

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA
ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E
MÉTODOS DE ANÁLISE MULTIVARIADA

André Mendes
Depto. de Engenharia Eletro-Mecânica, UFAL
57000 - Maceió - Alagoas

Vitor Haertel
Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento
Remoto e Meteorologia - CEPSRM
91501 - Porto Alegre - RS

Carlos Hartmann
Depto. de Geociências, FURG
96200 - Rio Grande - RS

Jorge Centeno
Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS
91501 - Porto Alegre - RS

RESUMO

A região estuarina da Laguna dos Patos no sul do Brasil apresenta grande importância na economia da região e por essa razão vem sendo objeto de estudos diversos. O presente trabalho faz uso de técnicas de regressão linear simples para correlacionar alguns parâmetros de qualidade da água (total de sólidos em suspensão, transparência e salinidade), com dados obtidos pelo satélite LANDSAT-5, sensor TM. São utilizados dados de banda TM-3 e da primeira componente principal (a partir das bandas TM-1, TM-2, TM-3 e TM-4). Uma análise dos resultados é apresentada, sugerindo a metodologia mais adequada a região.

ABSTRACT

The Laguna dos Patos estuarine region in southern Brazil is an area of great importance to the economy of that region. Consequently a number of research projects have been proposed involving this region. Experiments involving linear regressives techniques for reflectance and some water quality parameters are reported in this paper. Suspended solids, transparency and salinity were correlated with LANDSAT-TM data. TM-3 band and the first principal component (from bands TM-1, TM-2, TM-3 and TM-4) were used in this study. It is showed through this research that this approach to model water quality works well for some parameters.

1. INTRODUÇÃO

Há vários anos as técnicas de Sensoriamento Remoto vêm sendo utilizadas no mundo todo em estudos de qualidade da água (Klemas et al., 1973; Rouse e Coleman, 1976; Gagliardini et al., 1984, entre outros).

As regiões costeiras, mais especificamente os estuários, baías e lagunas são consideradas como sendo os locais mais adequados para testar e calibrar dados de Sensoriamento Remoto, porque, nestas regiões são encontrados os maiores gradientes de temperatura, salinidade, cor da água, além de outros parâmetros.

Devido às características acima citadas, aliadas à importância econômica que representam, as regiões costeiras podem ser caracterizadas como áreas prioritárias para fins de aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto. Entre essas áreas, as regiões estuarinas se constituem nos ecossistemas que mais sofrem os efeitos nocivos da ação do homem, por serem eles finais dos vários processos que ocorrem nas bacias contribuintes.

No Brasil, destaca-se a região lagunar da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, que devido às suas dimensões (10.360 km²) é especialmente adequada à utilização desta técnica, constituindo-se num laboratório natural, como assim a de

nominou Herz, 1977.

A porção sul desta laguna, forma na maior parte do ano um ambiente estuarino e, como tal, a região de maior importância deste amplo ecossistema, para estudos da qualidade da água, circulação, pesca, além de outros. Por outro lado, devido a sua dinâmica e a mistura das diferentes massas de água que aí interagem, torna-se um ambiente de difícil investigação, necessitando de grande apoio logístico e de material, considerando sua investigação convencional e, portanto, demasiado oneroso para as instituições de pesquisa locais.

Desta forma, o Sensoriamento Remoto é uma ferramenta que possibilita a obtenção de dados sinóticos, multiespectrais e multitemporais, que vem sendo utilizada há algum tempo em pesquisas na área. A maioria destas pesquisas relaciona-se ao estudo da circulação superficial, tendo o material em suspensão como traçador natural, dentre os quais citamos:

Herz e Tavares Jr, 1974; Herz et al, 1978; Herz, 1977; Hartmann et al., 1982; Hartmann e Sano, 1986, dentre outros.

Por outro lado, as imagens Landsat quando obtidas simultaneamente com amostragem "in situ", possibilitam obter modelos de correlação entre os níveis digitais e os dados ambientais. Nesta região, trabalho neste sentido foi desenvolvido por Hartmann, 1988 e Mendes et al., 1989.

Este trabalho tem por objetivo estudar a utilização de técnicas de regressão linear simples, para correlacionar parâmetros da qualidade da água (sólidos em suspensão total, salinidade e transparência da água) com dados TM-Landsat, a fim de sugerir a metodologia mais adequada à região estuarina da Laguna dos Patos.

