

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA

Dissertação de Mestrado

**Aplicabilidade de métodos de Sensoriamento Remoto na avaliação e monitoramento  
do estado trófico de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul - Brasil**

Renata Pereira

Porto Alegre, junho de 2007

**Aplicabilidade de métodos de Sensoriamento Remoto na avaliação e monitoramento do estado trófico de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul - Brasil**

Renata Pereira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Orientador: Prof. Dra. Norma Luíza Würdig  
Co-orientador: Prof. Dr. Alois Eduard Schäfer

Comissão Examinadora  
Prof. Dr. Gilberto Gonçalves Rodrigues  
Prof. Dr. Laurindo Antônio Guasselli  
Profa. Dra. Rosane Maria Lanzer

Porto Alegre, junho de 2007

“A própria natureza é de uma eloquência sublime. As estrelas, quando brilham no firmamento, nos deleitam e nos extasiam e, no entanto, todas elas seguem uma órbita marcada com precisão matemática”.

Alexander von Humboldt

À Annie, meu anjo da guarda.

## Agradecimentos

À Dra. Norma Luíza Würdig, pela orientação e colaboração referente, principalmente, à logística deste trabalho.

Ao Dr. Alois Eduard Schäfer, meu “pai científico”, por acreditar no meu trabalho e por todo apoio a mim despendido. Agradeço pelos conselhos, discussões, sugestões e pelos momentos de descontração, necessários a todo trabalho sério.

Ao Dr. Flávio Jorge Ponzoni, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo valioso e altruísta auxílio na correção atmosférica das imagens.

A todos os funcionários, professores e colegas do Programa de Pós Graduação em Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo apoio e disposição em ajudar e trocar idéias.

Aos funcionários do Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos (CECLIMAR), sempre solícitos e dispostos a colaborar.

Aos colegas do Laboratório de Limnologia da Universidade de Caxias do Sul, pelo apoio dado em campo e no laboratório.

Aos meus pais, minha família, meu porto seguro, que não mediram esforços para que minha vida acadêmica chegasse onde está hoje.

À minha filha, Annie, que foi muito mais compreensiva do que se poderia esperar de uma pré-adolescente e que acompanhou, torcendo, os passos deste trabalho.

Ao meu amado noivo Juliano, ao lado de quem todas as coisas se tornam atingíveis.

A Deus, que não permitiu que me faltassem forças.

## RESUMO

Os fenômenos relacionados à trofia do ecossistema, como crescimento de algas e decomposição, podem interferir nas propriedades ópticas de um corpo d'água, conferindo-lhe reflectância específica. O uso de sensoriamento remoto no gerenciamento de lagoas se baseia principalmente no fato de que a eutrofização e o aumento na produtividade são associados a mudanças nas propriedades ópticas do corpo de água. Desta forma, o uso do sensoriamento remoto é uma alternativa viável e adequada para monitoramentos de longo prazo já que permite um acompanhamento mais eficiente das modificações tróficas, ressaltando-se a necessidade de que exista uma base de análises estatísticas da relação entre a reflectância e o estado trófico representado por parâmetros-chave. Este trabalho visa estudar a aplicabilidade de métodos de sensoriamento remoto na avaliação e monitoramento do estado trófico de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul (RS). A área de estudo se situa no litoral norte do Rio Grande do Sul. A região do Litoral norte é delimitada ao sul pelo município Balneário Pinhal, ao norte pelo rio Mampituba, a leste pelo oceano e, a oeste, delimitada em função de sua formação geológica, relevo, bacia de drenagem e limites políticos, estendendo-se até os limites de São Francisco de Paula. Foram utilizadas duas imagens do satélite e uma imagem do satélite Landsat TM 5. Foi feita a correção atmosférica através do método 6S e a normalização das imagens pelo método *Tasseled Cap*. Foram coletados dados de concentração de clorofila-a, turbidez e transparência do disco de Secchi em doze lagoas. A correlação foi significativa entre turbidez e a reflectância da banda 4 do sensor CBERS; através da regressão pelo método Power entre a banda 4 do CBERS e a turbidez obteve-se correlação de 83%. Com a reflectância das imagens normalizadas foi possível estimar faixas de valores prováveis de turbidez nas lagoas estudadas nas datas das imagens. A alta concentração de material em suspensão não é considerada antrópica, não servindo este parâmetro para monitoramento de eutrofização.

## **Remote sensing suitability in evaluation and monitoring of trophic state of coastal lagoons in the Rio Grande do Sul state - Brazil**

The phenomena related to the trophic state of a given ecosystem, like algae growth and decomposition, may interfere in the optic properties of a water body, altering its specific reflectance. The use of Remote Sensing in the management of lagoons is based mainly on the fact that the eutrophication and the increased productivity are associated to changes in the optic properties of the water body. In such way, the use of the Remote Sensing is a viable alternative for long term monitoring because it allows a more efficient assessment of trophic changes. Therefore, there is an urge to establish a solid base of statistical analyses of the relation between reflectance and the trophic state represented by key parameters. This work aims to study the applicability of Remote Sensing methods in the trophic state assessment and monitoring of coastal lagoons of the Rio Grande do Sul (RS) state. The study area is at the North Coast of Rio Grande do Sul. The North Coast is delimited at the south by the Pinhal city, at the north by the Mampituba River, at the east by the ocean and, at the west, delimited in function of its geologic formation, relief and draining basin, going to the limits of São Francisco de Paula city. Two CBERS Images and one Landsat TM 5 image were used. The atmospheric correction was made using the 6S method and the normalization of the images was made using the Tasseled Cap method. Data representing the chlorophyll-a concentration, turbidity and Secchi disc transparency in twelve lagoons were collected. There were no significant correlations between chlorophyll-a and reflectance. The correlation between turbidity with the band 4 of CBERS sensor had been significant by using Power regression between band 4 of CBERS and turbidity, it was obtained a correlation of 83%. By using the normalized images reflectance it was possible to calculate probable values for turbidity in the studied lakes on the dates the satellites obtained the images. However, the source of high concentration of suspended material is not considered effect of anthropogenic actions, so this parameter shall not be used for eutrophication monitoring.

## SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tabelas.....	v
Lista de Siglas e Abreviaturas.....	vi
Lista de Símbolos.....	vii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
Objetivo.....	6
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1 Sensoriamento remoto.....	8
2.2 Constituintes Opticamente Ativos.....	12
2.3 Correção atmosférica.....	14
2.4 Imagem digital.....	16
2.5 Correção geométrica.....	16
2.6 Estado trófico.....	17
2.7 Clorofila-a.....	19
2.8 Material em suspensão.....	19
2.9 Transparência do disco de Secchi.....	20
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 Área de estudo.....	21
3.2 Sensoriamento remoto.....	27
3.2.1 Correção geométrica de imagens digitais.....	29
3.2.2 Conversão dos números digitais em reflectância.....	30
3.2.3 Correção atmosférica.....	30
3.2.4 Normalização.....	30
3.3 Metodologia limnológica.....	32
3.3.1 Lagoas amostradas.....	32
3.3.2 Coletas.....	33
3.3.2 Transparência do Disco de Secchi .....	34
3.3.3 Material em suspensão.....	34
3.3.4 Clorofila-a.....	34
3.4 Estatística.....	35
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1 Processamento de imagens.....	36
4.2 Dados limnológicos.....	38
4.3 Correlações .....	41
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS .....	50
ANEXOS.....	61
Anexo 1. Programa em linguagem LEGAL do SPRING para conversão em reflectância.....	61
Anexo 2. Software para aplicação do 6S.....	62

