



APRH

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS
NUCLEO REGIONAL DO SUL

DEBATE
RIO GUADIANA
PASSADO PRESENTE FUTURO

**A IMPORTÂNCIA DOS FIXADORES DE AZOTO NA
MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA QUALIDADE DE ÁGUA
DO RIO GUADIANA**

Fernanda Rocha
João Ribeiro da Costa

A importância dos fixadores de azoto na modelação matemática da qualidade de água do Rio Guadiana

Fernanda Rocha
LNEC

João Ribeiro da Costa
UNINOVA

Sumário

Desde 1992 vêm sendo desenvolvidos trabalhos de investigação sobre a qualidade da água no rio Guadiana, com vista à compreensão dos fenómenos que aí ocorrem para possibilitar a análise e definição de soluções alternativas, nomeadamente em termos de negociação com Espanha.

O trabalho já realizado, nomeadamente a amostragem regular com uma periodicidade quinzenal durante o ano de 1993, com vista à modelação matemática, evidencia a necessidade de incluir as espécies aquáticas fixadoras de azoto atmosférico na modelação do rio. Nesta comunicação analisa-se o problema da eutrofização e apresentam-se os resultados iniciais de modelação do rio Guadiana, com especial ênfase na modelação das espécies fixadoras de azoto.

1. Objectivos

Pretende-se com esta comunicação apresentar sucintamente o trabalho que tem vindo a ser desenvolvido nos últimos 3 anos sobre a qualidade da água do rio Guadiana, com especial ênfase na componente de modelação matemática, demonstrando o seu potencial enquanto instrumento para diagnóstico da situação.

No âmbito do projecto MEDSPA foi levado a cabo um extenso programa de caracterização da qualidade da água do Guadiana, que se iniciou em 1992 com o reconhecimento do rio (Costa *et al.* 1992) e identificação dos principais problemas de qualidade da água, e se prolongou com a realização de colheitas quinzenais até ao final de 1993, tendo-se ainda efectuado em 1994 a medição do tempo de escoamento em alguns troços do rio.

Participaram activamente neste projecto a UNINOVA, a DGA e a UE entre outras entidades.

A análise dos dados de qualidade obtidos durante 1993 (Rocha, 1994) evidenciou que era impossível explicar a situação sem incluir as espécies aquáticas fixadoras de azoto atmosférico na modelação do rio. Ao longo desta comunicação apresentam-se alguns dos resultados obtidos demonstrando esta realidade.

2. Caracterização e identificação dos principais problemas de qualidade da água do rio Guadiana

Após o reconhecimento do rio Guadiana e das primeiras campanhas preliminares de caracterização da qualidade da água, concluiu-se que os problemas existentes não se deviam somente à degradação de cargas poluentes orgânicas, como originariamente se pensava, mas sobretudo ao nível de eutrofização do rio que atinge valores alarmantes.

A **eutrofização** é um processo caracterizado pelo crescimento excessivo de plantas aquáticas, até níveis que interferem com os usos de água desejados. Na Figura 1 apresenta-se um esquema muito simplificado dos principais factores que intervêm no processo da eutrofização.

