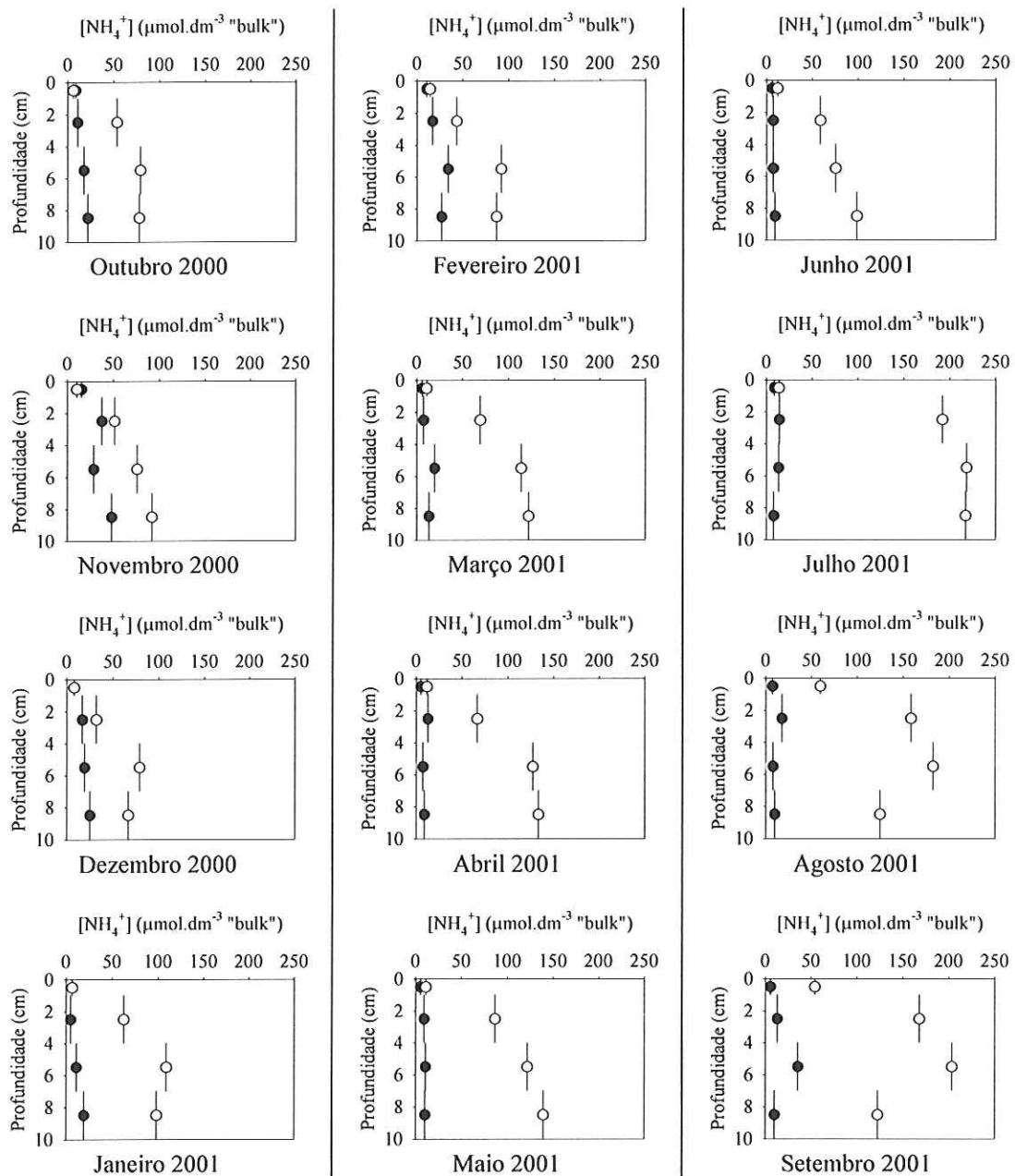


Figura 3.29: Variação da concentração de amónia dissolvida (o) e sorvida (●) ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk") por camada de sedimento inteiro, na estação II.

A evolução mensal da amónia total (Figura 3.30) apresentou valores máximos nos meses de Julho ($201,6 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”) e Setembro ($172,3 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”); e mínimos nos meses de Outubro ($80,2 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”), Dezembro ($73,7 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”) e Junho ($79,6 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”). Por outro lado, observaram-se os valores mais elevados de amónia sorvida no Outono ($36,0 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”, em Novembro) e Inverno ($24,7 \mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”, em Fevereiro).