## Lista de Figuras:

Figura. 1a. Composição colorida da imagem do sensor de alta resolução IKONOS com resolução espectral de um metro, mostrando as lagoas: (1) Peixoto e (2) Caconde. ....	9
Figura. 1b. Imagem CBERS, das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, com resolução espacial de 20 metros, mostrando as lagoas: (1) Peixoto e (2) Caconde.....	9
Figura. 2. Espectro eletromagnético.....	10
Figura 3. Efeitos da atmosfera sobre a radiação solar e energia recebida pelo sensor.....	11
Figura 4. Banda 2 do CBERS, de 13/02/2006. Imagem ponto-órbita 156_134, com alta cobertura de nuvens.....	12
Figura. 5. Comportamento espectral da reflectância da água nos três estados físicos. Moreira, 2003.....	13
Figura 6. Absorção da água limpa, do material orgânico dissolvido, do fitoplâncton e absorção total.....	13
Figura 7. Esquema de geo-referenciamento de uma imagem.....	17
Figura 8. Lagoas da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Lanzer, 1983.....	22
Figura 9. Geologia Geral da planície costeira do Rio Grande do Sul. Dillenburg <i>et al</i> , 2004. Em destaque, a área de estudo.....	24
Figura 10. Área de estudo. Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil.....	26
Figura 11. Formato típico do gráfico “tasseled cap” com a localização espectral de algumas classes de alvos. Os pontos (a) solo exposto, (b) desenvolvimento do dossel, (c) ápice do dossel e (d) senescência, descrevem a trajetória temporal dos pixels de uma cena agrícola. Rudorff, 2006.....	31
Figura 12. Lagoa Malvas, Osório, mostrando a borda com macrófitas.....	33
Figura 13. Lagoas onde realizaram-se coletas.....	39

Figura 14. Correlação Power entre turbidez e transparência. $R^2 = 0,642$ ; $p < 0,001$ . n = 33.....	40
Figura 15. Cena 156_134 do satélite CBERS, banda 4, de 27 de novembro de 2005. Sem cobertura de nuvens .....	41
Figura 16. Regressão linear entre turbidez e fator de reflectância de superfície da banda 4 do CBERS; $R^2 = 0,806$ . n = 7.....	43
Figura 17. Regressão Power entre turbidez (y) e reflectância da banda 4 do CBERS (x) (reflectância de superfície). $R^2 = 0,83$ ; $p = 0,005$ ; n = 7.....	44
Figura 18. Gráfico relacionando o aumento da concentração de material em suspensão (x) com o deslocamento do pico da radiância em direção ao infravermelho (y). Curran e Novo (1988).....	45
Figura 19. Correlação entre a turbidez esperada calculada com a reflectância das imagens referência (banda 4); e normalizadas nas bandas de maior correlação (Landsat TM banda 3 e CBERS 01/11 banda 3). x = reflectância, y = turbidez esperada.....	46

### Lista de Tabelas:

Tabela 1. Valores de superfície, profundidade máxima e profundidade mínima de lagos do litoral norte. Schwarzbold (1982).....	27
Tabela 2. Bandas espectrais do sensor CCD do CBERS.....	28
Tabela 3. Bandas espectrais do sensor IR-MSS do CBERS.....	28
Tabela 4. Bandas espectrais do sensor WFI do CBERS.....	28
Tabela 5. Comparação entre as características espectrais das bandas dos sensores CCD e IR-MSS do CBERS e as bandas do Landsat TM.....	29
Tabela 6. Lagoas, localização do ponto de coleta e datas das coletas.....	32
Tabela 7. Dados de reflectância de superfície calculados para os locais de coleta. S: CBERS de 27/11/05; TM: Landsat de 18/11/05 normalizada; R: CBERS de 01/11/05 normalizada.....	38
Tabela 8. Valores de transparência do Disco de Secchi, clorofila-a e turbidez das coletas em 12 lagoas. ....	39

Tabela 9. Correlações linear e Power entre os valores de transparência do Disco de Secchi, clorofila-a e turbidez.....	40
Tabela 10. Valores de transparência do Disco de Secchi, clorofila-a e turbidez da coleta de 27 de novembro de 2005.....	42
Tabela 11. Correlações linear e parcial (corrigida pela transparência do Disco de Secchi) entre clorofila-a e turbidez.....	42
Tabela 12. Correlação de Pearson entre clorofila-a e fatores de reflectância.....	42
Tabela 13. Correlação de Pearson entre transparência do disco de Secchi e fatores de reflectância.....	43
Tabela 14. Correlação de Pearson entre turbidez e fatores de reflectância.....	43
Tabela. 15. Correlação entre a reflectância da banda 4 do CBERS de 27/11 e as reflectâncias das imagens normalizadas com distribuição normal. Correlações significativas. * .....	46
Tabela 16. Valores estimados de turbidez para as datas 01/11, 18/11 e 27/11, calculados a partir da reflectância da imagem referência (CBERS 27/11, banda 4) e das imagens normalizadas (CBERS 01/11, banda 3 e Landsat TM, banda 3).....	46

### **Lista de Siglas e Abreviaturas:**

6S: *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*

CBERS: *Chinese Brazilian Environment Remote Sensing*

CCD: *Charge-coupled Device*

COA: Constituinte Opticamente Ativo

cm: centímetro

CSS: Concentração de Sedimentos Suspensos

DOS: *Dark Object Subtraction*

FAU: Formazin attenuation units

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IR-MSS: *Infrared Multispectral Scanner*

LANDSAT TM: *Thematic Mapper*

µm: Micrômetro

MODTRAN: *Moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm*

nm: nanômetro

SPRING: Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas

TDS: Transparência do disco de Secchi

TSI: *Trophic State Index* (Índice de estado trófico)

WFI: *Wide Field Imager*

### **Lista de Símbolos:**

$R_\lambda$ : reflectância espectral

$L_\lambda$ : radiância espectral

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A trofia de um ecossistema pode ser entendida como a soma das atividades de fotossíntese ou de assimilação fotossintética. A um segundo nível de processos metabólicos, chamamos saprobia, que é a soma das atividades de respiração e mineralização. Segundo Schäfer (1985), estes dois níveis organizam-se em um circuito, no qual se forma a biomassa que, posteriormente, por processos diretos ou indiretos, é mineralizada. Este circuito consiste num sistema de entrada e saída de energia que une os dois níveis. O tipo de metabolismo de um lago é dado pela prevalência de um dos níveis ou pelo equilíbrio dinâmico entre ambos. Isto está diretamente relacionado ao balanço de substâncias, especialmente dos nutrientes dos quais depende a produção primária (Zagatto *et al*, 1999). Os fenômenos relacionados à trofia do ecossistema, como crescimento de algas e decomposição, podem interferir nas propriedades ópticas de um corpo d'água, conferindo-lhe reflectância específica. Alguns fatores naturais alteram a composição físico-química da água e, conseqüentemente, sua resposta espectral.

A água pura tem reflectância próxima de zero, segundo Moreira (2003), então a cor e a intensidade da luz superficial refletida dependem da cor e da composição das substâncias em suspensão na água. A reflectância da água diminui com o aumento dos comprimentos de onda, e as maiores reflectâncias são obtidas na região visível do espectro eletromagnético, especificamente nos comprimentos de onda do azul e do verde, decrescendo gradualmente na direção do infravermelho, limitando os estudos de qualidade da água ao espectro visível e infravermelho próximo (Ekstrand, 1992).