1.1. Localização da área

A área de estudo compreende parte do estuário da Laguna dos Patos, região que

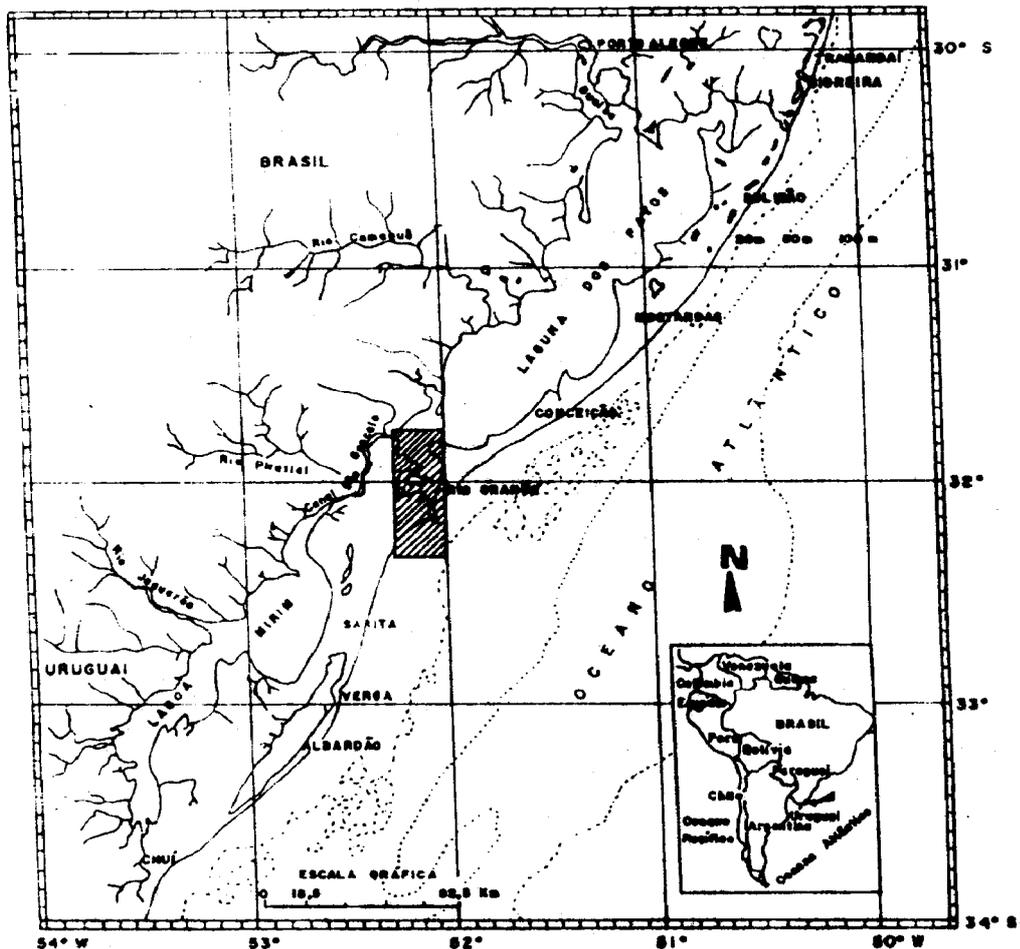


Figura 1 - Localização da 841 de estudo (região hachurada)

vai desde os molhes da Barra, até a parte mediana mais ao Norte (Figura 1).

2. METODOLOGIA

2.1. Dados necessários

A análise de três parâmetros de qualidade de água: material em suspensão, salinidade e transparência foi desenvolvida fazendo uso de imagens digitais, obtidas pelo sistema LANDSAT-TM. Conforme o capítulo anterior, a área teste está compreendida na região estuarina da Laguna dos Patos, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Foi utilizada uma cena, obtida no dia 08 de abril de 1984, caracterizada como órbita 221, ponto 82, quadrante C. A respectiva fita magnética compatível com computador (CCT), contendo as bandas espectrais do sistema LANDSAT-TM foi adquirida no Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE, em São José dos Campos, São Paulo.

Os dados relativos aos parâmetros de qualidade da água *in situ* foram coletados pela equipe da Fundação Universidade de Rio Grande - FURG, na mesma época em que a imagem foi obtida. Amostras de água foram coletadas em pontos diversos da região estuarina e posteriormente analisadas para medida dos parâmetros relevantes. Esta análise foi feita nos Laboratórios de Oceanografia Geológica (LOG) da FURG. A localização dos pontos de coletas das amostras foi feita utilizando-se seções transversais, definidas por meio de pontos notáveis na costa e por boias e faroletes de sinalização utilizados ao longo dos canais de navegação, conforme indicado nas cartas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) do Ministério da Marinha. Idealmente a data de coleta das amostras deveria coincidir com o instante da passagem do satélite. Essa condição não foi rigorosamente observada na presente análise. Dadas, porém, as condições reinantes nessa época, parece aceitável supor que não ocorreram alterações sensíveis nos valores dos parâmetros durante esse período de tempo.

2.2. Análise da Imagem Digital

Uma imagem pode ser descrita por uma função $f(x,y)$, onde x,y representam coordenadas especiais sobre a imagem e $f(x,y)$ o nível de cinza ou brilho da imagem na posição (x,y) . Em uma imagem digital, $f(x,y)$ é discretizada tanto em relação às coordenadas (x,y) , como, também, quanto ao nível de cinza $f(x,y)$. Uma imagem digital é, portanto, representada por uma matriz. As linhas e colunas identificam a posição de cada um desses elementos que compõem a imagem. O valor numérico desses "elementos" indicam o nível de cinza respectivo. Esses elementos da ima-

gem são geralmente conhecidos por "pixels".

Este tipo de representação da imagem torna-se adequada a sua análise por computadores.

Em Sensoriamento Remoto, as imagens digitais ocupam 6 bits por pixel (sistemas LANDSAT-TM e SPOT multiespectral, resultando em 64 e 256 diferentes níveis de cinza, respectivamente. A imagem é armazenada em um formato compactado em fitas magnéticas (CCT).