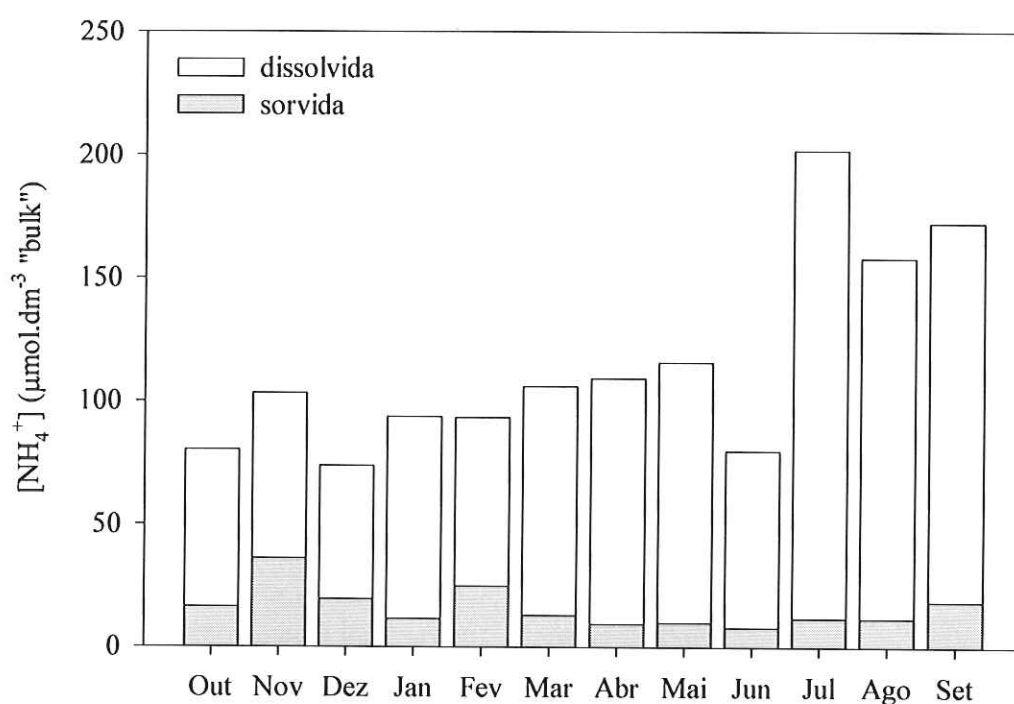


Figura 3.30: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) da amónia dissolvida (branco) e sorvida (cinzento) ($\mu\text{mol.dm}^{-3}$ “bulk”) no sedimento inteiro, na estação II.

A variação das concentrações de nitratos, em profundidade, apresentaram três padrões distintos de variação (Figura 3.31). O primeiro nos meses de Outono (Outubro a Dezembro), com valores mais elevados da concentração de nitratos, especialmente nas camadas superficiais. O segundo padrão registou-se nos meses de Janeiro a Abril, onde as concentrações de nitratos foram menores, mas geralmente mais elevadas à superfície. O último padrão ocorreu nos meses de Verão com uma homogeneidade de valores de nitratos ao longo da coluna de sedimento.