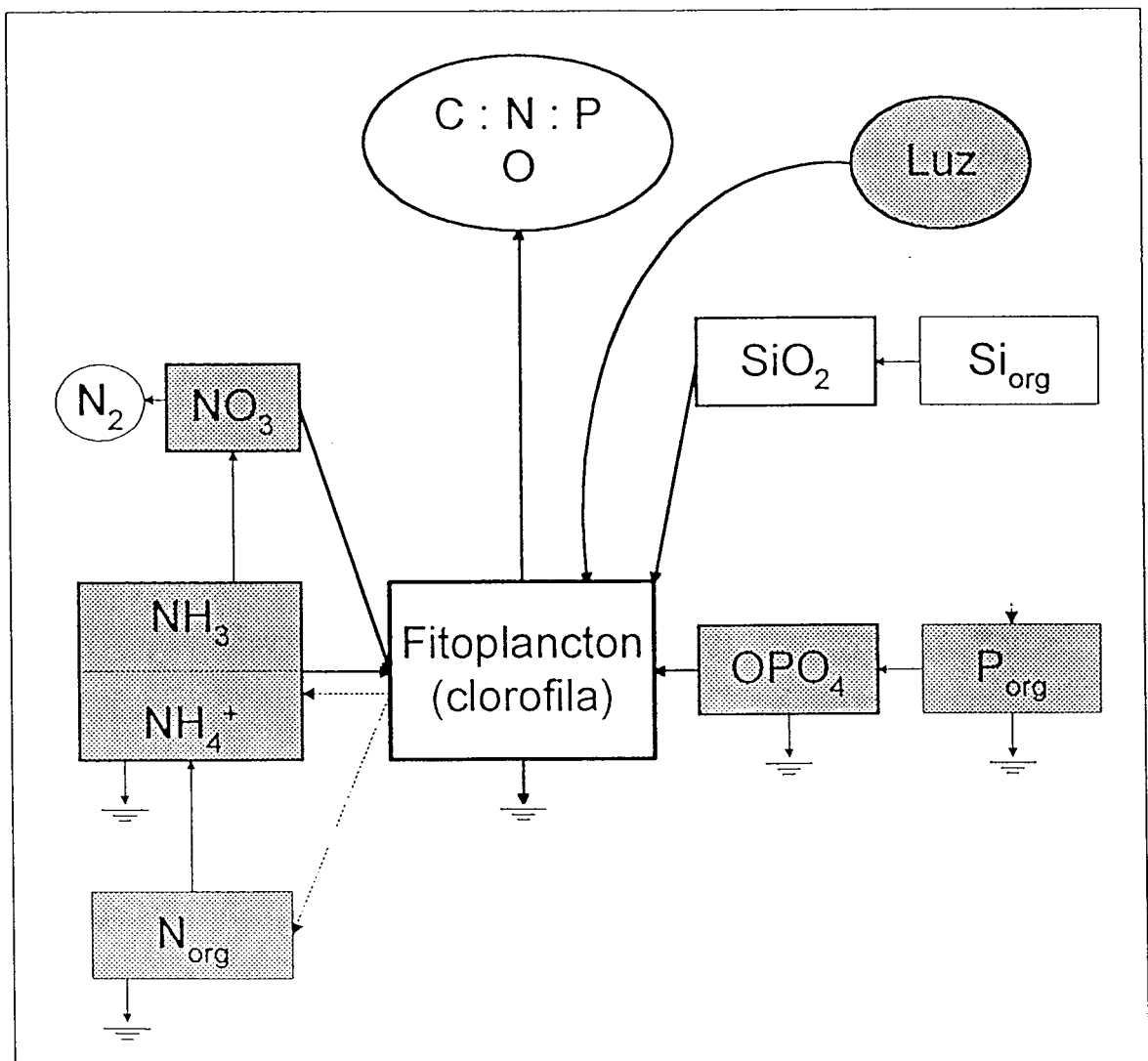


Figura 1 - Esquema simplificado dos factores que intervêm na eutrofização.

Sob a acção da luz solar e na presença de nutrientes (sendo o fósforo, o azoto e a sílica os principais) a produção primária desencadeia-se libertando oxigénio durante o dia e sintetizando glucose. À noite, quando a fotossíntese cessa, os fenómenos respiratórios passam a dominar, verificando-se um consumo de oxigénio que em meios eutróficos avançados pode conduzir a situações de anaerobiose, podendo provocar a morte de peixes e outros organismos.

O crescimento excessivo de plantas é desencadeado pela presença de nutrientes no meio aquático. A maioria dos meios receptores estão sujeitos a acções poluentes ricas em nutrientes, provenientes de efluentes municipais; industriais de vários tipos e ainda das escorrências agrícolas. O rio Guadiana encontra-se sujeito a solicitações semelhantes. Os efluentes das localidades de Badajoz, Elvas e Mértola são exemplos das principais municipalidades que contribuem para o estado trófico do troço português do rio. As principais indústrias da bacia são a indústria do tomate e a suinicultura, ambas ricas em nutrientes. Os regadios existentes em Espanha contribuem de modo significativo para a poluição difusa e, embora em menor grau, as culturas cerealíferas existentes ao longo do rio dão também um contributo significativo.

A eutrofização de um meio aquático acarreta inúmeros inconvenientes, destacando-se os seguintes (Thomann, 1987):

- estéticos e recreacionais: coloração da água, mantos superficiais de plantas ;
- odores;
- grandes amplitudes diárias de oxigénio dissolvido, podendo resultar em níveis insuficientes à noite;
- consumo do oxigénio dissolvido na decomposição das plantas aquáticas mortas;
- presença de diatomáceas e outras plantas filamentosas, que interferem com o funcionamento das estações de tratamento de água;
- crescimento exagerado de macrófitas, que pode interferir com diversos fins;
- toxicidade de algumas espécies aquáticas.

Exemplos destes factos no rio Guadiana são por exemplo o aparecimento de mantos de *azolla* (Abril de 1993) e de outras plantas; a mortandade de peixes que já ocorreu durante a noite (por vezes justificada por outras acções); os muito baixos teores em oxigénio dissolvido que se têm verificado nos períodos de Outubro a Novembro dos últimos anos, devido à decomposição da matéria orgânica proveniente da morte das plantas que proliferaram durante o verão; a interferência na estação de tratamento de Mértola das plantas filamentosas que o rio transporta, etc..

Para se caracterizar o estado trófico de um meio aquático existem vários indicadores. O "montante" de fitoplancton é um dos mais frequentes, mas o teor em fósforo, a transparência da água medida com o disco secchi e o nível de oxigénio dissolvido são outros bons indicadores, só por si ou em conjunto, do estado trófico do rio (Wetzel, 1975; Thomann, 1987).

Todos os tipos de plantas, independentemente da dimensão, têm em comum a presença de pigmentos de clorofila. Em particular a clorofila tipo *a* é facilmente medida por espectrofotometria, pelo que este parâmetro é o geralmente utilizado para quantificar o montante de fitoplancton no meio aquático.

Os teores em nutrientes são também considerados por vários autores como indicativos do estado trófico do meio, pois quando o estado trófico é tendencialmente oligotrófico os teores totais de nutrientes são muito baixos. Como exemplo indicam-se de seguida valores destes parâmetros em função dos diferentes estados tróficos extraídos de Thomann, 1987:

	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Tp (ug/l)	<10	10 - 20	>20
Chl a (ug/l)	<4	4 - 10	>10
Secchi - profundidade (m)	>4	2 - 4	<2
Oxigénio Hipolimnético (%)	>80	1 - 80	<10

Neste ponto pode-se questionar porque aparece uma indicação do teor em fósforo como referência, tal não acontecendo com o azoto. A justificação relaciona-se com a capacidade que os ecossistemas têm de captar azoto atmosférico quando esse nutriente existe em quantidades insuficientes no meio em que se encontra.