A análise dos dados digitais, obtidos da CCT foi realizada, utilizando-se o sistema de Tratamento Interativo de Imagens - SITIM-150, instalado no Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, CEPSRM, em Porto Alegre.

O SITIM-150 é formado por um computador e uma unidade de visualização modular, que pode operar independentemente ou como estação de trabalho ligada a um computador de maior porte. Suas principais características são:

- Utilização de até 4 planos de imagens 1.024×1.024 pontos de 4 ou 8 bits cada, totalizando até 4 Mb.

- Visualização da imagem através de uma janela de até 512×512 pontos. A janela pode ser deslocada sobre a imagem (vão) utilizando um fator de escala qualquer (zoom).

- Geração de cores verdadeiras, utilizando um plano de imagem para cada cor primária (R, G, B) ou cores falsas, utilizando um único plano de imagem.

- Utilização de um plano gráfico que pode ser visualizado independentemente ou sobreposto à imagem.

2.3. Modelo utilizado para a análise

No presente estudo foi adotado um modelo linear de regressão para descrever o comportamento dos parâmetros de qualidade da água em função dos dados de resposta espectral.

A suposição cuja validade deve ser testada estatisticamente é a de que as características de reflectância de corpos de água dependem em alto grau de certos parâmetros de qualidade de água permitindo o estabelecimento de um modelo linear que explique a variação dos últimos em função dos primeiros. Essa abordagem já foi investigada com razoável sucesso por outros autores (Khorram, 1985; Khorram et al., 1985; Stumpf, 1988; Jensen et al., 1989).

A finalidade desse trabalho consiste, portanto, em desenvolver e testar um modelo semelhante para a região estuarina da Laguna dos Patos. Técnicas de regressão linear, simples e múltipla, mostram-se adequadas à essa finalidade. Va-

riável (ou variáveis) cuja obtenção é relativamente fácil é assumida como variável independente (x). Variável de determinação mais difícil (maior custo em tempo e/ou recursos financeiros) é assumida como variável dependente (Y). No caso presente, a variável independente passa a ser as características de resposta espectral do corpo d'água (x), obtidas de forma digital da CCT, enquanto que as variáveis dependentes passam a ser os parâmetros de qualidade d'água (Y). O modelo linear assume, então, a forma:

$$Y = ax + b + E$$

onde:

E = Variável aleatória que descreve o valor predito pelo modelo ($Y = ax + b$) e o valor real medido Y;

Y = Variável dependente;

x = Variável independente;

a e b = Parâmetros do modelo, a serem estimados.

A validade do modelo repousa nas seguintes suposições:

- Os valores de x são conhecidos, isto é, não é uma variável aleatória.

- Y é uma variável aleatória; para cada valor de x, Y apresenta uma distribuição normal com média $\mu_{Y/x} = ax + b$ e variância $\sigma^2_{Y/x}$.

- Os diversos valores de Y são independentes entre si.

- $\sigma^2_{Y/x} = \sigma^2$ é constante, para qualquer x.

Um exame cuidadoso das variáveis envolvidas nesse trabalho sugere que essas suposições são satisfeitas.

Os coeficientes do modelo linear a e b e mais o parâmetro $\sigma^2_{Y/x}$ são desconhecidos, devendo ser estimados a partir de observações (x_i, Y_i), com $i = 1, n$, sendo n o tamanho da amostra.

A técnica utilizada consiste em minimizar o somatório dos quadrados das discrepâncias entre os valores medidos Y_i e os valores preditos \hat{Y}_i (método dos mínimos quadrados).

2.4. Variáveis independentes

É um fato já conhecido que a região mais adequada do espectro eletromagnético para estudos dessa natureza situa-se na região 0.6-0.7 μm . Nessa região, a água apresenta uma transmitância mais elevada (menor absorção, permitindo uma melhor interação entre a radiação incidente e alguns parâmetros de interesse como sólidos em suspensão, concentração de clorofila e outros). Por esta razão, as análises foram efetuadas utilizando-se o canal TM-3 (0.63/0.69 μm). A alta absorção da água a partir do infra-vermelho próximo

mo torna a utilização dos canais correspondentes inadequada.

A maior adequidade do canal TM-3, não significa, entretanto, que outras bandas espectrais sejam irrelevantes. Informações contidas em outros canais podem ser utilizadas para melhorar a capacidade do modelo em prever os parâmetros de qualidade da água. Neste caso, modelos de regressão múltipla podem ser utilizados.

É um fato já conhecido, entretanto, que na maior parte das aplicações, as diversas bandas espectrais disponíveis nos sistemas sensores utilizados, apresentam alta correlação. Por essa razão, a sua utilização simultânea torna-se ineficiente: o aumento da dimensionalidade do problema não é acompanhado por um ganho equivalente em informação. Este fato é ilustrado na Tabela 1, que reproduz a matriz variância-covariância, em um estudo envolvendo os canais TM-1, TM-2, TM-3 e TM-4, do sistema LANDSAT, quando aplicadas a uma cena cobrindo a região estuarina da Laguna dos Patos. Fica evidente aqui o alto grau de correlação existente entre essas bandas espectrais.

TABELA 1

MATRIZ DE COVARIÂNCIA ENTRE CANAIS TM (Região estuarina da Laguna dos Patos).

