RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 8 n.3 Jul/Set 2003, 105-116

Metodologia para Utilização do Traçador Fluorescente 'Rodamina B' no Estudo da Dispersão Superficial, Adaptada para Aplicação no Estuário da Lagoa dos Patos

Jose Antonio Scotti Fontoura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental/Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS., fontoura@dmc.furg.br

Luiz Felipe Hax Niencheski
Laboratório de Hidroquímica/Departamento de Química/FURG, **dqmhidro@furg.br**

Recebido: 06/02/02 – revisão: 28/10/02 – aceito: 13/0/03

RESUMO

O presente trabalho objetiva apresentar noções práticas de utilização do traçador fluorescente 'Rodamina B', fornecendo subsídios a quem necessite valer-se de tal método sem possuir experiência anterior. A opção pelo método da medição da radiância em aerofotos, em detrimento do método da medição da fluorescência 'in situ', prendeu-se fundamentalmente a duas questões: primeiro, a disponibilidade dos equipamentos e recursos necessários e, segundo, ao fato dos experimentos terem sido realizados na superfície da coluna d'água viabilizando a aplicação do método.

Afim de adaptar o método à região e proporcionar o estudo de caso, foram utilizados dados de cruzeiros realizados em 1997 e 1998, na região sul do estuário da Lagoa dos Patos. A metodologia consistiu em gerar manchas superficiais e monitorar sua dispersão com o auxílio de fotografias aéreas e amostragem seqüencial da água, em transectos ortogonais sobre as manchas. As curvas contínuas de concentração de 'Rodamina B' foram obtidas através da correlação entre as absorbâncias determinadas nas amostras de água e as radiâncias extraídas das aerofotos, para pontos comuns.

O trabalho apresenta os tipos de traçadores fluorescentes químicos mais comuns, sua aplicação e forma de escolha. Descreve o preparo em laboratório e os cuidados necessários para seu transporte e uso no campo. São apresentados, passo a passo, o planejamento do experimento, os equipamentos e infraestrutura necessários, a liberação do traçador, a coleta das amostras e a realização das aerofotos, bem como todo o trabalho posterior de tratamento e análise dos dados obtidos.

Com os dados obtidos pode-se, também, determinar o coeficiente de difusão turbulenta da região e validar um modelo matemático de dispersão superficial, o que será motivo de outros artigos científicos.

Palavras-chave: Rodamina B, dispersão de contaminantes, difusão oceânica, traçadores fluorescentes, traçadores químicos, estuários, Lagoa dos Patos.

INTRODUÇÃO

A dispersão de poluentes em corpos d'água naturais é um sério problema ligado ao crescimento das concentrações urbanas e ao complexo atendimento das suas demandas. No caso das contaminações oceânicas torna-se especialmente critica a situação dos estuários, onde se concentra a maior parte das atividades humanas.

Em torno do estuário da Lagoa dos Patos vivem cerca de 600 mil pessoas com problemas de lançamentos cloacais "in natura", matriz industrial poluidora, grande atividade agro-pastoril (presença de agrotóxicos), presença de um grande porto regional e fluxo fluvial intenso. O estudo da qualidade da água e a predição de acidentes ambientais é uma preocupação constante nestes casos.

Diferentes tipos de modelos numéricos tem sido utilizados como forma econômica de sondagem e predição do comportamento dos contaminantes, entretanto, o processo de dispersão em corpos naturais é bastante complexo e nem sempre pode ser explicado somente por abordagem teórica, exigindo muitas vezes, intervenções de campo (Okubo, 1968a).

Com esta finalidade existem produtos (traçadores) e métodos capazes de permitir a simulação física do fenômeno da dispersão, sem colocar em risco o ambiente. Dentre estes, o traçador mais utilizado em corpos naturais tem sido a 'Rodamina B'.

O principal objetivo deste trabalho é proporcionar uma visão simples, porém detalhada, do uso da 'Rodamina B' como traçador, para aqueles que não tiveram ainda a oportunidade de fazê-lo na prática.

Segundo Roldão & Goretkin (1984) a 'Rodamina B' é um traçador corante fluorescente estável, de fácil acesso comercial, inofensivo à saúde e ao meio ambiente e com traços de fluorescência suficientes para uso em experimentos oceânicos.

Murthy & Miners (1978) a descrevem como um pigmento orgânico comercial, usado na produção de batons e velas de aniversário, não tóxico aos seres humanos e aos peixes, podendo estes sobreviver por até dois meses em uma solução de 100 ppm (partes por milhão).

A metodologia para utilização da 'Rodamina B' como traçador foi apresentada por Pritchard & Carpenter (1960) e o aproveitamento das suas propriedades fluorescentes tornou-se um marco no estudo da difusão em corpos naturais, principalmente em fenômenos de sub-superfície.

Na superfície podem ser utilizadas aerofotografias, beneficiadas pelo desenvolvimento dos aplicativos computacionais para tratamento de imagens rasterizadas e pela nova geração de equipamentos para aquisição digital de imagens de pequeno formato (Fontoura & Hartmann, 2001).

Os experimentos realizados com 'Rodamina B' cobrem praticamente todas as escalas de espaço e tempo, variando desde as mais amplas, como 100 km de comprimento e 1 mês de observações, até valores pequenos como 30 m de comprimento e tempo de alguns minutos (Okubo, 1968a). A maior parte dos experimentos tem ocorrido em camadas de até 3m de profundidade, o que se justifica pela dificuldade na obtenção de dados confiáveis em camadas profundas devido à ausência de contato visual durante a coleta das amostras.

O experimento inicia com o lançamento na água de uma quantidade variável de 'Rodamina B', de acordo com a escala pretendida. Determina-se, então, os perfis contínuos de concentração, usando fotografias aéreas e amostragem simultânea da água ou medição da fluorescência.

Comparando os dados obtidos no campo com os resultados de saída de um modelo numérico, é possível validar modelos matemáticos de dispersão tornando-os aptos a serem utilizados como ferramentas de predição. Este assunto será abordado em detalhe em artigo futuro.

Este artigo apresenta a metodologia de escolha, preparo, lançamento, coleta e análise dos dados gerados em campanha oceanográfica com o uso do traçador fluorescente 'Rodamina B' e de aerofotografias, no estudo da dispersão superficial de contaminantes passivos, aplicado e adaptado às condições internas do estuário da Lagoa dos Patos.

METODOLOGIA

Escolha do traçador e preparo da solução

Ao longo do tempo, uma gama enorme de traçadores fluorescentes, tais como: Rodamina B, Fluorascina, Pontacyl Brilliant Pink B, Rodamina BA, Rodamina WT, Sulforodamina B e Amidorodamina G Extra, têm sido testados e utilizados. Alguns foram desenvolvidos para o atendimento de finalidades específicas e cada um deles possui vantagens e desvantagens que devem ser exploradas pelo pesquisador em função de suas necessidades locais. Dentre todos os citados, o mais conhecido e mais largamente utilizado tem sido a 'Rodamina B'.