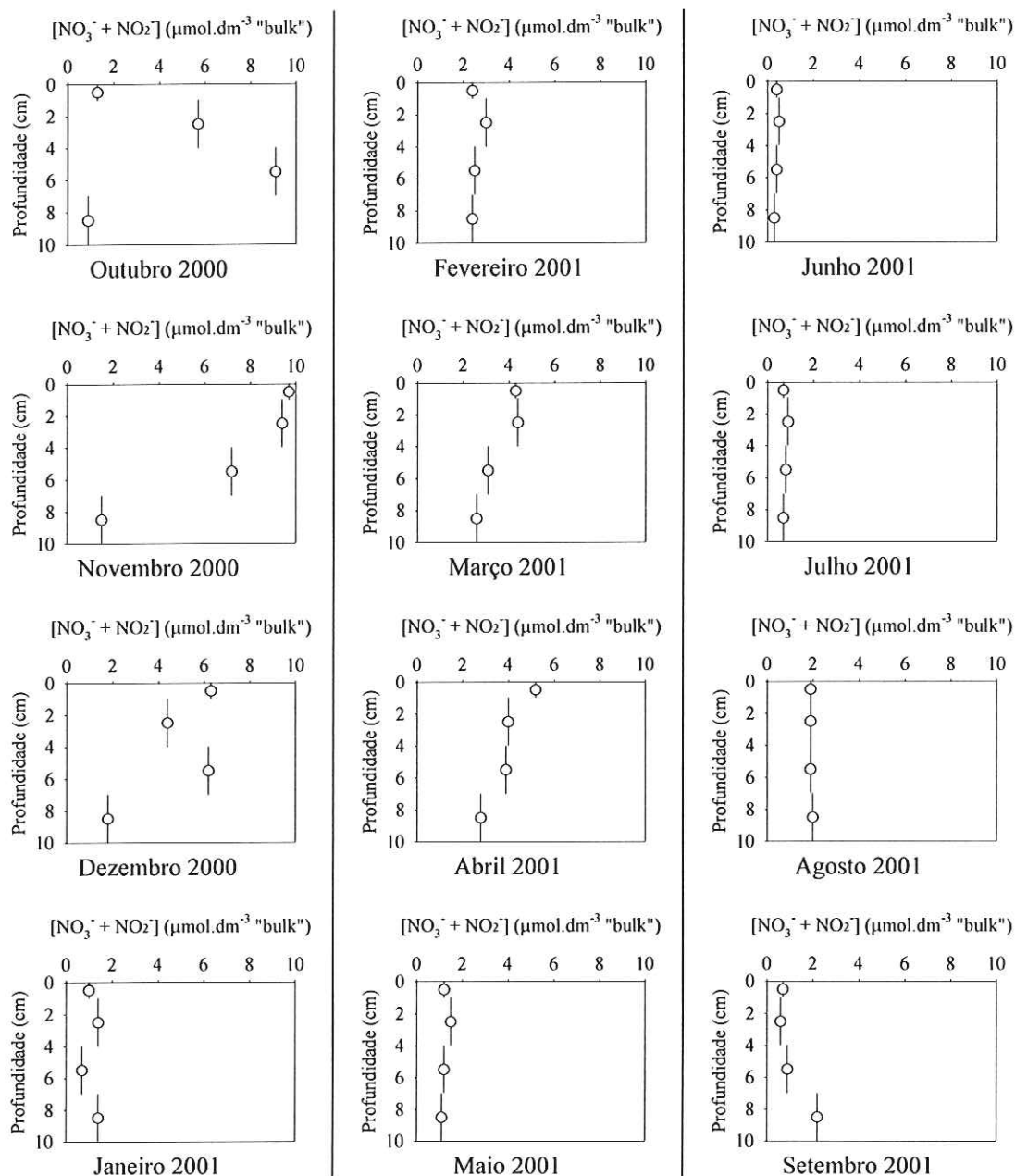


Figura 3.31: Variação da concentração de nitratos ($[\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-]$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk")) por camada de sedimento inteiro, na estação II.

A evolução mensal das concentrações médias de nitratos apresentou três picos em diferentes alturas do ano (Figura 3.32): um em Novembro ($6,4 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk"); outro nos meses de Março e Abril ($3,6$ e $3,7 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk", respectivamente) e o último no mês de Agosto ($1,9 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk").