Segundo Bukata *et al* (1997) a coloração de um corpo d'água natural é determinado pelo espalhamento e absorção da radiação que atinge a água, seja radiação solar direta ou radiação difusa e da resposta que os componentes opticamente ativos (COA) (*color-producing agentes – CPA*, no original) presentes na água. Os principais COAs que conseqüentemente afetam a resposta espectral dos habitats aquáticos aos métodos de sensoriamento remoto, são: a presença de plantas aquáticas, sólidos em

suspensão, concentração de clorofila e a transparência da água (Hellweger *et al*, 2004; Rudorff, 2006). Isso ocorre porque técnicas de sensoriamento remoto empregam várias abordagens físicas, a maioria baseada no registro de ondas eletromagnéticas, tanto irradiadas quanto emitidas pelo alvo (Kondratyev *et al*, 1996).

Baban (1999) salienta que o uso de sensoriamento remoto no gerenciamento de lagos se baseia principalmente no fato de que a eutrofização e o aumento na produtividade são associados a mudanças nas propriedades ópticas do corpo de água. Devido a estas propriedades, muitos estudos de ecossistemas aquáticos fazem uso de técnicas de sensoriamento remoto. Este tem várias aplicações importantes referentes aos corpos d'água, como detecção de padrões de circulação (Alvarez-Cobelas *et al*, 2002; Islam *et al*, 2002), modelagem (Xiao *et al*, 2004), projeções e simulações para planejamento e gestão.

O sensoriamento remoto pode proporcionar uma visão mais geral do corpo d'água e até da sua bacia, em detrimento das amostras por pontos. Provê séries de dados que possibilitam a análise temporal das modificações (impactos) na região de estudo. Barbosa *et al* (2003) acrescenta o potencial de identificar os componentes da água e fornecer embasamento a hipóteses sobre os processos biológicos e suas interações com a hidrodinâmica do corpo d'água no momento da coleta. A fração do espectro refletida e detectada pelo sensor fornece informações sobre as características físicas, químicas e mesmo biológicas do ambiente aquático. Além disso, pode permitir o monitoramento de áreas de difícil acesso (Hellweger *et al*, 2004).

Lillesand & Kiefer (1987) indicam que as imagens de sensoriamento remoto cumprem um importante papel na avaliação da qualidade da água e gestão de recursos hídricos, especificamente em sistemas lênticos, em áreas relacionadas à identificação das fontes de poluição, áreas hídricas sob processos de eutrofização e avaliação de clorofila, entre outros. Kondratyev *et al* (1996), explicam que a incorporação de métodos de sensoriamento remoto permite a obtenção de informações sobre eventos ou processos com a resolução temporal desejada e cobrindo áreas parciais ou totais do alvo em questão.

Inúmeros trabalhos mostraram a utilidade do sensoriamento remoto na avaliação da trofia de lagos e represas a partir da interpretação da reflectância da clorofila-a, da cobertura de macrófitas e da turbidez da água, por exemplo: Bukata *et al*, 1981b; Lathrop & Lillesand, 1986; Dekker *et al*, 1992; Harrington & Schiebe, 1992; Baban, 1993; Baban, 1994; Baban, 1999; Dewidar & Khedar, 2001; Froidefond *et al*, 2002; Hedger *et al*, 2002; Kloiber *et al*, 2002. No Brasil, as primeiras aplicações de sensoriamento remoto em estudos límnicos ocorreram em reservatórios, no início da década de noventa (Novo, 2005).

Baban realizou em 1993 um estudo na Inglaterra no qual utilizou Landsat TM para correlacionar com parâmetros da qualidade da água: clorofila-a, fósforo total, transparência do disco de Secchi (TDS), sólidos suspensos, salinidade e temperatura. As correlações mais significativas encontradas foram as com TDS, sólidos suspensos, fósforo total, clorofila-a e salinidade. Já nesta época ele reconheceu que o sensoriamento remoto estava sendo utilizado com êxito em estudos da qualidade da água.

O sensoriamento remoto vem sendo usado com sucesso para estimar o estado trófico de corpos d'água, comumente com pigmentos fotossintetizantes, principalmente clorofila-a, como indicadores biológicos e turbidez e TDS como indicadores físicos (Sass *et al*, 2006). Este autor ainda ressalta que o Landsat TM tem sido utilizado com resultados satisfatórios para derivar estes indicadores biológicos e físicos do estado trófico de lagos, reservatórios, estuários e oceanos desde 1980. A maior parte destes estudos empregou análises de regressão entre a reflectância obtida pelo satélite e as medições *in situ* dos parâmetros, principalmente clorofila-a, turbidez e transparência.

Hedger *et al* (2002) encontrou uma boa correlação entre reflectância obtida pelo sensor Landsat TM e absorvância da clorofila-a no lago Leven, Escócia, que permitiu a estimativa da concentração deste pigmento na água através de sensoriamento remoto. Dekker *et al* (1992) concluiu que os sensores de satélites possuem resolução espectral e radiométrica suficiente para derivar com precisão parâmetros da água.

A interpretação de imagens de satélite multi-espectrais no monitoramento de corpos d'água visa complementar os levantamentos em campo e as análises de laboratório, e não substituí-los.

Na análise de ambientes lênticos pelos métodos do sensoriamento remoto é utilizada a reflectância da superfície do corpo de água como base para a identificação do estado trófico. A determinação da concentração de clorofila-a, material orgânico dissolvido e minerais em suspensão em lagos pode ser feita registrando-se a radiação solar visível refletida pela superfície da água, seguido pela aplicação de técnicas de registro ou correlação (Kondratyev *et al*, 1996). A absorção da clorofila se dá no intervalo da luz azul (0,4 – 0,5  $\mu\text{m}$ ) e da luz vermelha (0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$ ) e a reflexão se dá no intervalo da luz verde (0,5 – 0,6  $\mu\text{m}$ ). Moreira, em 2003, especificou que a fluorescência característica da clorofila-a ocorre após a absorção de luz vermelha no comprimento de onda de 668 nm. Desta forma, tem-se estabelecido o intervalo de comprimento de onda a ser utilizado em estudos de produtividade primária.

Após o estabelecimento da correlação da reflectância com os valores da concentração da clorofila-a, obtém-se uma ferramenta muito útil para o biomonitoramento das modificações ecológicas das lagoas, baseado na densidade do fitoplâncton. Desta forma, o uso do sensoriamento remoto é uma alternativa viável e adequada para monitoramentos de longo prazo já que permite um acompanhamento mais eficiente das modificações tróficas, ressaltando-se a necessidade de que exista uma base de análises estatísticas da relação entre a reflectância e o estado trófico representado por parâmetros-chave (Ekstrand, 1992; Baban, 1993; Kondratyev *et al*, 1996; Baban, 1999; Woodruff *et al*, 1999; Hakvoort *et al*, 2002; Hedger *et al*, 2002; Kishino *et al*, 2005; Pozdnyakov *et al*, 2005; Sass *et al*, 2007).

Reis *et al* (2003) colocam que é muito difícil entender a dinâmica de ambientes aquáticos, principalmente em pequenos lagos. Isto é agravado pelo uso de metodologias tradicionais, que utilizando dados de amostragens pontuais, carecem de representatividade espacial e temporal. Este é um dos principais fatores que estão levando ao uso de sensoriamento remoto no estudo de ecossistemas aquáticos.