A 'Rodamina B', com baixa capacidade de adsorção, tem sido aconselhada para zonas de maior turbidez, onde existe uma elevada taxa de matéria orgânica em suspensão como lagos, rios e estuários. Esta característica a torna ideal para um estuário com elevadas taxas de turbidez (Hartmann, 1996) como o estuário da Lagoa dos Patos, ao que soma a fácil aquisição e custo acessível.

O primeiro passo é estabelecer a massa seca de 'Rodamina B' necessária, que pode variar de algumas gramas a vários quilos, dependendo da magnitude do experimento.

A massa seca utilizada foi calculada em função do limite de detecção do espectofotômetro (GBC UV/VIS 911A), da altura máxima estimada para a lente de corante e do diâmetro máximo projetado para o tamanho da mancha ao final do evento, segundo fórmula utilizada com sucesso por Stevenson (comunicação pessoal):

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H, \tag{1}$$

$$C = \frac{M}{V}, \tag{2}$$

onde, 'C' representa o limite de detecção do espectofômetro, 'D' o diâmetro final desejado para a mancha, 'H' a altura máxima desejada para a mancha, 'V' o volume da lente corante e 'M' a massa seca de 'Rodamina B'.

A percepção visual do corante, a duração temporal do evento e a distribuição espacial da mancha, estão diretamente ligados à massa seca de 'Rodamina B' utilizada.

A solução deve ser preparada na mesma temperatura da camada de água que desejamos estudar. Deve, também, ser determinado o ponto de saturação do solvente a esta temperatura e não ultrapassá-lo. Maiores detalhes podem ser encontrados em Fontoura (2000).

Uma das principais características desta solução é a dificuldade em executar movimentos migratórios entre camadas de diferentes densidades. No caso de estuários,

onde a estratificação salina está presente, isto adquire grande importância.

No caso de experimentos de superfície apoiados por aerofotos, onde a percepção visual do experimento é decisiva, não deve se esquecer que as lentes corantes somente são visíveis até a profundidade máxima de 3 metros, em condições especiais de oceano aberto com elevada salinidade e turbidez mínima.

Como em ambientes estuarinos dificilmente estas condições podem ser alcançadas, a visibilidade da mancha fica restrita à superfície, não havendo possibilidade de identificação visual abaixo desta.

Para este trabalho, a 'Rodamina B' foi adquirida como pó seco, o que exigiu posterior solubilização, já que trabalhos anteriores comprovaram que o lançamento direto da Rodamina B na forma de pó, não apresenta bons resultados (Nickerson, 1961 e Ebel, 1964 apud Stevenson, 1966).

Os solventes utilizados para a 'Rodamina B' são o álcool metílico (metanol) e o ácido acético. A 'Rodamina B' se dissolve com grande facilidade em solventes orgânicos. A escolha do solvente é função exclusiva da densidade do meio onde a 'Rodamina B' será liberada. Em regiões de baixa densidade, como estuários homogêneos, águas de pouca salinidade e águas interiores não salinas, o solvente principal deverá ser o metanol. Já no caso de águas mais densas, como as oceânicas, ou o interior de camadas estuarinas de alta densidade, o ácido acético deverá ser o solvente principal.

Como a 'Rodamina B' está isenta do decaimento natural, pode ser estocada por tempo indefinido, tanto em pó como em solução, tanto concentrada como diluída (amostras). O principal cuidado com as amostras deve ser em relação à vedação dos frascos, evitando que a evaporação altere a concentração das mesmas.

Para os objetivos deste trabalho, foram dissolvidas em metanol, 300g de 'Rodamina B' (pó) e, após solubilizada, o volume foi elevado a 2000 ml. O procedimento de solubilização encontra-se descrito com detalhes em Fontoura (2000).

Após solubilizada, a 'Rodamina B' (solução concentrada) deve ser colocada dentro de balões de aniversário do tipo "balão surpresa", em lotes de 2 litros por balão, que após terem sua boca amarrada, devem ser acondicionados em baldes plásticos com tampa, para o transporte seguro até o ponto da liberação.

Segundo Stevenson (1966) no caso de solução em ácido acético, os balões devem ser protegidos com gelatina de petróleo, a fim de evitar o endurecimento das suas paredes e conseqüente rompimento. Essa proteção terá efeito por 6 horas.

Equipamentos utilizados

Foram utilizadas duas formas diferentes de coleta das amostras. A primeira, diretamente a partir do barco base (Lancha Larus) usando o sistema de coleta contínua (Fig. 1) e a segunda, através de amostragem manual desde de um barco auxiliar (bote de alumínio). Pode ser utilizada tanto uma como outra forma de coleta, dependendo do tamanho, estabilidade e localização da mancha no momento da coleta.

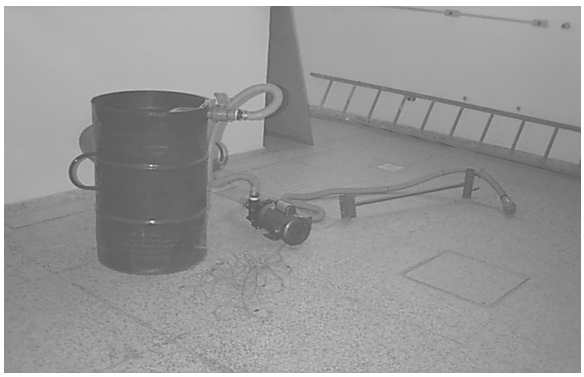


Figura 1 – Sistema de coleta contínua.

O sistema de coleta contínua é composto por uma bomba centrífuga (Baldor Electric Co.), motor de ¾ de HP, rotor aberto, vazão de 11 m^3/h, mangueiras corrugadas de 1 ½ pol na sucção e na descarga, uma válvula de pé na extremidade de sucção e uma válvula de esfera com fecho rápido no ponto de descarga. O sistema opera bombeando para dentro de um vaso de contenção com saída contínua para o meio. A coleta deve ser realizada pela lateral do barco evitando com isto a ação misturadora da hélice.

Foi utilizada uma bóia de deriva (Fig. 2) com refletor de radar para rastreamento e marcação preliminar da direção e do módulo das correntes principais de superfície, auxiliando na previsão da rota advectiva da mancha. Para construção da bóia foram utilizados um flutuador plástico, um 'cross vane' (asas cruzadas presas à bóia, que são fixadas na profundidade da corrente que se deseja estudar) metálico e uma antena de aço inoxidável com refletor de sinal de radar. O 'cross vane' foi instalado a 0,5 m de profundidade para traçar correntes de superfície.