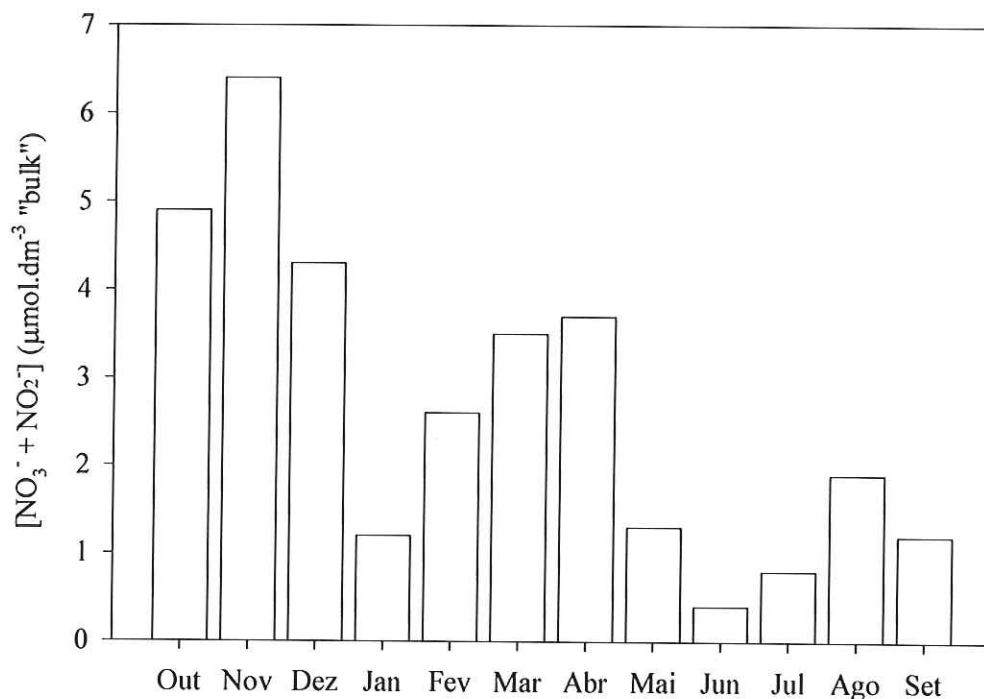


Figura 3.32: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) da concentração dos nitratos ($[\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-]$ ($\mu\text{mol.dm}^{-3}$ "bulk")) no sedimento inteiro, na estação II.

Tal como na estação I, observa-se que a reserva de azoto do sedimento da estação II foi dominada pelos compostos reduzidos, sendo a fracção da amónia total maior nesta estação do que na estação I.

Os ortofosfatos apresentaram uma dinâmica em profundidade bem definida, com concentrações muito baixas em todas as camadas do sedimento entre os meses de Dezembro a Maio. Nos restantes meses observaram-se valores mais elevados de fosfatos, especialmente nas camadas subsuperficiais (Figura 3.33).