O uso de imagens obtidas por sensoriamento remoto necessita de atenção a fatores que modificam a informação captada, pois, quando a radiação solar penetra na atmosfera terrestre, sofre atenuações causadas por reflexão, espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos, por partículas dispersas e nuvens, segundo Wetzel (1983). Como resultado, a radiação solar que efetivamente alcança a superfície terrestre está fortemente atenuada, embora algumas dessas alterações possam ter efeito aditivo. A radiação solar sofre vários processos de reflexão em função dos gases que compõem as diferentes zonas e camadas da atmosfera (Zullo Júnior *et al*, 1994).

A absorção da radiação solar na atmosfera dá-se por meio de dois processos: dissociação e fotoionização na alta atmosfera; e a vibração e transição rotacional das moléculas (Brohede, 2004).

Partículas dispersas obstruem as ondas eletromagnéticas, em um processo conhecido como espalhamento, que pode interagir tanto com a energia irradiada quanto com a energia reirradiada. Podem ser citadas como partículas presentes na atmosfera que acarretam espalhamento desde chuva de granizo até fumaça, poeira e neblina. Da razão entre os diâmetros das partículas e o comprimento de onda dependem a intensidade e a direção do espalhamento. No caso do espalhamento da energia irradiada somar-se à energia irradiada captada pelo sensor, terá efeito (ou ruído) aditivo (Moreira, 2003).

Estão sendo utilizados padrões de atmosfera que descrevem aspectos generalizados já que a obtenção de dados sobre parâmetros atmosféricos é uma das dificuldades no uso de modelos como o 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (Vermote, 1997), pois a sua coleta a campo é praticamente impraticável (Filho *et al*, 2005). A profundidade óptica ou espessura óptica da atmosfera resume as condições de atenuação da luz. No 6S, este parâmetro é obtido a partir da visibilidade em conjunto com o volume de constituintes aerossóis para cada tipo de superfície. A profundidade óptica varia conforme o espectro e seu valor de referência no 6S é de 550 nm. Apesar disto, este método, por ser baseado em parâmetros físicos da atmosfera, proporciona maior precisão no cálculo dos valores de radiância e reflectância dos alvos a partir de dados de satélites (Silva & Valeriano, 2005).

Modelos de transferência radioativa que consideram o fenômeno da absorção da radiação eletromagnética implicam geralmente em resultados mais confiáveis quando o interesse é correlacionar os valores de reflectância presentes nas imagens com parâmetros geofísicos ou biofísicos de objetos existentes na superfície terrestre. Como a caracterização da atmosfera no momento de obtenção de dados orbitais é uma tarefa custosa e difícil, é possível aplicar tais modelos adotando algumas condições de contorno e aproximações que têm garantido bons resultados em estudos envolvendo as correlações mencionadas.

Lagoas costeiras, em geral, são corpos de águas paradas com uma alta dinâmica de circulações diárias devido à sua exposição aos ventos oceânicos e à falta de obstáculos físicos. Por causa da sua origem, através de transgressões e regressões marinhas pleistocênicas e holocênicas, a maioria dos lagos costeiros possui uma morfologia caracterizada pela baixa profundidade combinada com grande superfície. A profundidade relativa muito baixa caracteriza estes corpos de água como altamente instáveis. O sedimento está composto por frações granulométricas finas de fácil deslocamento. Esta combinação de características leva a uma elevada turbidez mineral, principalmente nas lagoas de grande extensão e pequena profundidade. Nas lagoas costeiras do RS, a reflectância é influenciada principalmente pelo material em suspensão (turbidez) que pode variar conforme sua composição e concentração, explicam Schwarzbald e Schäfer (1984).

### **Objetivo Geral:**

Este trabalho visa aplicar métodos de sensoriamento remoto na avaliação e monitoramento do estado trófico de ambientes lênticos de alta turbidez mineral.

### **Objetivos específicos:**

1. Selecionar lagoas com alta turbidez mineral como área de estudo.
2. Determinar a relação entre as variáveis: transparência, turbidez e clorofila-a.

3. Realizar a correção atmosférica e geométrica das imagens digitais.
4. Ampliar a utilização de imagens através da normalização das imagens digitais de datas diferentes das de coleta.
5. Quantificar a relação entre as variáveis limnológicas com a reflectância das imagens de mesma data e normalizadas, através de regressões lineares e geométricas.

## CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sensoriamento remoto

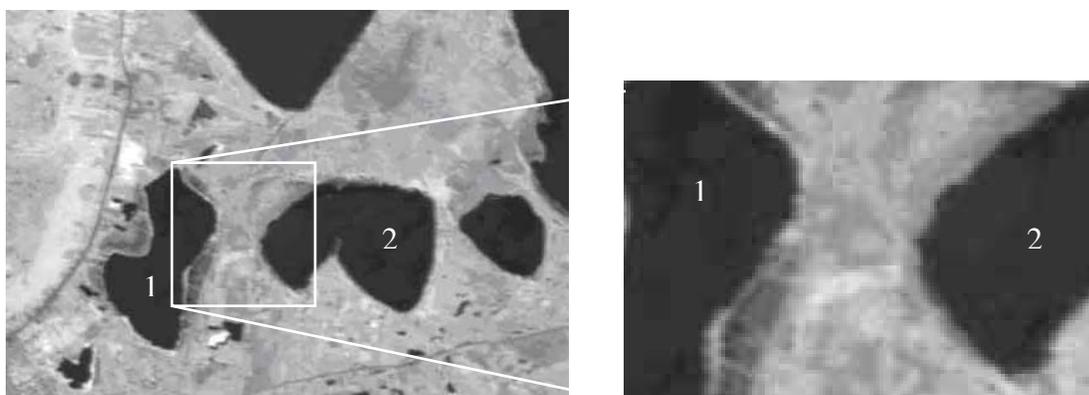
Sensoriamento remoto consiste na aplicação de sensores que permitem obter informações sobre objetos ou fenômenos na superfície da Terra sem contato físico com eles (Rocha, 2002; Moreira, 2003; Novo, 1995). Este termo se refere à captura de informação por meio de satélites, fotografias aéreas ou outros sensores. Esta informação deriva, basicamente, da interação entre energia eletromagnética emitida por fontes naturais (sol) ou fontes artificiais (radar) e o alvo na superfície terrestre. Essa captura se dá sem o contato do sensor com o objeto e detecta, em forma de imagem ou não, a radiação emitida ou refletida pelos objetos. Este processo permite a comparação de uma mesma área em diferentes momentos levando a uma análise multitemporal de vários fatores, como vegetação e ocupação urbana. Imagens obtidas por satélite constituem-se de um conjunto de *pixels* (*picture cell*), que são a unidade básica da imagem digital. A cada um deles é atribuído um valor expresso por nível de cinza ou contador digital, que pode ser convertido para radiância ou reflectância (Moreira, 2003).

A evolução do sensoriamento remoto se dá pelo avanço nos sensores, cada vez mais potentes, que proporcionam a obtenção de imagens com resolução cada vez melhor. Costa (1993) explica que os estudos que visam estabelecer a correlação entre reflectância e parâmetros ópticos da água tiveram um grande avanço a partir da década de setenta, com o lançamento do satélite Landsat 1. Os sensores vêm avançando na tecnologia empregada que resulta para os usuários o crescimento das resoluções: espacial, temporal e espectral (Eastman, 1998).

A resolução espacial refere-se à área do *pixel* em cada visada do sensor. Quanto maior a área da visada, maior também é o *pixel*. Quanto menor for o *pixel*, maior será a resolução espacial da imagem (Figuras. 1.a e 1.b).