A fim de marcar com precisão o ponto inicial de lançamento da 'Rodamina B' e estabelecer um referencial confiável para quantificação do deslocamento do centro de massa da mancha, foi utilizada uma bóia fixa (Fig. 3), construída em placa de compensado naval com 2 metros quadrados de área e âncora para fixação.

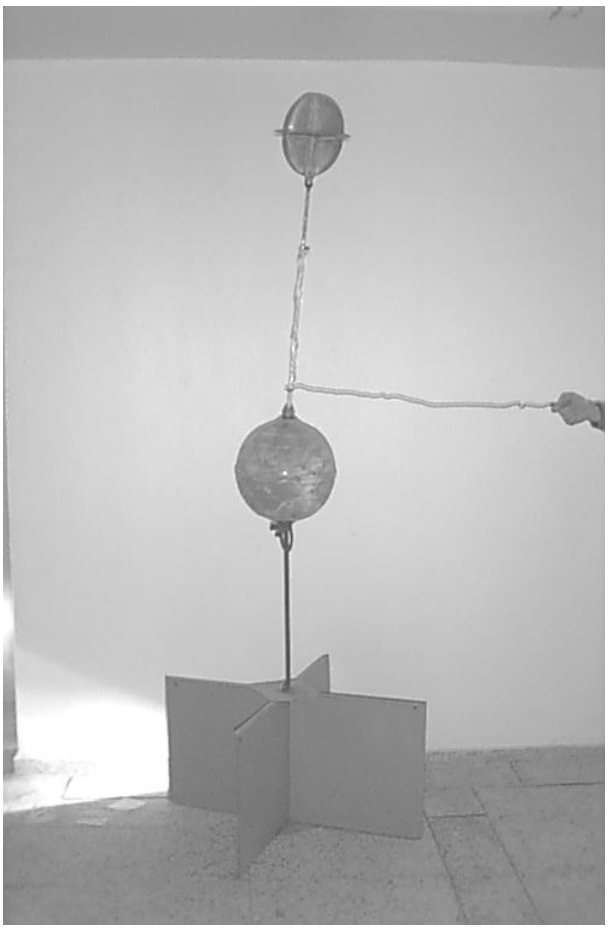


Figura 2 – Bóia de deriva com refletor de radar.

Figura 3 – Bóia fixa de sinalização aérea.

Foi utilizada, também, uma bóia de deriva com formato de placa (Fig. 4) com a finalidade de facilitar a visualização aérea do centro de massa da mancha. Instalou-se na placa de deriva um refletor de sinal de radar a fim de ajudar na sua localização em condições de mar severo.

Figura 4 – Bóia móvel de sinalização do centro de massa, com refletor de sinal de radar.

As fotografias aéreas foram adquiridas com o auxílio do sistema ADAR-1000, fornecido pela Positive System Company (USA) e acoplado a uma aeronave Cessna 182 (Fontoura & Hartmann, 2001).

Coleta dos dados

A amostragem discreta é utilizada quando o diâmetro da mancha for menor que 500 m ou quando a mancha, independente do seu tamanho, migra para regiões de pouca profundidade que impeçam o trânsito do barco base. A amostragem contínua é realizada quando a mancha apresenta um diâmetro maior que 500 m e o calado permite a navegação do barco base. Esta seletividade é imposta pela frágil estabilidade da nuvem difusiva.

Coletas discretas implicam em dificuldades adicionais; o exíguo espaço de trabalho e a instabilidade do barco auxiliar baixam a velocidade de coleta diminuindo o número de pontos amostrados, apesar da velocidade do barco auxiliar (1 nó) ser menor que a do barco base. Coletas contínuas podem ser realizadas a cada cinco segundos apesar da maior velocidade do barco base (2 nós), visto que esta é compensada pela rapidez proporcionada pelas melhores instalações e pelo envolvimento de mais pessoas no processo.

A estimativa da duração do evento é importante para o planejamento. Uma boa forma de realizá-la é considerar a velocidade e a direção da corrente que, conjugada com a morfologia e com obstáculos locais, podem determinar a escala (temporal e espacial) do experimento. O conhecimento da dinâmica local e do nível médio de turbidez associados a experiências pretéritas com 'Rodamina B' ajudam na predição do tempo de duração visual da mancha. Estimar a duração do evento é importante para determinar o intervalo de tempo entre as operações de amostragem. Sugere-se que os experimentos sejam realizados fora do intervalo entre 10 e 14 horas, evitando com isto o surgimento de 'sun-spot' nas fotografias aéreas.

Para a determinação das posições geográficas das amostras e dos pontos centrais das manchas, escolheu-se trabalhar com sistema DGPS (GPS + Sinal diferencial de base) e velocidade constante do barco.

As amostras deverão ser colhidas e guardadas em frascos de 50 ml, com fechamento hermético. O número de frascos utilizados em uma campanha irá depender da estimativa de pontos a serem coletados. Devem ser lavados com água destilada, secados em estufa e guardados tampados até o momento do uso. É importante que sejam de vidro para evitar a incrustação de 'Rodamina B' nas paredes. Os frascos devem ser transparentes para facilitar a visualização da cor da amostra. Um bom gradiente de cores pode significar, a princípio, um correto deslocamento dentro da mancha. No caso de amostras destinadas à medição da fluorescência, o seu isolamento da luz é importante para evitar fotodecaimento.

A limpeza das embarcações (casco e convés) pode ser feita com esponja e detergente. A embarcação que navegar dentro da mancha terá o seu casco marcado com uma leve coloração rosada, ao nível da linha d'água.

A seguir são apresentadas, em ordem de execução, as etapas que constituíram a metodologia adotada e aplicada no estuário da Lagoa dos Patos:

1. Ancorar o barco base no local escolhido para o lançamento da 'Rodamina B' e registrar as coordenadas geográficas do ponto com o auxílio do GPS (Novatel Gismo Propak 4 e sinal diferencial do rádio farol 290).

2. Utilizar um termosalinômetro (YSI-33), e determinar a salinidade ea temperatura da água em três pontos eqüidistantes desde a superfície até o fundo. Utilizando um correntômetro (Sensordata SD-4), determinar a velocidade e direção da corrente na superfície, meio e fundo. Utilizando um anemômetro (Davis Windmeter) conjugado com a bússola de bordo, determinar a velocidade e direção do vento. As medições devem ser executadas em pontos diferentes da coluna d'água, haja vista, as estratificações de densidade comuns em estuários não homogêneos como o Estuário da Lagoa dos Patos.