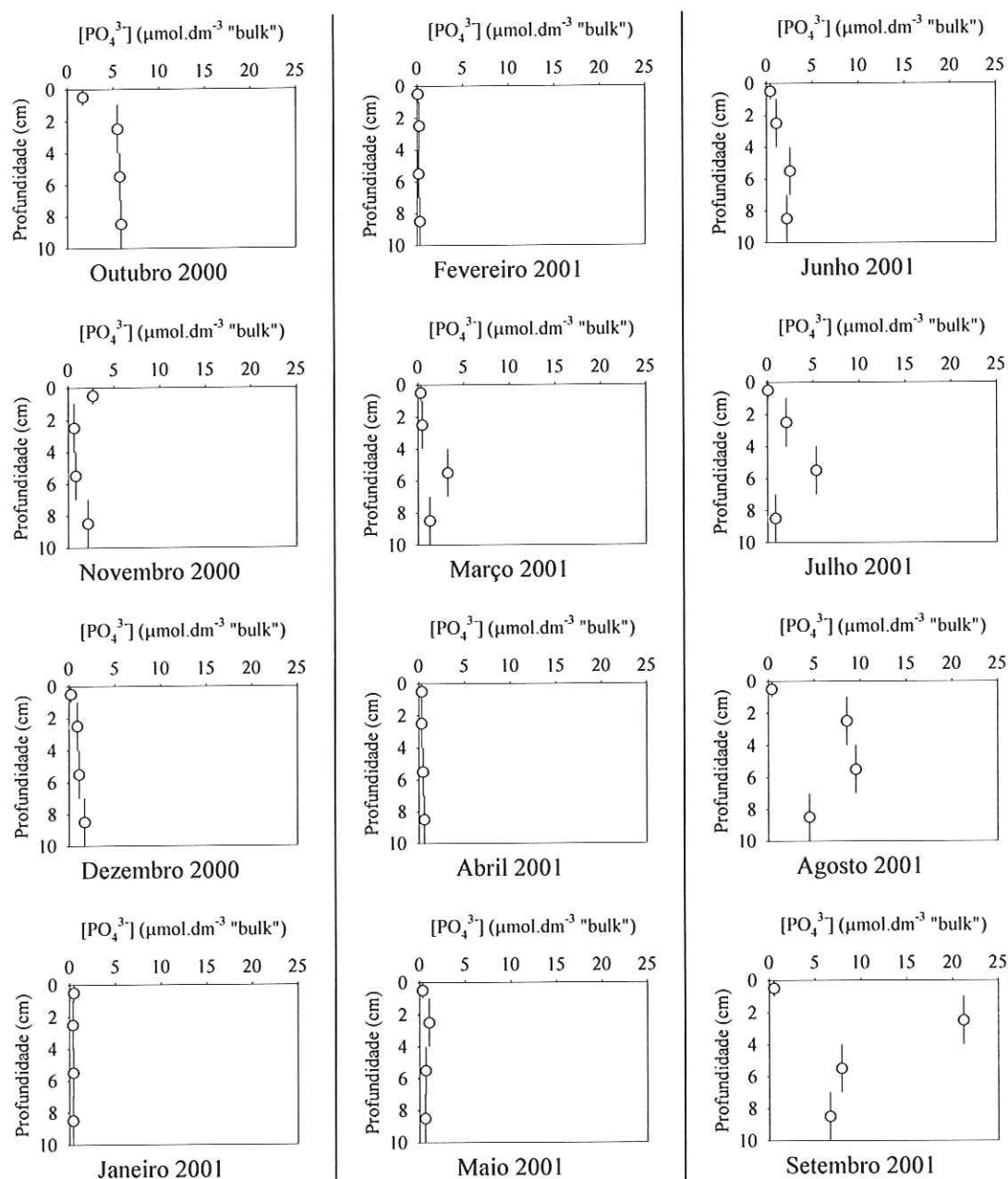


Figura 3.33: Variação da concentração dos fosfatos ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk") por camada de sedimento inteiro, na estação II.

A dinâmica descrita anteriormente reflectiu-se na variação sazonal dos valores de ortofosfatos (Figura 3.34), com valores máximos no início e final do período de estudo (Outubro de 2000 e Setembro de 2001), e com valores muito mais baixos nos restantes meses. Os ortofosfatos apresentaram concentrações máximas em Outubro de 2000 ($5,30 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk") e Setembro de 2001 ($10,81 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk"), e mínima em Fevereiro ($0,25 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk"). Esta dinâmica foi evidenciada na sua

complementaridade com a variação mensal da razão entre o azoto e o fósforo (N/P) (Figura 3.35).

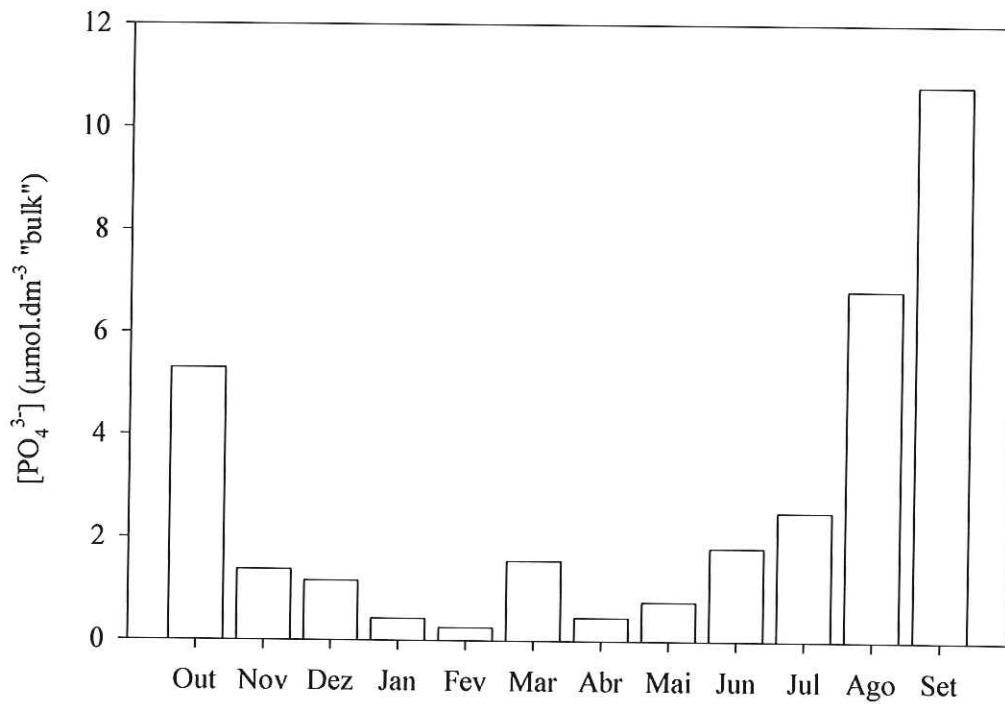


Figura 3.34: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) das concentrações dos fosfatos ($\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ "bulk") no sedimento inteiro, na estação II.