	TM-1	TM-2	TM-3	TM-4
TM-1	3,25	3,75	6,00	1,25
TM-2	3,75	5,44	7,90	1,51
TM-3	6,00	7,90	13,11	3,43
TM-4	1,25	1,51	3,43	2,03

Uma maneira de minimizar esse problema, consiste no emprego de técnicas de Análise Multivariada: as bandas espectrais originais são transportadas, gerando "canais" transformados com baixa correlação. Esta operação permite, portanto, reduzir a dimensionalidade do problema, preservando, ao mesmo tempo, a informação contida nas bandas espectrais originais. Neste trabalho, a transformação "Componentes Principais" é utilizada. Trata-se de uma transformação linear descrita por

$$Z = W \cdot x$$

onde:

x = vetor descrevendo cada pixel. As componentes de x estão associadas aos canais ou bandas espectrais originais.

Z = vetor descrevendo cada pixel após a transformação. As componentes de z estão associadas às componentes principais.

W = matriz transformação; W é escolhida de forma a diagonalizar a matriz variância-covariância de x.

A Tabela 2 ilustra o resultado dessa transformação.

TABELA 2

MATRIZ VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA PARA AS COMPONENTES PRINCIPAIS (Região estuarina da Laguna dos Patos-RS).

	1ª C.P.	2ª C.P.	3ª C.P.	4ª C.P.
1ª C.P.	21,68	0	0	0
2ª C.P.	0	1,55	0	0
3ª C.P.	0	0	0,43	0
4ª C.P.	0	0	0	0,17

As componentes de Z são não-correlacionadas. As variâncias indicam os diversos graus segundo os quais essas componentes descrevem as informações contidas na imagem.

A Tabela 3 permite uma comparação entre a variância dos canais originais (TM-1, TM-2, TM-3 e TM-4) e a variância dos canais transformados (componentes principais).

TABELA 3

VARIÂNCIA DOS NÍVEIS DE CINZA DAS IMAGENS ORIGINAIS E DAS COMPONENTES PRINCIPAIS (Região estuarina da Laguna dos Patos).

CANAL ESPECTRAL	VARIÂNCIA	% TOTAL	COMPONENTE PRINCIPAL	VARIÂNCIA	% TOTAL
TM-1	3,25	13,6	1	21,68	91,0
TM-2	5,44	22,8	2	1,55	6,5
TM-3	13,11	55,1	3	0,43	1,8
TM-4	2,03	8,5	4	0,17	0,7

Pela análise da Tabela 3, verifica-se que os canais originais têm uma variância total (informação), distribuída entre si de modo mais ou menos equitativo. Após a transformação, a primeira componente principal passa a conter 91% da variância total dos dados, concentrando a informação, antes diluída em 4 dimensões, em uma única dimensão. Por esta razão, as análises foram efetuadas utilizando-se, também, a 1ª componente principal.

2.5. Implementação do modelo

Inicialmente, as imagens (canal TM-3 e primeira componente principal) foram submetidas a algumas operações (pré-processamento) de maneira a torná-las mais adequadas ao trabalho presente.

A primeira operação consiste em diminuir o ruído presente na imagem, sobre o corpo d'água. Esse objetivo normalmente é obtido, aplicando-se à imagem um filtro passa-baixas. No caso em estudo, a filtragem foi efetuada no domínio espacial. Três diferentes filtros foram testados (Figura 2).

Filtros passa-baixas atenuam ou removem inteiramente os padrões na imagem que correspondem as frequências espaciais altas, dos quais o ruído é um dos mais

importantes.

A localização dos pontos de amostragem na imagem, para a obtenção do número digital, foi efetuada diretamente na tela do sistema SITIM-150, de uma forma visual, utilizando-se as informações, fornecidas pela equipe de campo da FURG. Nessa operação, números diferentes de pixels por estação de amostragem foram utilizados.

Seguindo o critério proposto por Ritchie e Cooper (1987), foram feitas medidas utilizando um único pixel por ponto de amostragem, agrupamentos de 3x3 pixels e de 5x5 pixels, centrados em torno do pixel inicial. Nos dois últimos casos o número digital associado ao ponto de amostragem foi tomado como a média dos números digitais dos pixels contidos nos agrupamentos. Com esse procedimento, visou-se levar em conta a variabilidade dos dados na imagem digital bem como tentar minimizar os efeitos da incerteza na localização dos pontos de amostragem. Testes estatísticos, visando detectar diferenças entre os resultados fornecidos pelos três processos e a imagem original, são efetuados.