3. Checar o sistema de coleta contínua antes de iniciar o evento. Ligar a bomba e escorvá-la. Se possível, permanecer com o sistema operando durante todo o experimento sem desligar.

4. Lançar a bóia de deriva e rastreá-la, no mínimo, por uma hora utilizando o Radar de bordo (Furuno RDP-064), determinando desta forma, a direção e a velocidade do campo principal de correntes superficiais que dominam o local do experimento. Estas correntes governarão também a dispersão da nuvem de 'Rodamina B'.

5. Utilizando uma carta náutica (DHN no. 2101 e 2140) plotar a rota descrita pela bóia. Esta, com certeza, será muito parecida com o deslocamento advectivo da mancha de 'Rodamina B'.

6. Utilizando o barco auxiliar, recolher a bóia de deriva.

7. Autorizar a decolagem da aeronave (Monomotor Cessna 182 "Skylane").

8. Preparar o barco auxiliar para operação de coleta discreta. Instalar e testar o DGPS e levar para bordo as caixas com os frascos.

9. Medir a densidade da solução de 'Rodamina B' na temperatura ambiente e compará-la com o valor da densidade da água medida 'in situ'.

10. Lançar na água e ancorar no ponto de liberação da 'Rodamina B' a placa fixa de sinalização aérea. O ponto de ancoragem deve ter coordenadas conhecidas.

11. O "balão surpresa" contendo a solução concentrada de 'Rodamina B' deve ser colocado na água. Como a solução tem densidade menor, o balão flutuará normalmente. Se o volume de solução concentrada, necessário ao experimento, exigir a utilização de mais de um balão, estes devem ser amarrados juntos no momento do lançamento. Deixar o barco base afastar-se 20 m e detonar os balões com um tiro de espingarda (utilizamos uma espingarda semi-automática calibre 12). Durante a dispersão da 'Rodamina B' deve ser vedado o trânsito de embarcações sobre a mancha, pois o mesmo altera o processo de dispersão.

12. Lançar na água, próximo ao ponto de liberação da 'Rodamina B', a placa móvel de sinalização aérea. Esta placa facilita a visualização, nas fotos aéreas, do centro de massa da mancha.

13. Aguardar cerca de 1,5 minuto após o lançamento da 'Rodamina B' e autorizar a realização de uma seqüência de 3 fotos aéreas, registrando os momentos iniciais do experimento.

14. Aguardar o tempo pré-estabelecido (neste trabalho foi de 15 minutos contados a partir da liberação e depois sucessivamente entre uma amostragem e outra) e seguir para a mancha com o barco auxiliar a fim de iniciar a primeira coleta. A opção por este intervalo de tempo se baseou em experiências pretéritas que indicavam que as condições dinâmicas reinantes naquele momento (superfície muito agitada) associadas à pequena massa de corante liberada (300

g) não garantiriam um contato visual por mais de 1 hora.

15. Autorizar a realização de um conjunto de 3 fotos aéreas da mancha durante a operação de coleta das amostras.

16. Iniciar a coleta pelo transecto longitudinal, eixo principal da mancha.

17. Tomar a primeira amostra em um ponto situado antes da fronteira visual da mancha. Iniciada a coleta, o barqueiro deve permanecer com o motor em marcha lenta de tal forma que o barco se desloque com velocidade mínima (no caso, 1 nó).

18. Colher as amostras mantendo o mesmo intervalo de tempo, rota retilínea e firme e velocidade constante. Manobras bruscas dentro da mancha estão descartadas, pois estes movimentos aceleram a mistura provocando a fragmentação da mancha'.

19. Durante a coleta, registrar as coordenadas de no mínimo 3 pontos, nos extremos e no centro do transecto. Sugere-se também, que pelo menos uma vez em cada mancha seja feita uma prospecção ao longo da coluna d'água para determinar a distribuição vertical da 'Rodamina B'. A amostragem vertical deve ser realizada no centro da mancha, ponto de maior concentração de 'Rodamina B'.

20. Terminada a operação, retornar ao barco base para acondicionamento final dos frascos, registrar os dados observados e preparar a próxima coleta.

21. Repetir integralmente do item 15 ao 20 para cada uma das amostragens seguintes.

22. O número de amostragens deve ser estabelecido antecipadamente em função das escalas temporal e espacial previstas para o experimento.

Tratamento dos dados

As amostras foram processadas utilizando-se um espectofotômetro (GBC UV/VIS 911A). Foram medidas as absorbâncias das amostras numa cubeta de 5 ml de trajeto ótico. Para atingir precisão e exatidão, cada leitura foi repetida 3 vezes. As absorbâncias encontradas são apresentadas na Tabela 1.

As aerofotografias foram tratadas com o auxílio de quatro softwares específicos: ER Mapper 5.2, Autocad R12, Statistic e o Excel.

No caso da câmara utilizada nesta pesquisa (Kodak DCS-460-CIR), os contadores digitais podem assumir até 256 níveis. Esse valor representa a resolução radiométrica de uma imagem na forma digital. O contador digital não possui sentido físico, entretanto todo o sinal que chega ao sensor é transformado em contadores digitais e está associado à radiância proveniente do alvo. A radiância nesse caso é a razão entre o fluxo radiante refletido (ou emitido) por unidade de área projetada e por unidade de ângulo sólido na direção considerada. Os fatores que influenciam a radiância provocam mudanças nas condições de obtenção da imagem, sendo necessária a normalização desses efeitos. Tais normalizações são exigidas quando imagens da mesma área são obtidas em diferentes épocas do ano ou por sensores diferentes (Lahm,1995).

Como no presente caso as imagens (Fig 5, 6, 7 e 8) foram obtidas a baixa altitude (abaixo de 240 m), durante um intervalo de tempo muito pequeno (1 hora) e foi utilizada a mesma câmara para todas as aerofotos (Kodak DCS-460-CIR), assumimos que não houve alterações significativas na radiância associada aos contadores digitais registrados entre a primeira e a última aerofoto, de tal forma que podemos estabelecer a relação direta entre as concentrações e os contadores digitais, nos mesmos pontos.