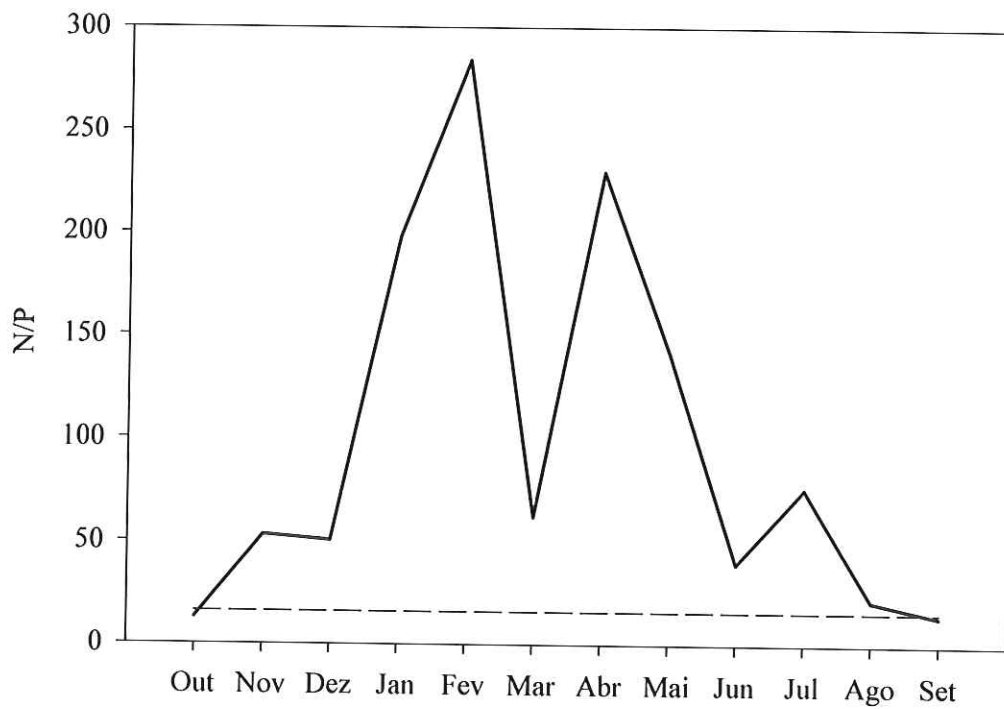


Figura 3.35: Variação mensal (Outubro 2000 a Setembro 2001) da relação entre o azoto e o fósforo (N/P), na estação II (a linha a tracejado representa o valor de N/P=16).

Tal como na primeira estação de amostragem, também na estação II o fósforo foi o elemento limitante durante quase todo o período de estudo (Figura 3.35). Apenas nos meses de Outubro de 2000 (N/P=13) e Setembro de 2001 (N/P=14,3) é que os valores da relação entre o azoto e o fósforo se aproximaram do valor teórico de N/P=16.

1.4.3. Microfitobentos

A análise taxonómica das amostras de microfitobentos revelou, tal como para a estação I, uma dominância quase absoluta das espécie de Diatomáceas Pennales, sobre os outros taxa (Quadro 3.4). Os géneros mais observados foram *Tabellaria*, *Navicula* e *Pleurosigma*.

Quadro 3.4: Variação mensal da composição taxonómica do microfitobentos na estação II.

Grupo	Género	2000			2001								
		Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
Diatomáceas Pennales	<i>Tabellaria</i>	■		■	■						■	■	
	<i>Fragilaria</i>												
	<i>Navicula</i>	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■
	<i>Pleurosigma</i>	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	<i>Diploneis</i>									■	■		
	<i>Cocconeis</i>								■	■			
	<i>Cylindrotheca</i>												■
	<i>Nitzschia</i>												■
Cianofíceas		■	■							■			

Embora a dinâmica dos fitopigmentos tenha evidenciado valores de feopigmentos sistematicamente mais elevados, os valores de clorofila *a* foram mais altos do que na estação I. Os teores de fitopigmentos (Figura 3.36) apresentaram níveis máximos nos meses de Inverno, especialmente no mês de Dezembro (23,9 µg.g⁻¹ “bulk”). Os feopigmentos apresentam valores mais elevados nos meses de Inverno e Primavera, e valores mais baixos nos meses de Verão. Nos meses de Verão a clorofila *a* apresentou teores mais altos em camadas mais profundas do sedimento.