**Figura. 1a. Composição colorida da imagem do sensor de alta resolução IKONOS, com resolução espacial de 1 metro, mostrando as lagoas (1) Peixoto e (2) Caconde. (Google Earth).**



**Figura. 1b. Imagem CBERS, banda 4, com resolução espacial de 20 metros, mostrando as lagoas (1) Peixoto e (2) Caconde. (Catálogo do CBERS)**

A resolução temporal diz respeito ao intervalo de tempo entre uma tomada de dados e a outra. Cada sensor tem uma resolução temporal diferente, em dependência de suas características técnicas. Há sensores estacionários, geralmente com finalidades meteorológicas, que possuem resolução temporal de algumas horas.

Já a resolução espectral se refere ao intervalo do espectro captado pelo sensor (Figura 2). As imagens podem ser multiespectrais ou mesmo hiperespectrais, com várias bandas de uma mesma cena, cada uma referente a uma faixa de comprimento de onda do espectro. Quanto mais bandas, mais estreitas serão e mais facilmente serão discriminados os alvos ou fenômenos de interesse (Moreira, 2003).

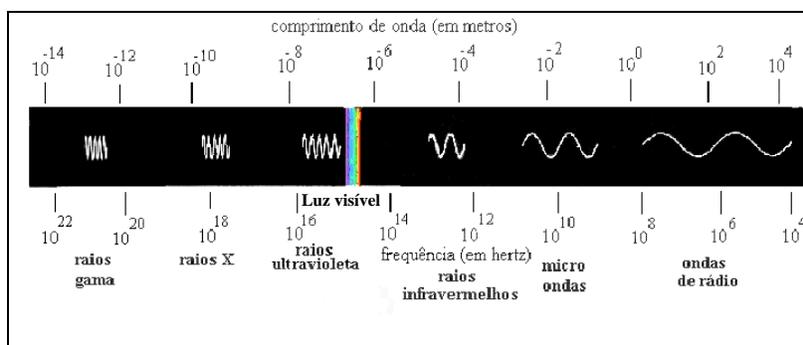


Figura 2. Espectro eletromagnético. Retirada de <http://educar.sc.usp.br/optica/luz.htm>.

Um dos principais aspectos da utilização do sensoriamento remoto em estudos limnológicos é a identificação do estado ecológico das águas através da reflectância de faixas específicas de luz vermelha pela clorofila-a e da luz infravermelha pela turbidez da água. A relação de níveis de reflectância com concentrações de clorofila-a permite o levantamento e a interpretação do estado ecológico de águas paradas de grande extensão, auxiliando no monitoramento (Ekstrand, 1992; Baban, 1993; Kondratyev *et al*, 1996; Baban, 1999; Woodruff *et al*, 1999; Wang & Ma, 2001; Hakvoort *et al*, 2002; Hedger *et al*, 2002; Kishino *et al*, 2005; Pozdnyakov *et al*, 2005; Sass *et al*, 2007).

Barbosa *et al* (2003) acrescentam o potencial de identificar os componentes opticamente ativos da água, embasamento de hipóteses sobre os processos biológicos e suas interações com a hidrodinâmica do corpo d'água no momento da coleta. Apesar destas possibilidades, seu uso nas lagoas costeiras do Rio Grande do Sul ainda é incipiente (Guasselli, 1996).

Em uma situação ideal, a radiação solar ilumina a superfície da Terra, mas quando a radiação solar penetra na atmosfera terrestre, sofre atenuações causadas por reflexão, espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos, partículas dispersas e nuvens, segundo Wetzel (1983). Como resultado, a radiação solar que efetivamente alcança a superfície terrestre está fortemente atenuada, embora algumas dessas alterações possam ter efeito aditivo, ou seja, retornam ao sensor, aumentando a resposta espectral captada.

O espalhamento ou *scattering* é um processo físico que resulta da obstrução das ondas eletromagnéticas por partículas existentes nas suas trajetórias, ao penetrarem na atmosfera terrestre. Esta obstrução pode ser tanto da energia incidente quanto da reirradiada (refletida). A intensidade e a direção do espalhamento dependem fortemente da razão entre os diâmetros das partículas presentes na atmosfera e o comprimento de onda da energia eletromagnética incidente e/ou irradiada. Podem ser citadas como partículas presentes na atmosfera que acarretam espalhamento desde chuva de granizo até fumaça, poeira e neblina. Da razão entre os diâmetros das partículas e o comprimento de onda dependem a intensidade e a direção do espalhamento. No caso do espalhamento da energia irradiada somar-se à energia captada pelo sensor, terá efeito (ou ruído) aditivo (figura 3). Isto porque o espalhamento é um processo multiplicativo, ou seja, o fluxo espalhado por um elemento pode ser novamente espalhado por um outro elemento (Costa, 1993).

A absorção da radiação solar na atmosfera dá-se por meio de dois processos: dissociação e fotoionização na alta atmosfera; e a vibração e transição rotacional das moléculas.

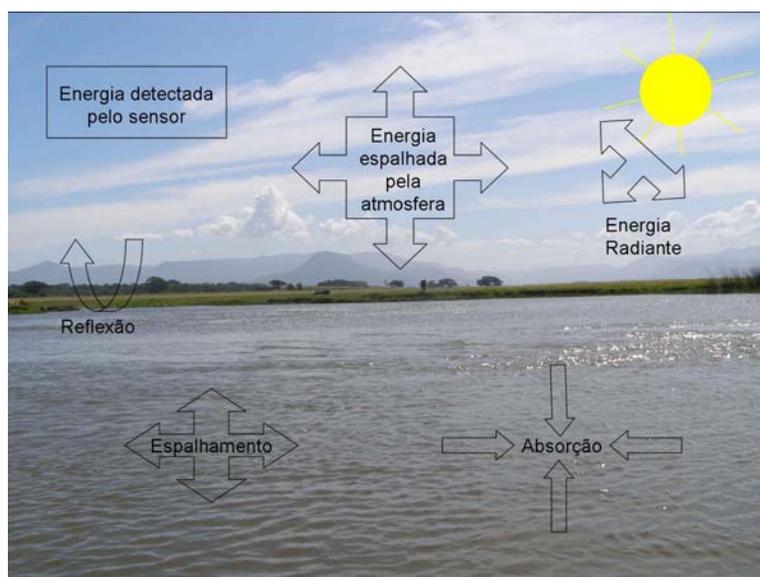
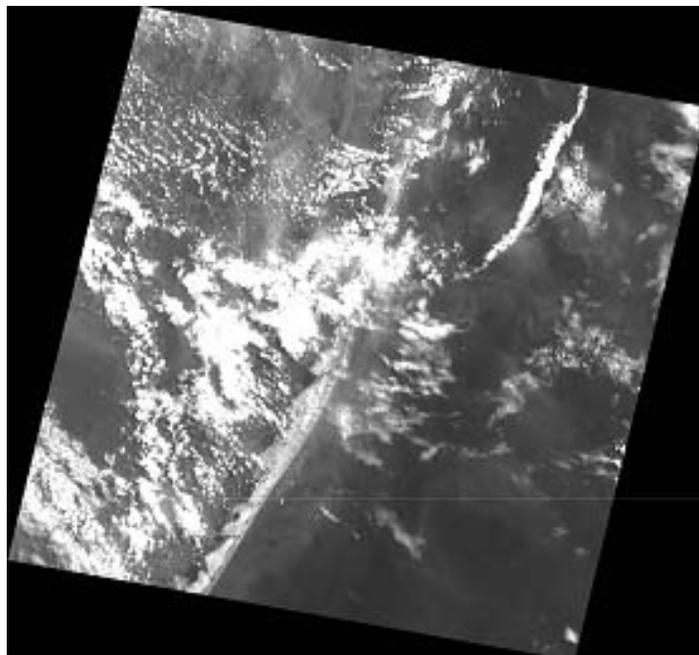


Figura 3. Efeitos da atmosfera sobre a radiação solar e energia recebida pelo sensor.