A metodologia utilizada neste trabalho encontra-se esquematizada na Figura 3.

$$\frac{1}{9} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{25} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{49} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 2 Filtros

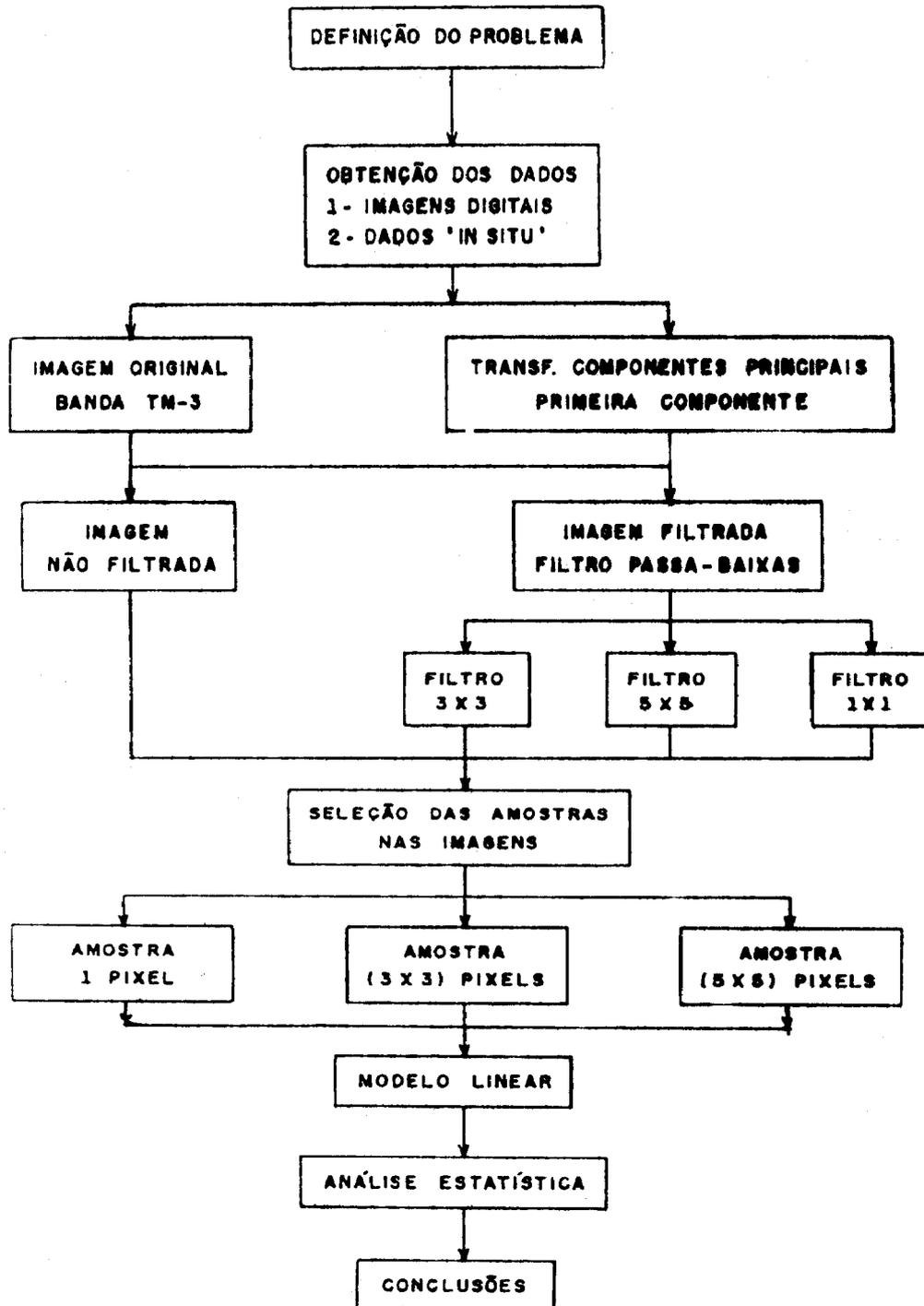


Figura 3 - Metodologia

3. RESULTADOS

Os dados amostrais (9 estações amostrais) foram analisados com relação aos parâmetros salinidade, material em suspensão e transparência. Em cada caso, os seguintes elementos foram estimados a partir das amostras:

- equação da linha de regressão;
- coeficiente de determinação;
- variância da variável dependente

(Y) em relação ao valor predito pelo mo-

delo, isto é, em relação à linha de regressão.

A análise foi feita utilizando-se a Tabela 4.

Os dados importantes para avaliação da validade do modelo linear, são resumidos na Tabela 4. Nessa tabela, constam o coeficiente de determinação R^2 e a estatística F para teste de significância do modelo adotado para os diversos casos.

Segue-se a Tabela 4.