Figura 5 – Aerofoto da mancha no momento do início do experimento.
Instante: 130 s após a liberação da "Rodamina B".
Escala 1:937,5

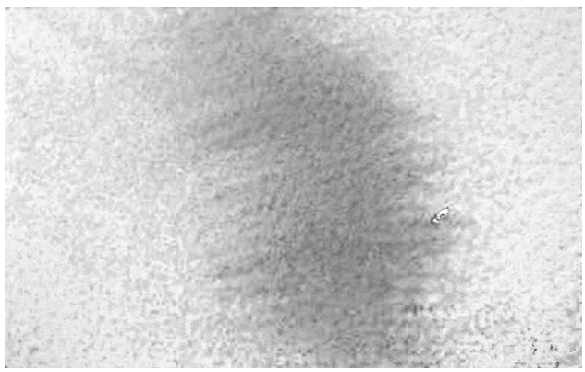


Figura 6 – Aerofoto da mancha no momento da 1ª amostragem.
Instante: 996s após a liberação da "Rodamina B".
Escala 1:937,5

Utilizando o ER Mapper 5.2, foram feitos registros da variação espectral contínua da radiância sobre os transectos e em cada uma das manchas. Os gráficos obtidos relacionam a posição do pixel, em coordenadas de tela, com o valor do contador digital de cada pixel variando de 0 a 255. Sobre cada imagem foram alocados os pontos de coleta das amostras ao longo dos transectos (Fig. 9, 10) e com o auxílio do Autocad R12 foram realizadas as medições dos perímetros e das áreas das manchas.

Figura 7 – Aerofoto da mancha no momento da 2ª amostragem.
Instante: 1998s após a liberação da "Rodamina B".
Escala 1:1500

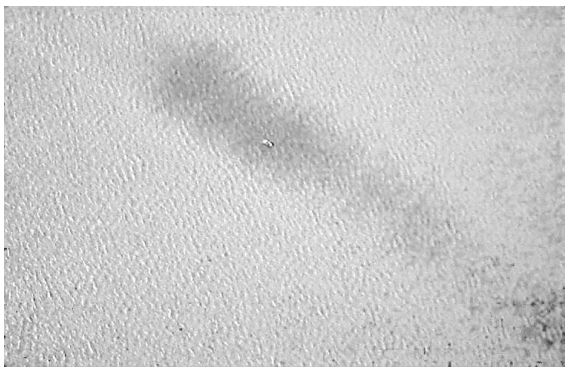


Figura 8 – Aerofoto do momento da 3ª amostragem.
Instante: 2882s após a liberação da "Rodamina B".
Escala 1:1500

O valor da radiância no ponto amostrado foi calculado considerando-se a média dos valores das radiâncias registradas no pixel do ponto e nos oito pixels do entorno do ponto amostrado, conforme esquema e equação abaixo. O código digital (CD) é o valor do nível de cinza definidor da radiância no ponto.

1	2	3
4	Pt	5
6	7	8

$$CD_m = \frac{CD_{Pt} + \sum_{1}^{8} CD_i}{9} \qquad (3)$$

CD_m é o valor médio da radiância calculado para o ponto 'Pt', CD_{Pt} é o valor da radiância medida em 'Pt', CD_i é o valor da radiância medida nos pontos do entorno de 'Pt'.

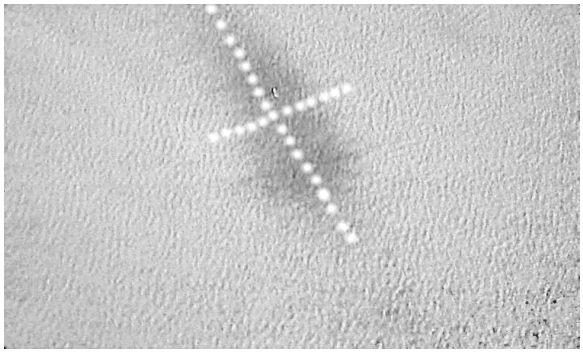


Figura 9 – Indicação aproximada dos pontos de coleta. Transectos: longitudinal (longo) e transversal (curto). Instante: 1998s após a liberação da "Rodamina B".
Escala 1:1500

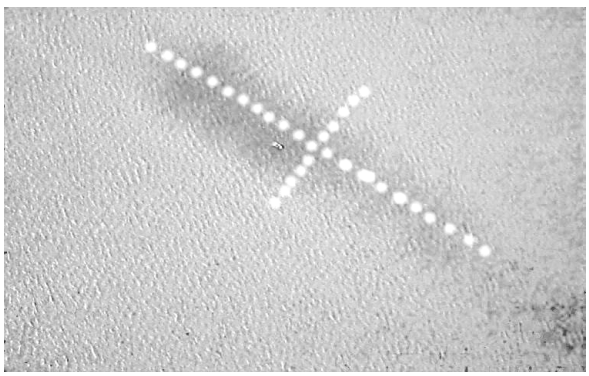


Figura 10 – Indicação aproximada dos pontos de coleta. Transectos: longitudinal (longo) e transversal (curto). Instante: 2882s após a liberação da "Rodamina B".
Escala 1:1500

Foram construídas curvas relacionando os contadores digitais encontrados em cada ponto com seus correspondentes valores de concentração medidos nas amostras colhidas. A partir dos dados extraídos destas curvas com o auxílio do aplicativo para cálculos estatísticos 'Statistic', foram obtidas as equações de correlação entre os valores dos contadores digitais e os valores das concentrações, considerando o universo amostrado para cada um dos transectos e para cada uma das manchas em particular.

Tabela 1 – Valores das absorbâncias medidas nos pontos amostrados durante a campanha experimental.

1ª. Amostragem				2ª. Amostragem				3ª. Amostragem			
Transecto 1A		Transecto 2 A		Transecto 1 B		Transecto 2 B		Transecto 1 C		Transecto 2 C	
Pt	Abs	Pt	Abs	Pt	Abs	Pt	Abs	Pt	Abs	Pt	Abs
1	0,309	1	0,312	1	0,340	1	0,334	1	0,300	1	0,360
2	0,349	2	0,368	2	0,326	2	0,415	2	0,310	2	0,343
3	0,469	3	0,366	3	0,347	3	0,398	3	0,320	3	0,328
4	0,462	4	0,381	4	0,345	4	0,359	4	0,350	4	0,337
5	0,392	5	0,432	5	0,341	5	0,354	5	0,313	5	0,314
6	0,354	6	0,551	6	0,386	6	0,391	6	0,322	6	0,371
7	0,445	7	0,409	7	0,346	7	0,425	7	0,320	7	0,352
8	0,454	8	0,487	8	0,439	8	0,420	8	0,340	8	0,344
9	0,392	9	0,535	9	0,309	9	0,445	9	0,352	9	0,289
10	0,360	10	0,517	10	0,345	10	0,308	10	0,360	10	0,312
11	0,340	11	0,487	11	0,348	11	0,327	11	0,350	11	0,341
12	0,330			12	0,384			12	0,330		
13	0,328			13	0,329			13	0,325		
				14	0,381			14	0,341		
				15	0,383			15	0,373		
				16	0,422			16	0,330		
				17	0,318			17	0,340		
				18	0,314			18	0,320		
				19	0,321			19	0,343		
				20	0,338						

Tabela 2 – Dados de captura das aerofotos e as coordenadas centrais das manchas.