No gráfico da Figura 2 apresentam-se os valores dos teores em clorofila *a* observados ao longo de 1993 na estação de amostragem do Monte da Vinha localizada próximo de Elvas, no rio Guadiana em Portugal.

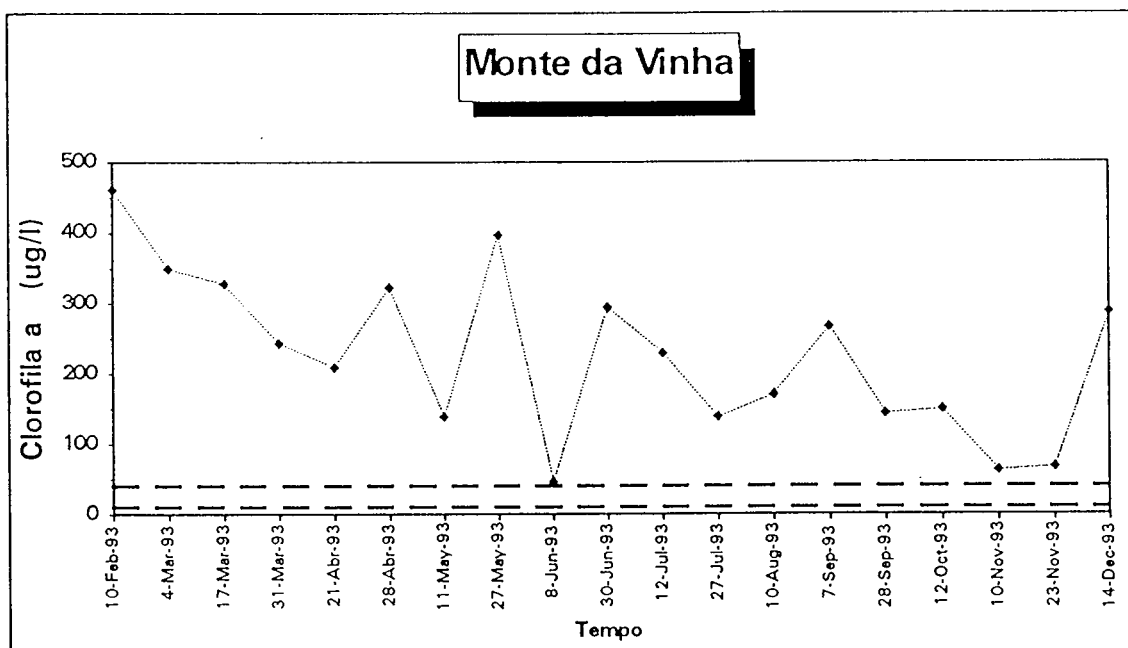


Figura 2 - Teor em clorofila *a* no Monte da Vinha.

Como se pode constatar foram observados valores tão altos como 460 ug Chl *a*/l. A faixa sombreada pretende representar o limite do teor em clorofila *a* acima do qual se considera um meio aquático como eutrófico. Esse limite varia entre 10 a 50 ug/l de acordo com os autores (Wetzel, 1975; Thomann 1987). Como se pode verificar os valores registados no Monte da Vinha são largamente superiores ao longo de quase todo o ano.

3. Monitorização da qualidade da água do rio Guadiana

O processo da eutrofização envolve um número considerável de variáveis, das quais o esquema apresentado na Figura 1 apenas refere as principais. Para se poder proceder à modelação matemática do rio Guadiana foi assim necessário recolher um elevado número de dados.

A definição de um programa de amostragem é sempre uma tarefa difícil, tendo-se que atender a diversos factores, como os recursos humanos e financeiros disponíveis, os objectivos a alcançar, o período de tempo que se pretende abranger e quais os parâmetros a caracterizar de forma a se alcançarem os objectivos pretendidos.

O troço do rio Guadiana amostrado no estudo em questão cobriu aproximadamente 150 km, entre o Monte da Vinha, imediatamente a jusante da fronteira, e Quintos, perto de Serpa, abrangendo a maior parte do seu percurso em Portugal onde não se faz sentir a intrusão salina. Foram seleccionadas sete estações entre Monte da Vinha e Quintos (Figura 3). Estes locais foram escolhidos criteriosamente em função das fontes poluidoras existentes, atendendo à acessibilidade dos locais, homogeneidade e representatividade das secções.

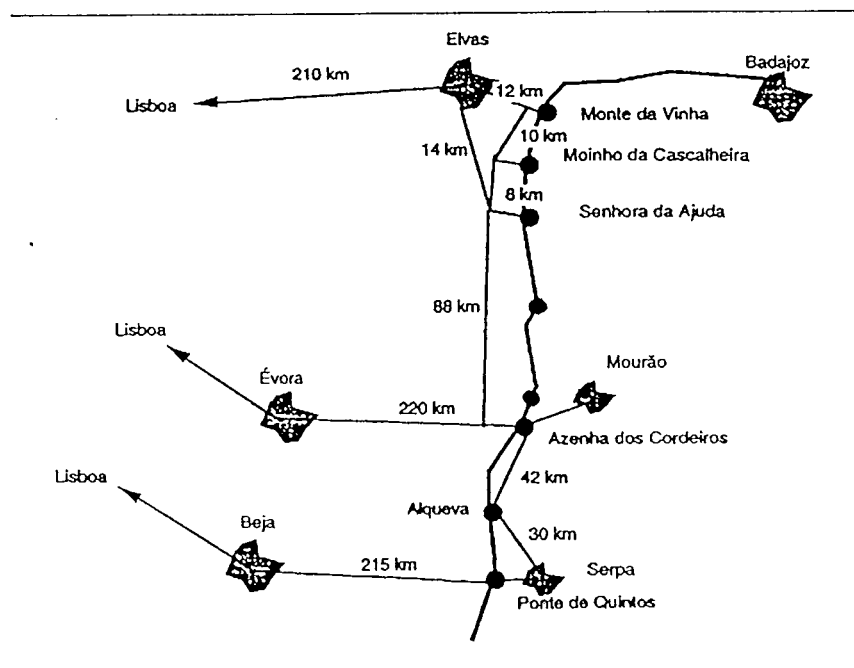


Figura 3 - Localização das estações de amostragem do rio Guadiana durante 1993.