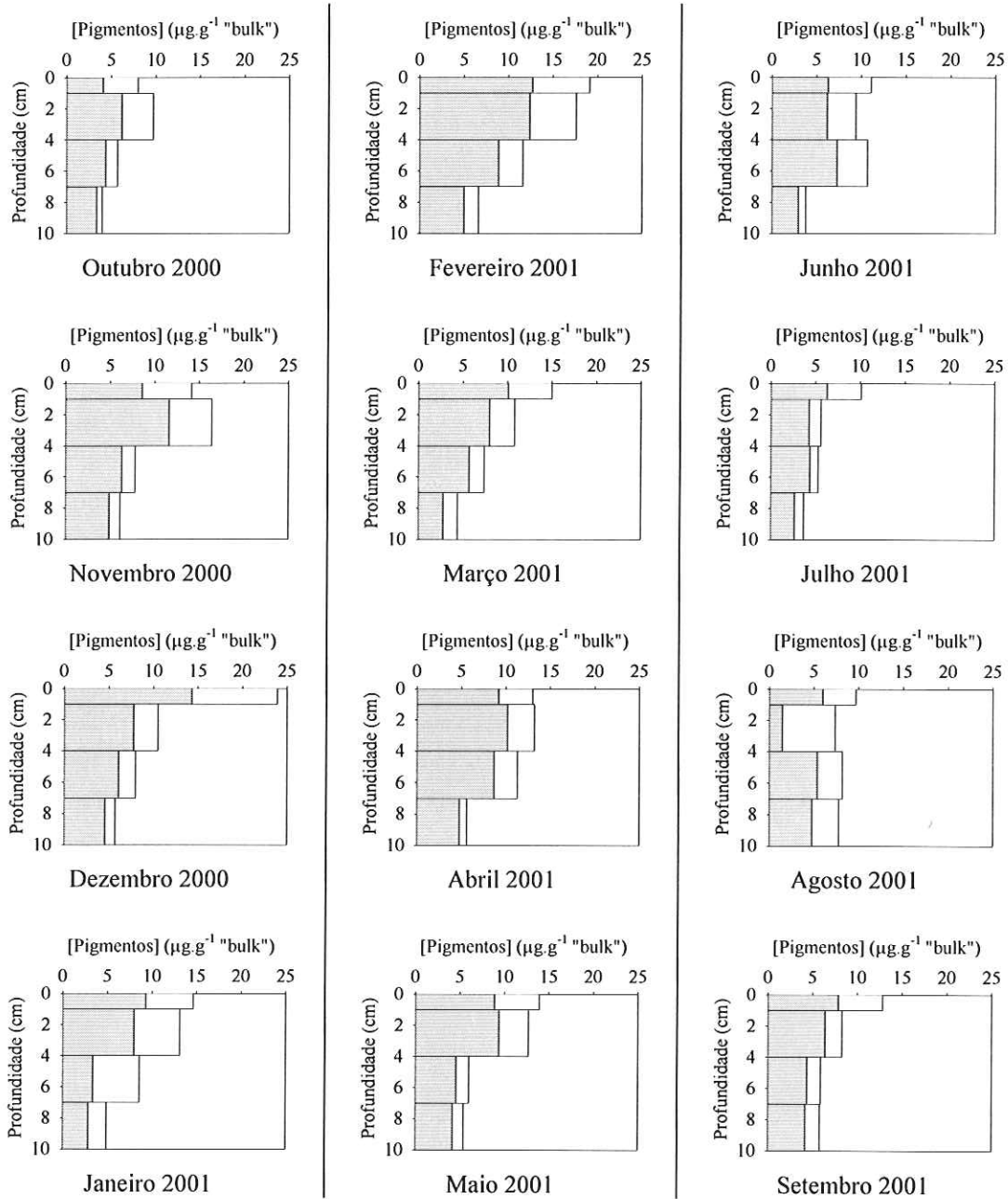


Figura 3.36: Variação dos valores de clorofila *a* (branco) e feopigmentos (cinzento) ($\mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk") por camada de sedimento inteiro, na estação II.

A variação mensal dos feopigmentos (Figura 3.37) apresentou o valor máximo no mês de Fevereiro ($9,2 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk"), e mínimos nos meses de Julho e Agosto ($4,1 \mu\text{g.g}^{-1}$ "bulk").