INSTANTE	FOTO	HORA	H (m)*	COORDENADAS
Inicial (130 s)	01 02 (Fig 5)	16:41:10 16:42:10	150 150	32° 03' 06" S 052° 04' 19" W
1ª. Amostragem (996 s)	03 (Fig 6) 04	16:55:20 16:55:36	150 150	32° 03' 23" S 052° 04' 25" W
2ª. Amostragem (1998 s)	05 (Fig 7) 06 07	17:12:18 17:12:28 17:12:34	240 240 240	32° 03' 25" S 052° 04' 33" W
3ª. Amostragem (2882 s)	08 09 (Fig 8)	17:26:27 17:27:02	240 240	32° 03' 27" S 052° 04' 39" W

* Altura da aerofoto.

O gráfico apresentando a correlação entre a curva da radiância (contadores digitais) e a curva da absorbância (Abs), bem como a equação de correlação obtida para o instante 2882s após a liberação da 'Rodamina B', é apresentado na figura 12. Maiores detalhes e visualização das demais curvas são encontrados em Fontoura (2000).

RESULTADOS

Dados coletados

Foram adquiridas 9 fotografias aéreas distribuídas da seguinte forma: 2 aerofotos referentes ao momento de liberação da 'Rodamina B'; 2 aerofotos referentes ao momento da primeira amostragem, 3 aerofotos referentes ao momento da segunda amostragem e 2 aerofotos referentes ao momento da terceira amostragem. De cada conjunto foi escolhida a aerofoto considerada em melhores condições de ser processada, num total de 4 aerofotos (Fig 5, 6, 7 e 8). Os dados relativos à aquisição das aerofotos são apresentados na Tabela 2.

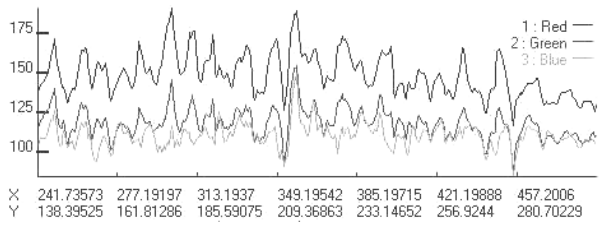
Foram coletadas, também, 85 amostras de água distribuídas dentro das três manchas para tempos de 996 s, 1998 s e 2882 s após a liberação da 'Rodamina B', respectivamente. As amostras foram colhidas ao longo de dois transectos por mancha (ortogonais entre si) num total de 6 transectos, conforme apresentado nas figuras 9 e 10. Para maiores detalhes e visualização dos transectos iniciais consultar Fontoura (2000).

Os valores das absorbâncias são relacionados conjuntamente com suas posições sobre os respectivos transectos na Tabela 1.

Dados tratados

O gráfico apresentando o registro espectral da radiância nos eixos longitudinal e transversal da mancha é mostrado na figura 11('a' e 'b'), para o instante 2882s, após a liberação da 'Rodamina B'. Todas as leituras foram realizadas na banda do vermelho, pois foi a que apresentou a resposta espectral mais forte. A banda do vermelho está assinalada nos gráficos pela onda situada na posição superior. Para maiores informações e visualização dos demais registros espectrais ver Fontoura (2000).

(a)



(b)

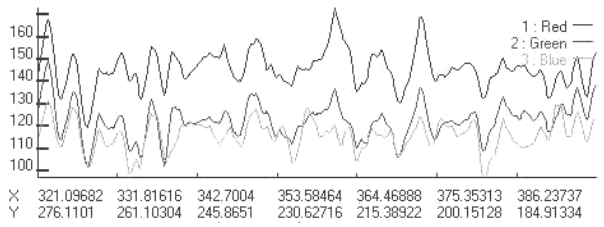


Figura 11 – Distribuições espectrais da radiância. Transectos: longitudinal (a) a transversal (b).
Instante: 2882s após a liberação da "Rodamina B".
Eixo das abscissas: coordenadas de tela.
Eixo das ordenadas: valor dos contadores digitais.

A figura 12 mostra a estreita correspondência entre a radiância e a absorbância observada para os mesmos pontos, no instante 2882 s. A forte relação existente, evidenciada pelos elevados coeficientes de correlação linear, permitiu estabelecer por regressão, as equações entre as duas grandezas.

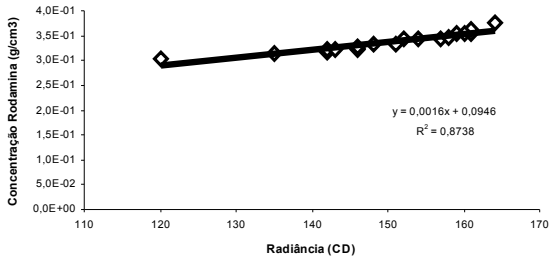
As equações foram determinadas para cada uma das manchas e para cada um dos transectos em particular. A absorbância foi tomada como variável dependente definida em função do valor da radiância para cada ponto, sendo esta, representada pelos contadores digitais (CD).

Este momento, na verdade, representa uma transição no processo, onde a estreita correlação entre as grandezas envolvidas e a conseqüente criação das equações matemáticas que as relacionam, permitem, na seqüência, o estabelecimento dos perfis contínuos das concentrações de 'Rodamina B' no ambiente, construídos a partir das amostragens discretas da água e do registro contínuo da radiância.

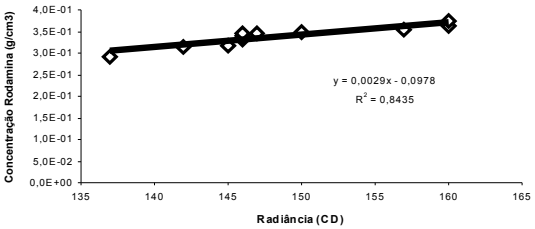
As concentrações (g/cm³) são obtidas a partir das absorbâncias, com o auxílio de uma reta padrão.

A distribuição real e contínua das concentrações de 'Rodamina B', é apresentada na figura 13, mostrando as curvas de distribuição ao longo dos transectos longitudinal e transversal da mancha no instante 1998s após o lançamento da 'Rodamina B'. Estas distribuições foram obtidas aplicando-se as equações de correlação aos registros espectrais contínuos da radiância obtidos com o auxílio do ER Mapper 5.2. Elas representam as concentrações de 'Rodamina B' em cada ponto do transecto, plotadas contra a distância em metros, entre o ponto que está sendo considerado e o ponto inicial de cada transecto. Novamente detalhes e demais curvas são apresentados em Fontoura (2000).

Estas curvas poderão ser utilizadas para validação de modelos matemáticos, bastando para tanto, compará-las com os resultados modelados.