A primeira estação, Monte da Vinha pretendeu registar a situação do rio Guadiana à entrada de Portugal, ou seja a jusante dos efluentes municipais de Badajoz que apenas sofrem um deficiente tratamento secundário. As duas estações seguintes pretendiam analisar a evolução da qualidade de água do rio ao longo do troço português. Após análise dos primeiros dados a localização da 2ª estação (Cascalheira) foi deslocada para jusante (Areeiro), pois a sua proximidade com a Senhora da Ajuda não demonstrava nenhuma evolução entre esses dois pontos, ficando um longo troço até Mourão sem ser amostrado, desconhecendo-se assim o que se passava nessa região.

A estação de Mourão e Cordeiros foram seleccionadas com o intuito de observar o efeito dos efluentes da fábrica de reciclagem de papel da Portucel no rio, uma vez que na primeira se procede à recolha das amostras a montante da descarga de efluentes e em Cordeiros já a jusante.

A estação do Alqueva foi seleccionada por se ir proceder à construção da barragem e assim poder caracterizar a situação na fase anterior a essa obra. Finalmente, Quintos foi a última posição amostrada sendo um local de fácil acessibilidade.

O processo da eutrofização apresenta variabilidade sazonal, uma vez que é directamente dependente da radiação solar e da temperatura. Para se conseguir calibrar devidamente um modelo matemático que tente reproduzir estes processos é necessário efectuar uma amostragem regular ao longo do ano de forma a tentar cobrir as quatro estações. Foi assim estabelecido um programa de amostragem com uma periodicidade aproximadamente quinzenal, sempre que os meios técnicos e humanos o permitiram. O período coberto foi de Fevereiro a Dezembro de 1993, tendo-se efectuado um total de 19 campanhas.

Atendendo à complexidade do tipo de problemas de qualidade de água do rio Guadiana - eutrofização - e para se conseguir caracterizar devidamente a situação foi necessário proceder à análise de um número extenso de factores, tendo-se analisado uma série de parâmetros físicos, químicos e biológicos que se complementam entre si.

4. Análise sumária dos dados

A análise preliminar dos dados recolhidos ao longo do ano evidencia haverem dois períodos distintos em termos de precipitação e caudal e, conseqüentemente, da qualidade de água.

O ano hidrológico de 1992/93 foi um ano seco na região da bacia hidrográfica do rio Guadiana (à precipitação registada no posto de Caia da bacia corresponde uma probabilidade de excedência de 93% segundo Pires *et al.*, 1993). Em Outubro de 1993, ou seja no ano hidrológico seguinte, a pluviosidade aumentou, levando a um aumento dos caudais do rio.

Obviamente que esse facto teve repercussões em termos da qualidade da água, não só pela diluição que um maior caudal implica, mas também pelo aumento de poluição difusa devida ao arrastamento de pesticidas e fertilizantes, ricos em componentes azotados e outros nutrientes, e pela alteração dos tempos de escoamento.

Este facto está bem patente no diagrama da Figura 4 que relaciona a abundância relativa do fósforo (p) e do azoto (N) ao longo do rio, caracterizando a origem das fontes poluidoras. Como se sabe, e de uma forma geral, para:

$N/p < 10$ - dominam fontes poluidoras localizadas;

$N/p > 10$ - dominam fontes poluidoras difusas.

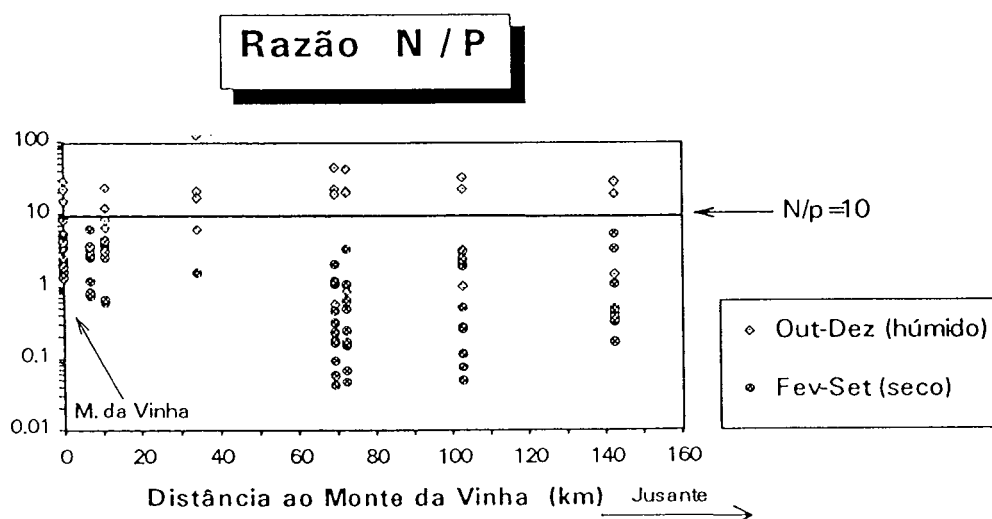


Figura 4 - Abundância relativa dos principais nutrientes: azoto e fósforo.