BANDAS/ COMPONENTES	FILTRO	TAMANHO AMOSTRA	MATERIAL EM SUSPENSÃO (mg/l)		SALINIDADE ‰		TRANSPARÊNCIA (m)	
			R ²	F	R ²	F	R ²	F
TM-3	SEM FILTRO	1 x 1	69,1	15,64	5,9	0,40	87,2	99,61
		3 x 3	63,1	11,96	7,4	0,56	94,1	111,27
		5 x 5	53,9	8,19	7,8	0,60	96,1	172,72
	FILTRO 3x3	1 x 1	58,5	9,88	8,2	0,62	95,0	131,76
		3 x 3	58,5	9,88	8,2	0,62	95,0	131,76
		5 x 5	55,8	8,83	9,9	0,77	94,8	127,58
	FILTRO 5x5	1 x 1	55,7	8,83	9,9	0,77	94,8	127,58
		3 x 3	55,8	8,83	9,9	0,77	94,8	127,58
		5 x 5	58,8	10,00	11,6	0,92	94,8	127,58
	FILTRO 7x7	1 x 1	55,2	8,64	11,3	0,89	96,0	167,65
		3 x 3	56,0	8,89	15,7	1,30	95,3	141,24
		5 x 5	56,0	8,89	15,7	1,30	95,3	141,24
1ª COMPONENTE PRINCIPAL (obtida das bandas TM-1, TM-2, TM-3 e TM-4)	SEM FILTRO	1 x 1	87,1	47,06	16,2	1,35	88,3	52,99
		3 x 3	75,5	21,59	12,0	0,95	89,8	61,91
		5 x 5	71,0	17,18	10,3	0,80	89,7	61,10
	FILTRO 3x3	1 x 1	78,1	24,95	10,5	0,82	92,4	85,64
		3 x 3	80,9	29,56	10,0	0,78	89,4	59,04
		5 x 5	72,6	18,52	10,0	0,78	92,2	82,39
	FILTRO 5x5	1 x 1	72,5	18,43	9,4	0,72	92,4	85,02
		3 x 3	72,3	18,29	9,2	0,71	92,2	82,48
		5 x 5	72,7	18,68	9,5	0,73	92,4	85,34
	FILTRO 7x7	1 x 1	69,5	15,99	8,5	0,65	90,7	68,62
		3 x 3	68,0	14,99	7,5	0,57	90,9	70,25
		5 x 5	66,5	13,99	8,6	0,66	93,3	96,86

$$F(1,7,0,95) = 5,59$$

Tabela 4 - Sumário dos resultados obtidos.

A análise da tabela 4 permite as conclusões seguintes: o modelo de regressão linear simples mostra-se eficaz para descrever a transparência da água em função da reflectância observada na banda TM-3. Em todos os casos estudados, a estatística F obtida a partir da amostra permite concluir que o modelo proposto é significativo a um nível de confiança de 95%. Coerentemente, os valores de R² que exprimem a porcentagem da variação total do parâmetro transparência, explicada pelo modelo, é alta.

Observe-se que a aplicação de filtros "passa-baixos" não introduz nenhuma alteração notável nos resultados. Da mesma forma, o número de pixels utilizados sobre cada ponto amostral não resultou em variações, excepto no caso da imagem original, como seria de se esperar. Mas, mesmo nesse caso, a variação foi pequena. Esse último efeito pode ser explicado pela pouca (ou nenhuma) variabilidade da transparência da água nas dimensões atingidas pelo alvo.

Resultados mais completos para o caso da imagem original e alvo 5 x 5 pixels (R² = 96,1%) é mostrado na Tabela 5 e Figura 4.

Para o caso do Material em suspen-

TABELA 5

RESULTADOS DO MODELO LINEAR DE REGRESSÃO
Parâmetro: transparência, imagem original
e alvo de 5 x 5 pixels.

The regression equation is				
TRANS = 0.673 - 0.00857 (TM3)				
Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	
Constant	0.67265	0.01931	34.84	
(TM3)	-0.0085699	0.0006521	-13.14	
s = 0.009304		R = sq = 96.1%		
Analysis of Variance				
SOURCE	DF	SS	MS	F
Regression	1	0.014950	0.014950	172.72
Error	7	0.000606	0.000087	
Total	8	0.015556		

ção, a Tabela 4 mostra, ainda, os resultados obtidos quando a banda TM-3 é substituída pela primeira componente principal do modelo de regressão linear simples. O coeficiente de determinação R² chega a um valor de 82,1%, para uma amostra de 1 pixel e imagem não filtrada (contra 69,1% para o canal TM-3). Ao nível de confiança de 95%, a suposição de que o modelo linear é significativo pode ser aceita, com base nos dados amostrais (F=47,06).

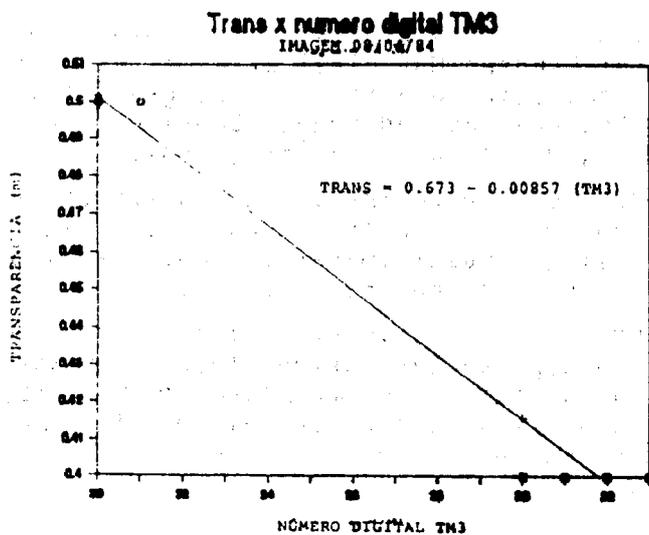


Figura 4 - Linha de Regressão. Parâmetro: transparência, imagem original e alvo de 5 x 5 pixels.

TABELA 6

RESULTADOS DO MODELO LINEAR DE REGRESSÃO
Parâmetro: Material em suspensão, imagem original (1ª C.P.) e alvo de 1 pixel.