(a)



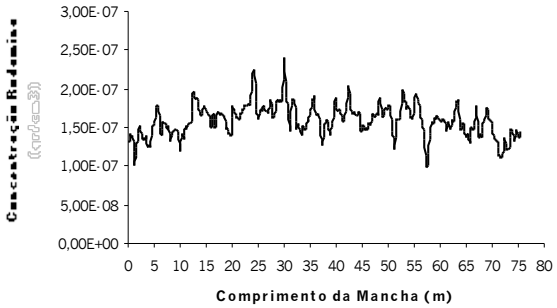
(b)

Figura 12 – Correlação entre a radiância e a concentração de "Rodamina B".
Transectos: longitudinal (a) e transversal (b).
Instante: 2882s após o lançamento da "Rodamina B".

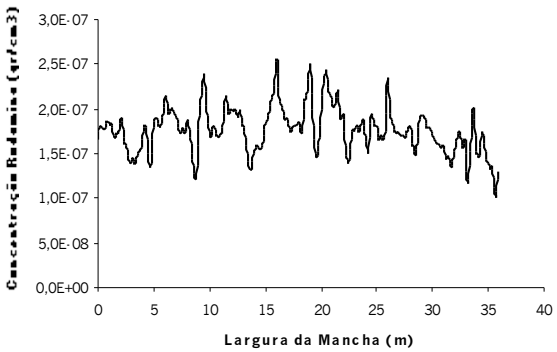
DISCUSSÃO

Todo o trabalho de campo apoiou-se na metodologia utilizada por Ikeda & Stevenson (1981), Stevenson & Inostroza (1984b) e Stevenson, et al (1984), que se valeram da interpretação das propriedades óticas das aerofotos. Em contrapartida, entende-se que o método da medição da

fluorescência reportado em Pritchard & Carpenter (1960), Stevenson (1966), Okubo (1968b), Murthy & Miners (1978) e Roldão & Goretkin (1984), por sua importância, pioneirismo e universalidade, não pode passar despercebido em nenhum trabalho que pretenda abordar com profundidade a dispersão de substâncias em corpos naturais.



(a)



(b)

Figura 13 – Distribuições contínuas das concentrações de "Rodamina B". Transectos: longitudinal (a) e transversal (b). Instante: 1998s após o lançamento da "Rodamina B".

Certamente a questão crucial na discussão das vantagens e desvantagens do método da medição da radiância (propriedades óticas), está ligada à necessidade de limitações e aproximações, que em parte poderiam ser evitadas com o uso do método de medição da fluorescência.

A constatação de que os valores extremos das curvas continuas de concentração da 'Rodamina B' flutuaram entre um máximo de 3E-7 g/cm³ e um mínimo de 1E-7 g/cm³ deixa explícita uma das fragilidades do método adotado. Pela lógica, o valor mínimo neste caso deveria ser zero, já que representa a concentração de 'Rodamina B' em um ponto externo à fronteira da mancha, onde a presença do corante é nula. Logo, percebeu-se que, apesar dos cuidados para que os pontos inicial e final do transecto fossem tomados fora da fronteira visual da mancha, os pesquisadores foram traídos por sua acuidade visual, já que o espectofotômetro utilizado detectou 'Rodamina B' em uma amostra onde visualmente não se percebia a sua presença (limite de detecção: 1E-8 g/cm³).

Portanto, se a amostragem da água tivesse sido realizada com o uso de um fluorímetro de filtro, com leitura em tempo real, certamente os valores encontrados estariam dentro do limite de detecção deste aparelho e, portanto, não teriam sido tomados como sendo os limites externos da fronteira real da mancha. Esta constatação deixa claro que as manchas reais possuíam, na verdade, áreas reais maiores do que aquelas que foram encontradas.

De uma imagem que registra o espectro na banda do visível não podem ser retiradas informações que ultrapassem as contidas no feixe de luz refletido pelo alvo, seja este percebido pelo olho humano ou analisado por um programa de computador. Portanto é uma limitação intrínseca da metodologia escolhida.

Outro ponto frágil do método fotográfico está na dificuldade operacional de se fazer a coincidência exata entre o ponto real amostrado e sua posição virtual na mancha fotografada. É forçoso reconhecer a necessidade do uso de um conceito de aproximação, tanto mais medições indiretas forem obtidas. O uso da velocidade constante do barco de coleta é uma destas formas de medição indireta.

Entretanto, é importante evidenciar que nem mesmo a utilização de equipamentos geodésicos sofisticados (GPS) é suficiente para eliminar completamente a presença deste tipo de limitação, embora, com equipamentos adequados e em situação favorável possa ser bastante minimizada. O uso de um fluorímetro de filtro, com passagem contínua eliminaria este problema, já que, seria suficiente conhecer o ponto inicial e o final do transecto, e assim mesmo, com o objetivo único de localização temática do evento.

Outra limitação, inerente ao método utilizado, é a forma de determinação do valor da radiância (contador digital) dos pontos amostrados. A determinação foi feita sobre a aerofoto utilizando-se o software ER Mapper 5.2. Ocorre que as fotografias foram adquiridas em alturas que variaram entre 150 m e 240 m o que lhes confere uma resolução espacial mínima de 0,3 mpp (metros por pixel), ou seja, o valor da radiância encontrada é representativo de uma área extremamente restrita (área no solo representada por cada pixel). Tal circunstância acaba acarretando uma dificuldade real em se determinar na aerofoto a posição exata dos pontos amostrados, podendo estes pontos estarem localizados em qualquer lugar no entorno das posições esperadas.

Segundo Lahm (1995), esta incerteza coopera para aumentar a dificuldade em se definir um valor único e

absoluto para a radiância no ponto escolhido, o que é superado, em parte, pelo uso do valor médio das radiâncias do entorno (Equação 3).

Buscou-se com isso associar ao ponto um valor médio de radiância que fosse representativo daquela região do transecto. Esta é mais uma das aproximações que pode ser evitada com a utilização do método direto de medição da fluorescência 'in situ'.

Finalmente, os erros matemáticos inseridos no processo, pelo método estatístico utilizado na determinação das equações de regressão, bem como, aqueles impostos pela quantidade e qualidade da população amostrada, e que naturalmente, não estão presentes no método da medição direta.

Em contrapartida, o método alternativo, aqui estudado, apresenta em sua defesa os menores custos envolvidos e, principalmente, a possibilidade de execução deste tipo de pesquisa mesmo para aqueles que não dispõem de fluorímetro de passagem direta.

O fato de dispormos dos meios flutuantes com tripulação adequada, de um sistema aerofotográfico e acesso à plataforma de vôo do Aeroclube local, facilitou muito o empreendimento, já que, os demais equipamentos foram construídos por nós.