A partir de Outubro, após o início das chuvas, a razão entre o azoto e o fósforo dissolvidos aumentou substancialmente, e o sistema que anteriormente era dominado por fontes poluidoras localizadas (efluentes municipais de Badajoz, Elvas, etc.) características de razões N/p baixas, é agora controlado pelas escoenças superficiais ricas em compostos azotados.

Chama-se a atenção para este facto porque as conclusões que se pretendem demonstrar, ou seja a ocorrência de fixação de azoto atmosférico durante certos períodos do ano, verifica-se quando os teores em azoto no meio aquático são reduzidos, ou seja, quando se verificam baixos valores da razão N/p, da ordem dos 5 ou inferiores (Thomann 1987). A análise dos dados que se segue refere-se por isso ao período de Fevereiro a Setembro.

Tal como foi já dito a produção primária está directamente relacionada com o teor em nutrientes inorgânicos dissolvidos no meio aquático. Na Figura 5 mostra-se a variação da concentração de clorofila ao longo do troço de rio em estudo bem como as do fósforo e azoto. Nesta Figura apresenta-se o tratamento estatístico dos resultados das campanhas efectuadas entre Fevereiro e Setembro, que serviram de base à posterior modelação matemática do rio que depois se apresenta.

Como se pode verificar o fitoplancton tem uma tendência decrescente ao longo do rio, acompanhada inicialmente por uma descida do azoto dissolvido, que, depois, aparentemente se mantém mais ou menos estável para jusante. Esta tendência é contrariada nas duas últimas estações.

As conclusões que se pretendem realçar são mais evidentes se nos cingirmos ao período do fim de Março a Agosto, pelo que se apresenta na Figura 6 os dados correspondentes a esse período. Convém contudo salientar que mais de 70% dos valores registados se encontram abaixo do limite de detecção do aparelho e que, por isso, os valores inferiores que se registam nestas 4 últimas estações, e que representam mais de metade da amostra, constituem já concentrações muito baixas deste nutriente, e como tal potencialmente limitativas do crescimento da comunidade fitoplanctónica.