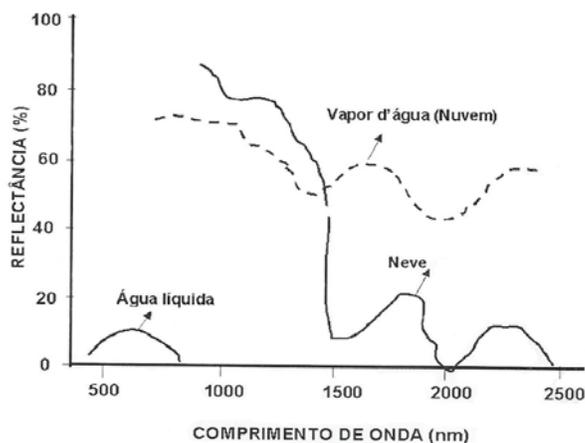
A radiação solar sofre vários processos de reflexão em função dos gases que compõem as diferentes zonas e camadas da atmosfera. Alguns gases, como ozônio e gás carbônico, absorvem (parcial ou até totalmente) a radiação solar em certos comprimentos de onda. Do ponto de vista do sensoriamento remoto, as nuvens são a maior barreira à radiação solar, pois impedem sua passagem na porção reflectiva do espectro eletromagnético (figura 4).



**Figura 4. Banda 2 do sensor CBERS, de 13/02/06 - imagem órbita ponto 156\_134, com alta cobertura de nuvens.**

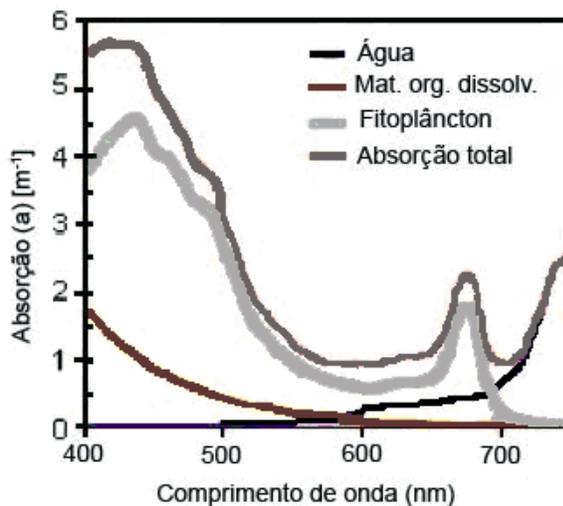
## **2.2 Constituintes Opticamente Ativos**

Rudorff (2006) explica que o coeficiente de absorção da água é mínimo nos comprimentos de onda entre 400 e 600 nm, aumentando em direção ao infravermelho. Ao contrário, o coeficiente de espalhamento é máximo na região do azul e decresce em direção ao infravermelho. Assim, em águas puras, a radiação emitida é máxima na região do azul e decresce em direção ao vermelho (figura 5).



**Figura. 5. Comportamento espectral da reflectância da água nos três estados físicos (Moreira, 2003).**

Desta forma, os constituintes opticamente ativos (COAs) atribuem suas características ópticas à subsuperfície dos corpos d'água nos quais estão. Sua resposta passa a sobrepôr a condição natural inerente da água pura. Os principais COAs são pigmentos fotossintetizantes, sólidos em suspensão e substâncias húmicas. É corriqueiro que águas continentais apresentem uma combinação entre diversos constituintes suspensos, mas no caso de haver um predominante, sua composição e concentração darão formato à curva de resposta espectral (figura 6).



**Figura. 6. Absorção da água limpa, do material orgânico dissolvido, do fitoplâncton e absorção total (Rudorff, 2006).**

## 2.3 Correção atmosférica

As imagens digitais possuem informação espectral expressa por números digitais ou contadores digitais relacionados ao nível de cinza cujo número é dependente do formato da imagem (Novo, 1995). Estes números digitais podem ser convertidos em radiância ou reflectância aparente. Procurando diminuir os efeitos aditivos e subtrativos da atmosfera, estudos que utilizam dados de reflectância aplicam um processo conhecido por correção atmosférica, que busca conferir à imagem a informação referente apenas ao alvo, sem influência da atmosfera, a chamada reflectância de superfície. Curran e Novo (1988) ressaltam a necessidade de correção atmosférica em estudos que visem correlacionar dados de sensoriamento remoto com componentes opticamente ativos da água.

Há duas formas mais comuns de realizar a correção atmosférica. A primeira delas aplica o método proposto por Chavez (1988) que é denominado de Correção Atmosférica pelo Pixel Escuro (*Dark Object Subtraction – DOS*). Este método utiliza os pixels que na imagem teriam valor zero, ou seja, que não refletiriam radiação (como sombras na região do visível, por exemplo), absorvendo-a totalmente, também implicando valores nulos de reflexão (corpos de água límpida na região do infravermelho próximo ou médio, por exemplo). Caso estes pixels apresentem valores maiores que zero, o excedente teoricamente seria explicado pela interferência aditiva do espalhamento atmosférico.

Assim, considerando que a interferência atmosférica seja uniforme em toda a cena e ignorando as influências de urbanização, topografia e outras, se define o valor em contadores digitais ou reflectância a ser subtraído de toda a cena. Este método tem fácil aplicação, mas ignora o fenômeno da absorção, considerando apenas a influência do espalhamento. Muito semelhante a este método, existe a análise de histograma.

Outra abordagem consiste nos modelos de transferência radioativa como o *Moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm (MODTRAN)* e o

*Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum* (6S) publicado por Vermote *et al* (1997). Estes e outros modelos permitem a entrada nos programas de dados referentes à caracterização da atmosfera, principalmente em relação às concentrações de vapor d'água, profundidade óptica e tipo de concentração de aerossóis. Existe a possibilidade de informar parâmetros referentes às propriedades espectrais de objetos vizinhos daquele do qual se pretende corrigir o efeito da atmosfera.

Estes modelos de transferência radioativa consideram também o fenômeno da absorção da radiação eletromagnética, implicando geralmente em resultados mais confiáveis quando o interesse é correlacionar os valores de reflectância presentes nas imagens com parâmetros geofísicos ou biofísicos de objetos existentes na superfície terrestre. Como a caracterização da atmosfera no momento de obtenção de dados orbitais é uma tarefa custosa e difícil, é possível aplicar tais modelos adotando algumas condições de contorno e aproximações que têm garantido bons resultados em estudos envolvendo as correlações mencionadas.

Estão sendo utilizados padrões de atmosfera que descrevem aspectos generalizados. A profundidade óptica ou espessura óptica da atmosfera resume as condições de atenuação da luz. No 6S, este parâmetro é obtido a partir da visibilidade em conjunto com o volume de constituintes aerossóis para cada tipo de superfície. A profundidade óptica varia conforme o espectro e seu valor de referência no 6S é de 550 nm. Apesar disto, este método, por ser baseado em parâmetros físicos da atmosfera, proporciona maior precisão no cálculo dos valores de radiância e reflectância dos alvos a partir de dados de satélites.

O resultado final de qualquer método de correção atmosférica é chamado de reflectância de superfície. É importante ressaltar que este procedimento não se faz necessário para todas as análises de imagem. Por exemplo, para classificações, ele é dispensável, pois a informação necessária para este procedimento de comparação de resposta dentro da cena tem a mesma influência da atmosfera; mas é imprescindível em análises temporais ou quando se busca uma correlação da reflectância com características do alvo.