De qualquer forma, os custos finais ficaram bem abaixo daqueles esperados com a compra de um fluorímetro de fluxo contínuo e o conjunto de periféricos necessários para sua operação 'in situ', conforme descrito por Roldão & Goretkin (1984).

Por outro lado, ganhamos a informação visual da aerofoto, tão importante na percepção do desenvolvimento espacial do fenômeno, e que, certamente, não disporíamos se adotado o método da medição direta.

CONCLUSÕES

1. A metodologia adotada, depois de adaptada às peculiaridades do estuário da Lagoa dos Patos, mostrou-se eficaz e capaz de fornecer os resultados esperados. Os meios e recursos envolvidos podem ser facilmente requeridos, o que, de certa forma, confere ao método condições de aplicabilidade simples e de baixo custo. O grau de confiabilidade dos resultados obtidos é bastante alto nas liberações superficiais, ao mesmo tempo em que, o panorama das informações fica enriquecido pela visualização das distribuições espaciais do contaminante, que somente pode ser obtida por este método.
2. O experimento permitiu levantar dados suficientes para calibrar e validar um modelo numérico de difusão em superfície, disponibilizando-o para uso em estudos na região.

REFERENCIAS

FONTOURA, J.A.S. 2000. *Uso da 'Rodamina B' na validação de um modelo numérico de dispersão em superfície, no estuário da Lagoa dos Patos*. Dissertação de mestrado. Engenharia Oceânica/FURG. Rio Grande, RS. 156 p.

FONTOURA, J.A.S. & C. HARTMANN. 2001. *Captura de imagens aéreas de pequeno formato utilizando o sistema 'ADAR-1000'*. Anais do 8º. Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Imbé, RS, 14 a 19 de outubro. 13 p.

GUERRERO, P.L., J.S.F. ROLDÃO & R.R. ESTELITA. 1985. *Estudo de dispersão no rio Guaíba*. Projeto COPPETEC – ET – 15226. Relatório Técnico. COPPE/UFRJ.

HARTMANN, C. 1996. *Dinâmica, distribuição e qualidade do material em suspensão na região sul da Laguna dos Patos*, RS, Brasil. Tese de Doutorado. IG/UFRGS. 364 p.

IKEDA, Y. & M. R. STEVENSON. 1981. *Seasonal characteristics of hidrography, turbulence and dispersion near Ilha Grande (RJ), Brazil*, based on R/V "Prof. W. Besnard" data. Boletim Instituto de Oceanografia. USP. Brasil

LAHM, R. 1995. *Análise da correlação entre o Seston e seu comportamento espectral no canal do Rio Grande, RS, Brasil*, através do uso de imagens orbitais Landsat TM. Dissertação de mestrado. CPSRM/UFRGS. 128 p.

MENEGASSI, J. 1973. *Previsão da poluição devida ao futuro emissário cloacal da cidade de Porto Alegre*. Departamento de energia nuclear. UFRJ.

MURTHY, C. R. & K. C. MINERS. 1978. *Turbulent diffusion processes in the great lakes*. Scientific series no. 83. Inland waters directorate. Canada center for inland waters. Burlington. Ontário. 27 p.

OKUBO, A. 1968a. *A new set of oceanic diffusion diagrams*. Technical report 38. Chesapeake Bay Institute. The Johns Hopkins University. 47 p.

OKUBO, A. 1968b. *Some remarks on the importance of the "shear effect" on horizontal diffusion*. J. Oc. Soc. Japan, 24 (2) : 60-69.

PRITCHARD, D.W. & J.H. CARPENTER. 1960. *Measurements of turbulent diffusion in estuarine and inshore waters*. Bull. Int. Assoc. Sci. Hidrol. No. 20, 37-50, December 1960.

ROLDÃO, J.S.F. & G. GORETKIN. 1984. *Calibração de modelos matemáticos aplicáveis à simulação do transporte e dispersão em águas costeiras. Uso de traçadores fluorescentes*. Anais do 1.º seminário de modelagem numérica do mar, instituto nacional de pesquisas espaciais (INPE), 12 a 14 de Dezembro 1984, p. 269-280.

STEVENSON, M.R. 1966. *Subsurface currents off the Oregon coast*. Phd Thesis. Oregon State University. 140 p.

STEVENSON, M.R., H.M. INOSTROZA V. & C.A. STEFFEN. 1984. *Distribution of sea surface temperature in the area of the Angra dos Reis power plant : final report for missions 1, 2 and 3*. INPE-3000-RA/175. 58 p.

STEVENSON, M.R. & H.M. INOSTROZA V. 1984a. *Diffusion coefficients for coastal waters determined from aerial photographs*. IN : Proceedings of IV annual meeting of selper (sociedad de especialistas latino-americanos en percepción remota). Santiago. Chile. November 12-18.

STEVENSON, M.R. & H.M. INOSTROZA V. 1984b. *Comparison of a diffusion model with dye dispersion measurements to study turbulence in coastal waters*. Anais do 1.º seminário de modelagem numérica do mar. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 12-14 Dezembro, p. 282-305.

Methedology for the use of the Fluorescent Tracer "Rodamine B" to Study Surface Dispersion, Adapted to the Patos Lagoon Estuary.

ABSTRACT

This study presents a methodology for the study of superficial pollutant dispersion with a fluorescent tracer 'Rodamine B' dye in natural water bodies. Here are presented many practical details to help researchers and students who wish to work with 'Rodamine B' dye, but do not have any experience on the subject. The radiance measuring method on aerial photos was chosen over the 'in situ' fluorescence method, and the two methods are compared.

In order to adapt the method to the area and provide the case study, data acquired during field work (1997 and 1998) in the southernmost part of the Patos Lagoon estuary were used.

This methodology consists of generating superficial dye paths and monitoring their dispersion with aerial photographs and sequential water sampling, in orthogonal transects over each generated dye path. The real and continuous curves of 'Rodamine B' dye concentrations are obtained by statistical correlation between the absorbance measured in water samples and the radiance level extracted from aerial photos for the same points.

This study describes several types of chemical fluorescent tracers, their application and choice, how to prepare 'Rodamine B' dye solution in the laboratory, as well as the care required in transport and field use. It also shows, step by step, planning the experiment, equipments and infrastructure needed, tracer delivery form, water sampling and the acquisition of aerial photographs, as well as later treatment and analysis of data obtained.

In future, using same data, we intend to study the determination of eddy diffusion coefficients and validation of a mathematical model of dispersion.

Key-Words: Rodamine B, pollutant dispersion, chemical tracers, fluorescent tracers, oceanic tracers, estuary, Patos Lagoon.