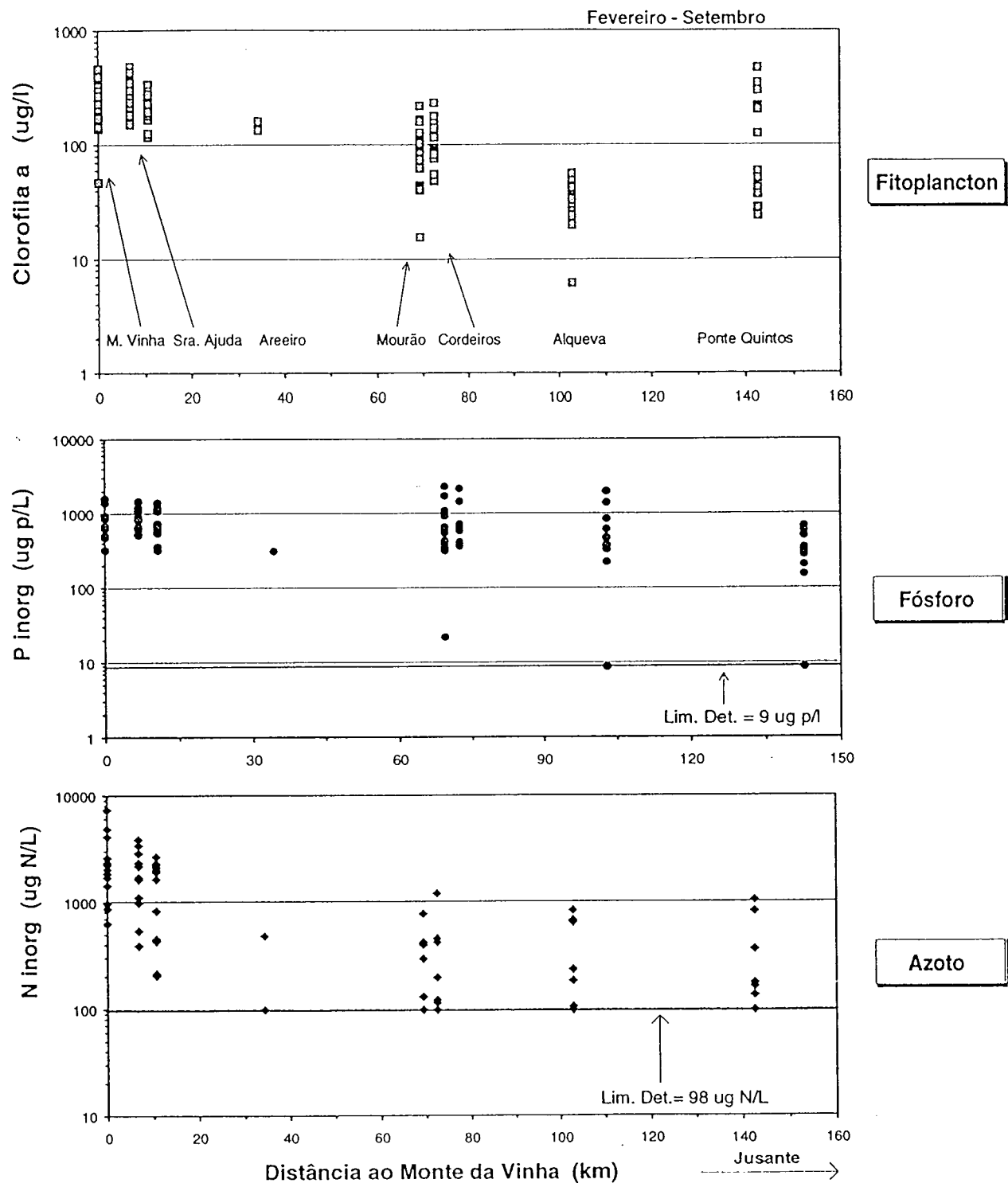


Figura 5 - Observação do montante de fitoplancton e nutrientes inorgânicos em vários pontos do rio Guadiana. Fevereiro - Setembro de 1993.

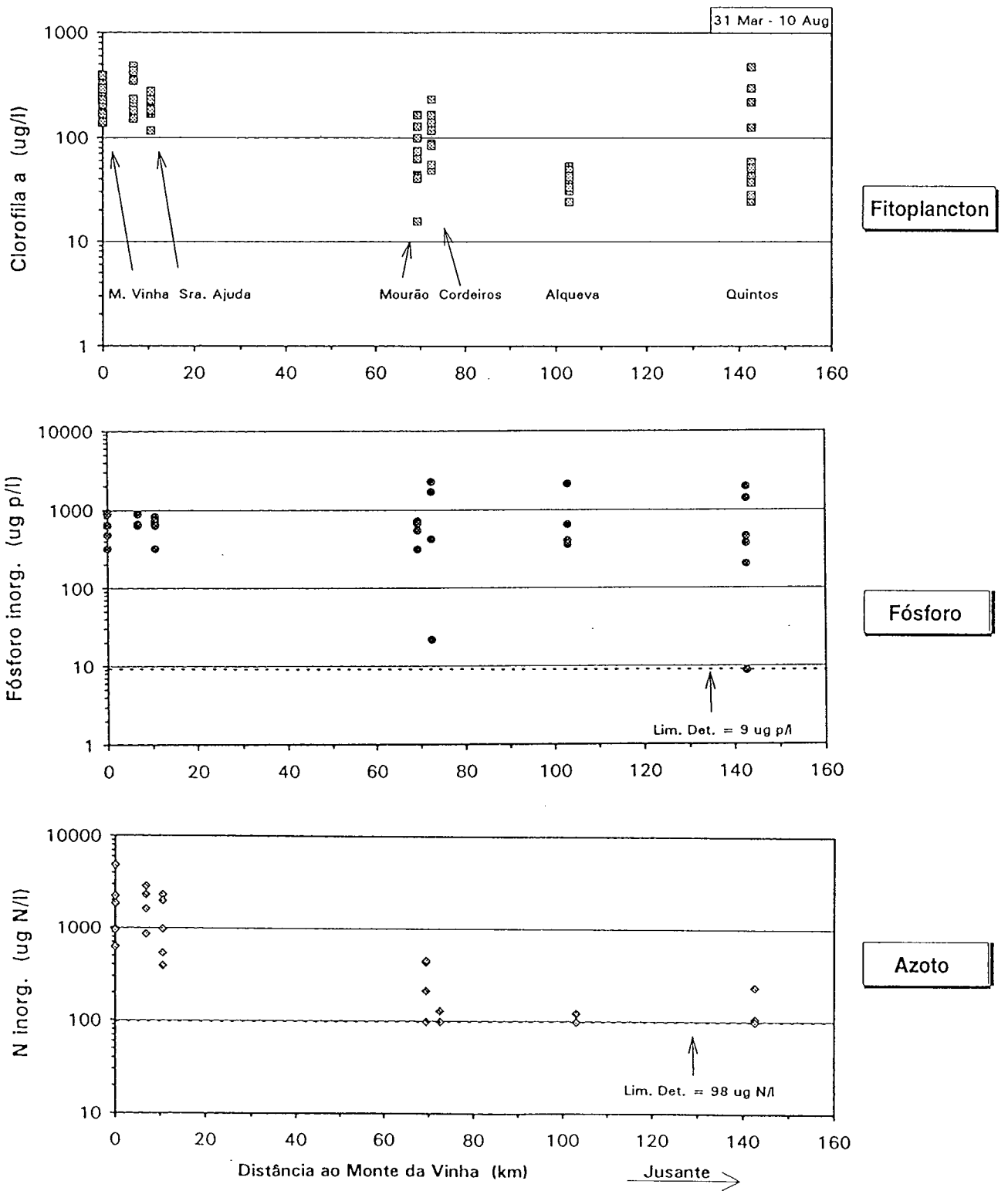


Figura 6 - Observação do montante de fitoplancton e nutrientes inorgânicos em vários pontos do rio Guadiana. Março - Agosto de 1993.

Entre O Alqueva e Quintos regista-se um crescimento acentuado do fitoplancton, aparentemente injustificado atendendo aos teores em azoto. Repare-se que, durante este período de amostragem, apenas se observaram por 2 vezes valores de azoto superiores ao limite de detecção.

O fósforo, o outro nutriente indispensável ao crescimento primário, regista contudo um decréscimo entre estas duas estações, deixando antever que existe consumo deste nutriente e, como tal, que deve realmente estar a ocorrer produção primária.