## 2.4 Imagem digital

O brilho de uma imagem digital pode ser expresso em:

- Contadores digitais: são números inteiros sem sentido físico, dependentes do número de bits da imagem.

- Radiância: é uma grandeza física que mede efetivamente a quantidade de energia refletida pelo pixel no terreno.

- Reflectância: é uma propriedade de um determinado objeto de refletir a radiação eletromagnética sobre ele incidente e é expressa através dos chamados fatores de reflectância. A reflectância só exprime as características físicas do alvo, pois é a fração de energia transmitida.

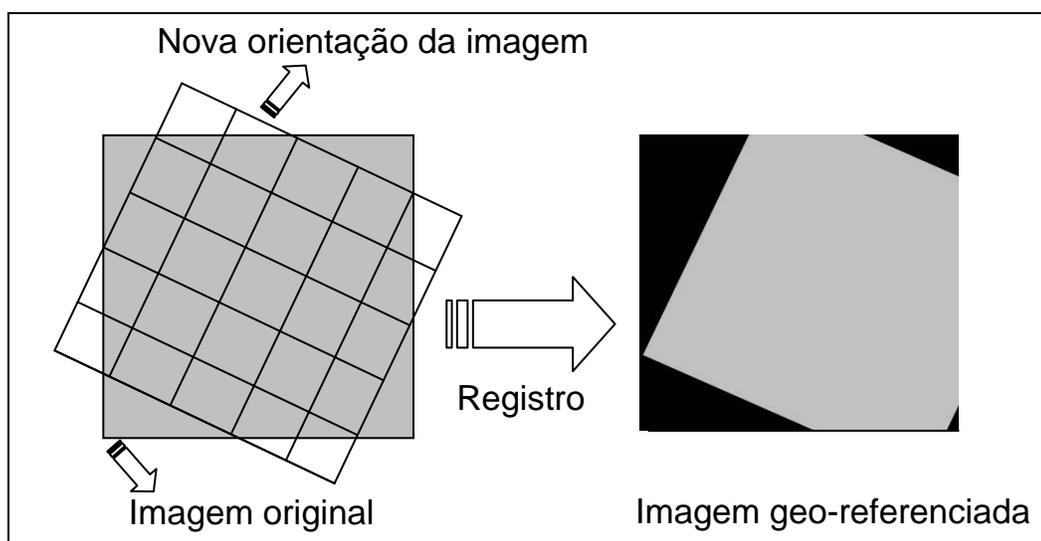
## 2.5 Correção geométrica

Imagens digitais consistem de *pixels*, cuja área depende principalmente da altitude do sensor e de seus parâmetros de captura. Um número finito de *bits* é utilizado para representar o valor de cada *pixel*, consistindo na resolução radiométrica (Eastman, 1998). As informações dos sensores CBERS e Landsat TM geram imagens em formato 8 *bits*, resultando em 256 tons de cinza.

Comumente, imagens digitais são multiespectrais, ou seja, a mesma cena é imageada simultaneamente em diversas bandas espectrais. Além disso, durante o período de imageamento, o sensor segue uma faixa que está sujeita a pequenas variações ao mesmo tempo em que a Terra se move. Portanto, a geometria está constantemente sofrendo alterações. Ainda há influência de distúrbios sistemáticos e aparentemente aleatórios que podem degradar a qualidade da imagem.

A correção geométrica visa eliminar os erros devidos ao movimento do sensor e à curvatura da Terra, principalmente. Pode ser entendida como a transformação dos dados de sensoriamento remoto, de forma que eles adquiram características de escala e projeção próprias de mapas. A abordagem mais utilizada é através de valores conhecidos da área de interesse, como coordenadas geográficas.

No SPRING, este tipo de correção geométrica é feita através do procedimento de Registro, que relaciona as coordenadas da imagem (linhas e colunas) com coordenadas geográficas (latitude e longitude) de um mapa ou carta (figura 7). O Registro visa eliminar as pequenas distorções causadas por imprecisão dos dados de posicionamento do sensor, no processo de formação da imagem ou pelo sistema sensor.



**Figura 7. Esquema do geo-referenciamento de uma imagem digital.**

## **2.6 Estado trófico**

O estado trófico de um lago pode também ser definido por sua produtividade primária e esta pode ser inferida pela clorofila-a (Schröder, 1991). Carlson (1977) diferencia os índices tróficos dos índices de qualidade da água, pois estes implicam num julgamento subjetivo e intrinsecamente dependente do uso local da água. O estado trófico é amplamente utilizado como indicador de impactos nestes ecossistemas. Existem várias classificações de lagos referentes ao estado trófico.

O Trophic State Index (TSI), proposto por Carlson (1977), veio modificar a classificação até então utilizada de lagos em oligotróficos, mesotróficos e eutróficos e inovou por ser um índice numérico de 0 a 100. Como o estado trófico é multidimensional, não pode ser inferido através de apenas uma variável. O TSI procura

incorporar características de métodos que aplicam um único parâmetro e de métodos multidimensionais. O autor escolheu utilizar biomassa de algas porque este parâmetro interessa ao público e facilita a comunicação entre este e os cientistas. A biomassa de algas pode ser inferida por várias medidas, como peso seco ou úmido, carbono particulado, clorofila ou transparência. Carlson optou pela transparência do disco de Secchi por ter valores facilmente transformados em escala e por ser um dos mais fáceis e freqüentes procedimentos em Limnologia. É uma variável de fácil obtenção, cuja técnica é dominada por virtualmente todos os pesquisadores de ecossistemas aquáticos.

Além destes dois parâmetros, utilizou fósforo total; a correlação entre estes parâmetros fornece o valor de TSI que permite comparações entre diferentes locais. Desta forma, utilizou três parâmetros que, segundo ele, permitiriam inferir sobre a situação total. Forsberg & Ryding (1980) também encontraram boa relação entre clorofila-a e transparência em lagos suecos. Mas esta medida tende a não corresponder à biomassa de algas em lagos com material em suspensão que não sejam algas, como é o caso das lagoas costeiras. O uso da transparência para classificações limnológicas depende dos fatores que a influenciam majoritariamente.

É importante ressaltar que este índice não é adequado a todos os ambientes. De acordo com suas peculiaridades, se fazem necessárias adaptações e adequações. Por isso é tão importante o conhecimento da dinâmica e da composição da suspensão deste ecossistema em estudo. Neste sentido, Novo (2005) complementa, dizendo que o grande desafio no estudo de ecossistemas límnicos atualmente é conhecer seu funcionamento e compreender seu sistema de resposta a impactos antropogênicos, para prever seu comportamento no sentido da sustentabilidade, para fins de gestão.

## 2.7 Clorofila-a

A clorofila-a é um pigmento fotossintetizante presente em praticamente todos os grupos de algas. Por isso, Dillon & Rigler (1974) colocaram que a clorofila-a é um parâmetro muito útil e simples para estimar fitoplâncton. Thiemann e Kaufmann (2000) ressaltam ainda que a clorofila-a age como um bom descritor da produtividade e pode ser relacionada linearmente com biomassa em função da composição de espécies, exposição à luz, idade de uma comunidade de algas e mesmo reserva de nutrientes das células.

A clorofila-a é amplamente utilizada para indicar o estado trófico de corpos d'água, inclusive sendo fator decisivo para classificá-los em oligotróficos, mesotróficos ou eutróficos (Jones *et al*, 1979; Costa, 1993).