The regression equation is					
MS = 56.2 - 2.55 Y					
Predictor	Coef	Stedv	t-ratio	P	
Constant	-56.20	13.34	-4.21	0.004	
(Y-1ª CP)	-2.5520	0.3720	-6.86	0.000	
s = 4.899		R-sq = 87.1%			
Analysis of Variance					
SOURCE	DF	ss	MS	F	P
Regression	1	1129.4	1129.4	47.06	0.000
Error	7	168.0	24.0		
Total	8	1129.4			

onde:

$$Y = 0,363(TM-1) - 0,479(TM-2) - 0,775(TM-3) - 0,195(TM-4).$$

Os resultados mais completos para o caso da imagem original (primeira componente principal) e o alvo de 1 pixel ($R^2 = 82,1\%$) é mostrada na Tabela 6. Da mesma forma que no caso da transparência, os resultados obtidos para material em suspensão sugerem pouca influência do processo de filtragem(*) na imagem e tamanho do alvo (número de pixels).

Salinidade é o parâmetro que apresentou a mais fraca relação linear com a reflectância. Esse resultado já era esperado, pois sais inorgânicos em solução não alteram as características espectrais da água. A pequena relação existente de-

ve-se a outros elementos associados à salinidade da água na região de estudo e que afetou, embora levemente, a reflectância.

Da Tabela 4 pode-se observar que a parcela da variação de salinidade explicada pelo modelo é muito baixa, variando entre 5,9% e 16,2%. A estatística F permite concluir que, a nível de confiança de 95% e com base nos dados amostrais, a hipótese $\alpha=0$ pode ser aceita, isto é, a reta de regressão não é significativa.

4. CONCLUSÕES

O experimento descrito nesse artigo confirma a viabilidade da utilização de imagens multiespectrais, obtidas a nível orbital, no estudo de corpos de água.

Alguns parâmetros de qualidade da água podem ser monitorados e mapeados ao longo de áreas extensas, de uma forma rápida, econômica e confiável. Na área abrangida pelo presente estudo, a utilidade das técnicas de Sensoriamento Remoto são indiscutíveis: a região estuarina da Laguna dos Patos, pela sua extensão e variações existentes, praticamente inviabiliza o seu estudo global através das técnicas convencionais.

A Figura 5, exemplifica a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto na região em estudo, apresentando o mapeamento de material em suspensão obtido do modelo desenvolvido nesta pesquisa.

Finalmente, estudos adicionais são recomendados, no sentido de aprimorar-se essa metodologia. Entre os principais pontos a serem considerados em futuros trabalhos, pode-se incluir um estudo mais completo dos parâmetros de qualidade de água, suscetíveis de serem estimados pela metodologia proposta, bem como um melhor entendimento dos respectivos comportamentos espectrais.

Estudos adicionais, que visem a integração das estimativas obtidas por técnicas de Sensoriamento Remoto (valores de parâmetros de qualidade da água na superfície do corpo d'água), com modelos matemáticos de circulação, poderão eventualmente permitir estimar esses parâmetros para diversas profundidades. Este é, portanto, um estudo mais abrangente e que deverá merecer atenção.

5. BIBLIOGRAFIA CITADA

GAGLIARDINI, D.A.; KARSZEBAUM, H. LEGECKIS, R. & KLEMAS, V. (1984) Application of Landsat MSS, NOAA/TIROS AVHRR, and NIMBUS CZCS to study the La Plata River and its interaction with

(*) o que pode ser explicado pela ausência de variações significativas na imagem em áreas com parâmetros à dimensão dos filtros utilizados.

- the ocean. Remote Sensing of Environment, 15(1):21-36.
- HARTMANN, C.; CALLIARI, L.J. & CARDOSO, J.N. Aplicação de Sensoriamento Remoto nos processos estuarinos da Laguna dos Patos, RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília, DF, 10-14 Maio de 1982. Anais. São José dos Campos, INPE, 1982, v.2, p.333-342.
- HARTMANN, C & SANO, E.E. Estudo da Hidrologia e evolução das massas de água na Laguna dos Patos através de imagens MSS-Landsat, Revista Brasileira de Geofísica, 1986. V.4, 215-228.
- HARTMANN, C. Utilização de dados digitais de mapeador temático para obtenção dos padrões de distribuição do material em suspensão na desembocadura da Laguna dos Patos. Tese de Mestrado, INPE, 190p. Aprovada em março de 1988.
- HERZ, R. & TAVARES, W. Jr. Dynamic behaviour of the surface water of Lagoa dos Patos, Brazil. In: Seminar on space applications of direct interest to developing countries. INPE/COSPAR, São José dos Campos, SP, INPE, 1974.
- HERZ, R. Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos. Tese de Doutorado. São Paulo, USP, 1977, p.261.
- HERZ, R.; TANAKA, K.; ALVAREZ, J.A.; MÜLLER, Jr.O.O. Proposições de método de estudo do sistema lagunar da costa rio-grandense por análise automática e repetitiva de dados orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO., 1, São José dos Campos, INPE, 1978. V.2., p.800-811.
- JENSEN, R.J.; KJERFRE, B.; RANSEY, E. W. Remote Sensing and numerical modeling of suspended sediment in Laguna de Terminos, Campeche, Mexico, submitted to the Remote Sensing of Environment, 1989.
- KHORRAM, S. Development of water models applicable through out the entire San Francisco bay and delta. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 51, no. 1, pp.53-63, 1985.
- KHORRAM, S.; CHESHIRE, H.M. Remote Sensing of water quality in the Neuse River Estuary, North Carolina. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 51, No.3, pp.329-341, 1985.
- KLEMAS, V.; BORCHARDT, J.F. & TREASURE, W.M. Suspended sediment observations from ERTS-1. Remote Sensing of Environment, 2:205-221, 1973.
- MENDES, C.A.B.; HAERTEL, V.; HARTMANN, C. & NUNES, J.C.R. 1989. Aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto à Região Estuarina da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul-Brasil. Anais do IV SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO EM SENSORIA-
- MENTO REMOTO, p.872-883, Argentina.
- RITCHIE, J.C. & COOPER, C.M. Comparison of Landsat MSS pixel array sizes for estimating quality. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 53, No.11, pp.1549-1553, 1987.
- ROUSE, L.J. & COLEMAN, J.M. Circulation observation in the Louisiana bight using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment 5, 55-66, 1976.
- STUMPF, R.P. Sediment transport in Chesapeake Bay during floods: Analysis using satellite and surface observations, submitted to the Journal of Coastal Research, 1988.