Parece estar-se perante um paradoxo: por um lado o fitoplancton aumenta substancialmente, sem suporte pela parte do azoto, mas registando-se em simultâneo, por outro lado, um decréscimo do fósforo.

Este facto, em conjugação com os baixos valores da razão N/p, permitiu suspeitar da existência de espécies aquáticas fixadoras de azoto atmosférico, o que justificaria quer o crescimento do fitoplancton sem aparente suporte do azoto, quer o decréscimo da concentração de fósforo.

Acresce que em Abril de 1993 surgiu a tão comentada proliferação de *azolla*, plantas fixadoras do azoto atmosférico, que são macrófitas, mas que alertaram para a possível presença de espécies semelhantes de fitoplancton, como é o caso de alguns tipos de *cyanofyceae*. A identificação dos tipos de espécies de algas presentes nas amostras recolhidas confirmou a presença destas espécies, embora não se tivesse procedido ainda à sua contagem.

Nalguns trabalhos anteriores, como o de Oliveira (Oliveira, 1991), existem também registos de observações (1981-1985) de espécies de *cyanofyceae* fixadoras de azoto (*Anabaena flos-aque*; *Aphanizomenon flos-aque*) em vários troços do rio Guadiana noutras épocas de baixos caudais. Os indícios de que a fixação de azoto atmosférico é passível de estar a ocorrer são suficientes para exigir que tal facto seja verificado.

5. Modelação matemática do rio Guadiana

Do exposto no ponto anterior ressalta a ideia de que todos os factores apontam para a possível presença de espécies aquáticas fixadoras de azoto. Falta confirmar este pressuposto com base na modelação matemática. Para tal tentou descrever-se o comportamento do fitoplancton *com* e *sem* fixadores de azoto atmosférico, para observar a situação que melhor se ajusta aos dados disponíveis. Utilizou-se para tal o modelo de simulação WASP.

Na Figura 7 apresentam-se alguns dos resultados de simulação obtidos para os principais nutrientes e para o fitoplancton em conjunto com a estatística dos resultados dos dados de campo. A apresentação espacial dos resultados da simulação ao longo do rio (três primeiros gráficos) corresponde à média do período de Fevereiro a Setembro e engloba as espécies fixadoras de azoto.

A simulação temporal do fitoplancton para a estação de Quintos (último gráfico) mostra o resultado da simulação para os fixadores de azoto (curva 1); para as restantes espécies de fitoplancton sem incluir os fixadores de azoto (curva 2); e a soma de ambos, curva 3. Efectivamente, a inclusão das espécies fixadoras de azoto conjuntamente com as restantes espécies proporciona um bom ajuste aos valores observados na estação de Quintos.

Para se proceder à modelação dos fixadores de azoto foi necessário incluir no modelo WASP uma rotina suplementar que modelava estas espécies. O esforço adicional que representou foi plenamente justificado na medida em que estas espécies apresentam alguma toxicidade, sendo a sua presença nociva para o ecossistema e para as diferentes utilizações da água, como abastecimento público, piscicultura, etc. É por isso de todo conveniente evitar ou controlar a ocorrência destas espécies.