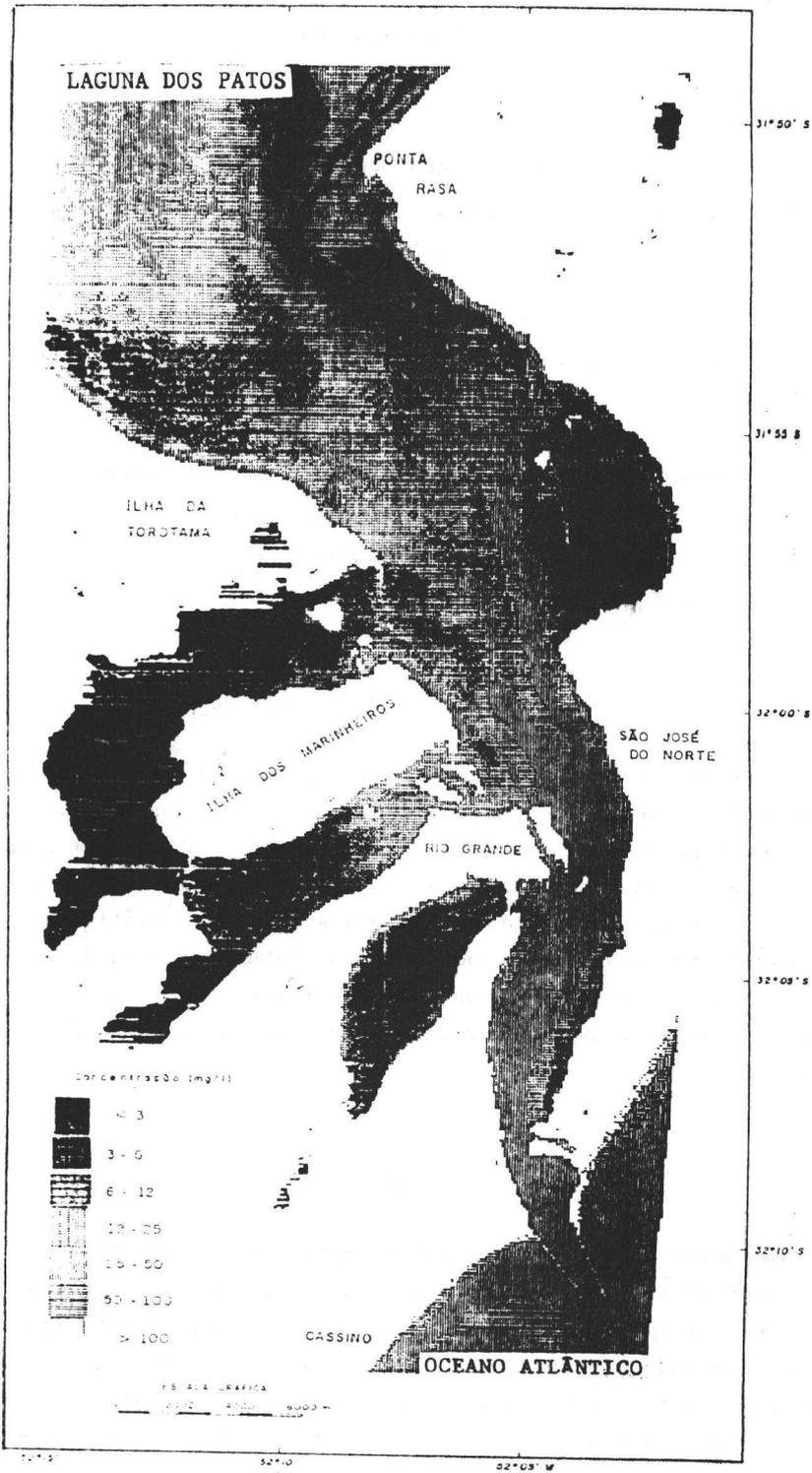


Figura 5 - Mapeamento da concentração de sedimentos superficiais.