Quintos

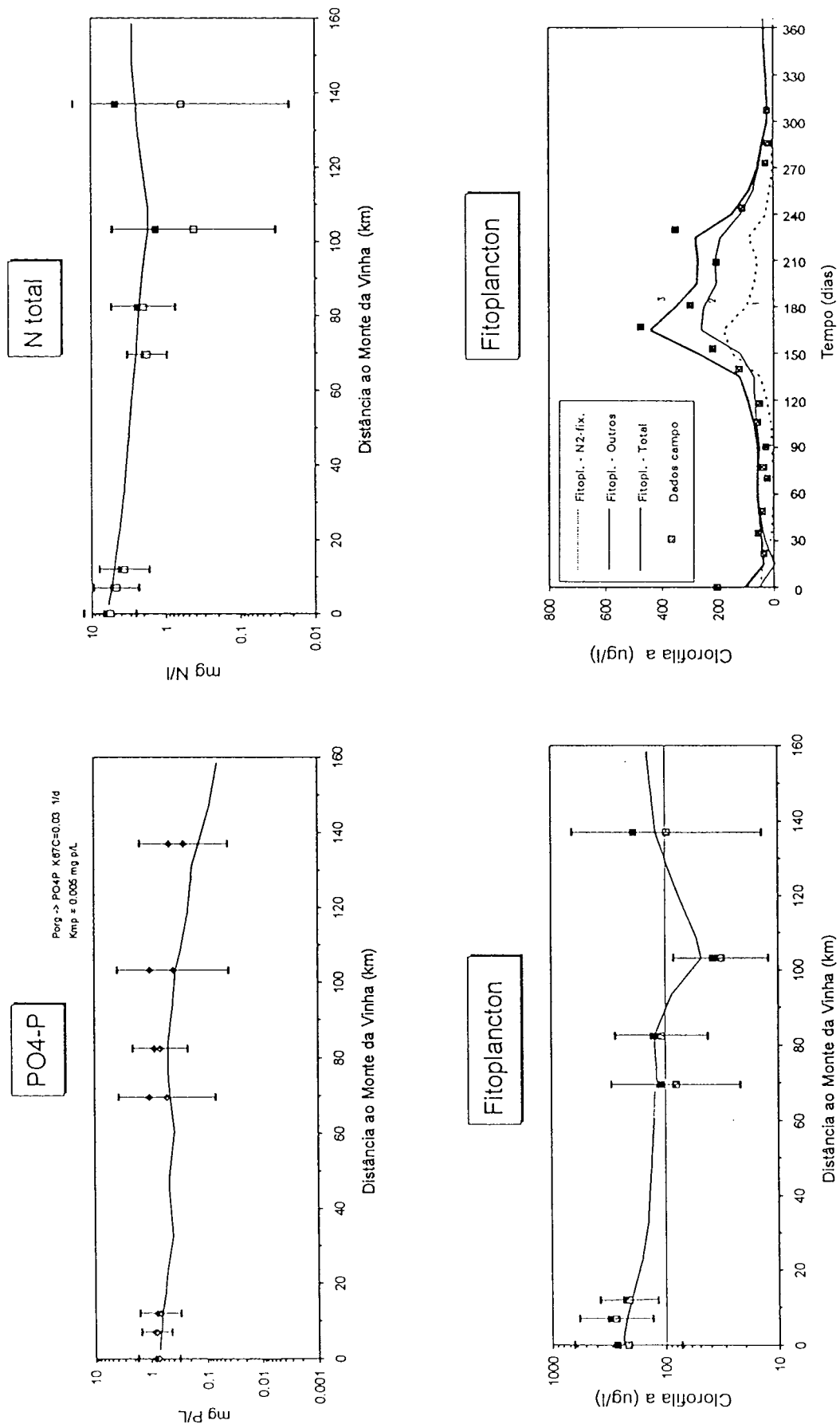


Figura 7 - Simulação matemática do rio Guadiana

6. Conclusões

Sistematizam-se de uma forma resumida as conclusões a obter e pontos de interessa a focar:

- Em ambientes eutróficos com baixos teores em azoto as comunidades fitoplanctónicas fixadoras de N_2 atmosférico têm tendência a surgir;
- Estas espécies estão presentes em todo lado, mesmo em rios (ao contrário do que se pensava até recentemente);
- As substâncias tóxicas que possuem são nocivas pelo que é necessário controlar o desenvolvimento excessivo destas espécies;
- A sua inclusão na modelação matemática não representa um esforço adicional muito grande;
- A consideração destas espécies pode inverter os conceitos clássicos de controle de eutrofização com base na redução de compostos azotados no meio aquático, quando o azoto é o nutriente limitativo. Se o fósforo continua presente em quantidades suficientes, a fixação de N_2 atmosférico não diminui a proliferação de algas, apenas as substitui por outras mais nocivas.

7. Bibliografia

- Bierman V. J., Jr. 1979. *A Review of Phytoplankton-Nutrient Kinetics Mechanisms in Mathematical Simulation Models, with Special Attention to Reservoirs and Impoundments*, Prepared for Workshop on Phytoplankton-Environmental Interactions in Reservoirs, Monterey, California, April 1979.
- Bierman, V. J. D. M. Dolan; E. F. Stoermer; J. E. Gannon and V. E. Smith 1980. The Development and Calibration of a Spatially Simplified Multi-Class Phytoplankton Model for Saginaw Bay, Lake Huron, *Great Lakes Environmental Planning Study. Contrib. No. 33*.
- Bierman, V. J. and D. M. Dolan 1981. Modeling of Phytoplankton-Nutrients Dynamics in Saginaw Bay, Lake Huron, *J. Great Lakes Research* 7(4):409-439.
- Carrapiço, F. et al. 1994. *O Bloom de Azolla no Rio Guadiana. Análise das Suas Causas e Consequências*.
- Costa, J. R. et al. 1992. *Rio Guadiana: Reconhecimento e Caracterização Geral. Relatório do Projecto MEDSPA*.
- Costa, J. R. et al. 1993. *Bacia Portuguesa do Rio Guadiana: Caracterização Hidrológica Sumária. Relatório do Projecto MEDSPA*.
- DePinto J. V.; V. J. Bierman Jr. and F. H. Verhoff, 1976. Modeling Biochemical Processes in Aquatic Ecosystems, R. P. Canale (ed.), *Seasonal Phytoplankton Succession as a Function of Species Competitions for Phosphorous and Nitrogen*, Ann Arbor Science, Ann Harbor, Michigan. pp. 141-169.
- Lindholm, T.; J. E. Eriksson and J. Meriluoto 1989. Toxic Cyanobacter and Water Quality Problems - Examples from a Eutrophic Lake on Aland, South West Filand, *Water Research* 23(4): 481-486.
- Oliveira, M. R. L. 1991. *Eutrofização do Rio Guadiana. Blooms de Cyanophyceae e Influencia na Ictiofauna*, Inst. Nac. Investig. Pescas, Rel. N^o. 42.
- Schindler, D. W. and E. J. Flee 1974. Experimental Lakes Area: , Whole-lake experiments in Eutrophication. *Jl. of the Fisheries Research Board of Canada*, 31(5), pp. 937-953, May 1974.
- USEPA 1985. *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling* (Second Edition). June 1985, 455 pp. EPA/600/3-75/004.
- USEPA 1992. Instruction Material for a Workshop Held on *Introductory Water Quality Modeling with The Water Analysis Simulation Program - WASP4*. EPA, Athens, Georgia, March - April 1992.
- ROCHA, F. 1994. Analysis and Review of N₂-fixation for use in the eutrophication model of River Guadiana. Submitted to Manhattan College.
- Wetzel, R. G. 1975 - *Limnology*, Saunders Company (ed.), Philadelphia, 743 pp.