Zhang *et al* (2003), coloca que, desde a década de 70, a concentração de clorofila-a tem sido detectada por sensores remotos em águas marinhas com sucesso, mas ressalva que ainda existem problemas nos algoritmos derivados, principalmente em relação à concentração por área.

## 2.8 Material em suspensão

Turbidez é uma característica da água causada pela presença de materiais inorgânicos e orgânicos em suspensão. Pode ser expressa em NTU – unidades nefelométricas de turbidez, FTU – unidades de turbidez de Formazin ou em FAU – unidades de atenuação de Formazin. (Anckorn, 2003).

Este mesmo autor coloca que a turbidez é a medida das propriedades ópticas coletivas de uma amostra de água que causam o espalhamento e absorção da luz, fenômenos que acabam por sobrepujar a transmissão desta energia. Assim, quanto maior a turbidez, maiores também o espalhamento e a absorção.

Quanto maior a turbidez, menor a transparência e menor a penetração de energia luminosa. A alta turbidez pode constituir um sério limitador da produtividade de um corpo d'água.

Os sólidos suspensos, principalmente argila, silte, pigmentos orgânicos solúveis, plâncton e organismos microscópicos, são os principais responsáveis pelo espalhamento da radiação incidida na subsuperfície do corpo d'água.

Partículas grandes espalham ondas de comprimento longo mais efetivamente que ondas de comprimento curto, entretanto a quantidade de luz espalhada depende fortemente do comprimento de onda emitido pela fonte, seja ela natural ou artificial.

## **2.9 Transparência do disco de Secchi (TDS)**

A transparência em lagoas é função, principalmente, da turbidez, orgânica ou inorgânica. Kloiber *et al* (2002) explica que a TDS, além da facilidade da coleta do dado e conseqüente maior disponibilidade desta informação, conta ainda com o entendimento e interesse da população em geral, e influencia em usos recreacionais e paisagísticos da água. Após estudos em diversos lagos europeus e norte-americanos, este autor encontrou relação entre a concentração média de clorofila-a no verão e a média de verão de TDS, indicando que, nestes ambientes, a transparência pode ser importante indicador do estado trófico.

O Disco de Secchi foi utilizado pela primeira vez, segundo registros históricos, em 1865, pelo Comandante Cialdi (Tyler, 1968). Desde então, sofreu algumas padronizações e vem sendo usado muito frequentemente por limnólogos do mundo todo.

Curran & Novo (1988) apontam que a transparência pode influenciar na relação entre turbidez e reflectância, em dependência do tipo de fundo e do material em suspensão. Mas esta influência é significativa apenas em águas muito claras e rasas (Braga, 1999).

## **CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Área de estudo**

A planície costeira do Rio Grande do Sul faz parte da Restinga, ecossistema compreendido entre os estados brasileiros do Rio Grande do Sul e Maranhão, ao longo da costa (Schäfer, 1989).

A planície costeira do Rio Grande do Sul possui uma extensão aproximada de 640 km, limitando-se com o Oceano Atlântico, desde Torres, ao norte, no Rio Grande do Sul, até La Coronilla, no Uruguai, ao sul. Está inserida entre os paralelos 29° 12' e 33° 48' de latitude sul e os meridianos 49° 50' e 53° 30' de longitude oeste (Schwarzbald, 1982). Do total de 37.000 km<sup>2</sup>, 22.740 km<sup>2</sup> são de terras emersas e 14.260 km<sup>2</sup> são lagos e lagoas. Desta área, excluindo a Laguna dos Patos e as Lagoas Mirim e Mangueira, têm-se 660 km<sup>2</sup> de lagoas dispostas em forma de rosário pelo litoral (figura 8). (Schwarzbald e Schäfer, 1984).

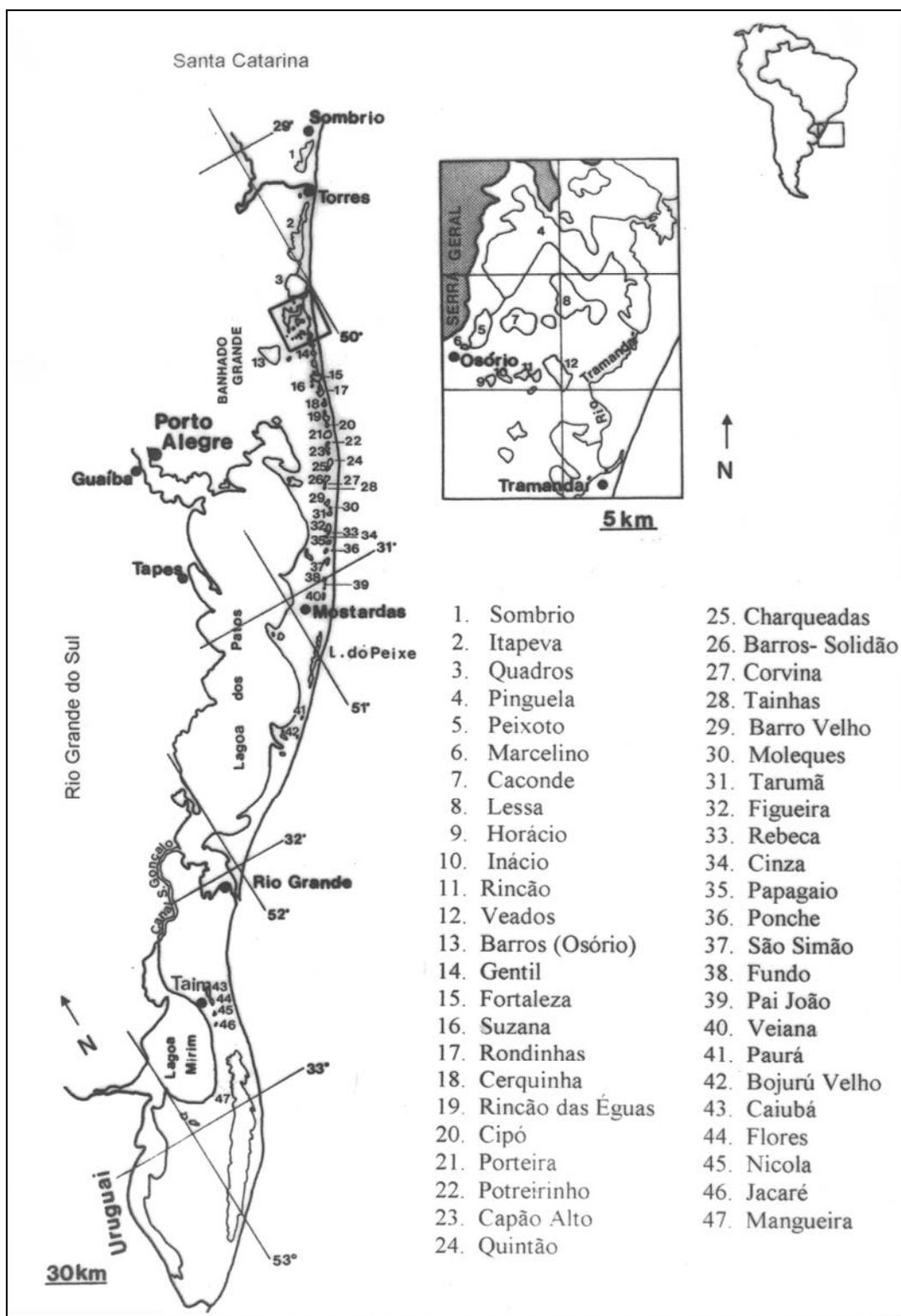
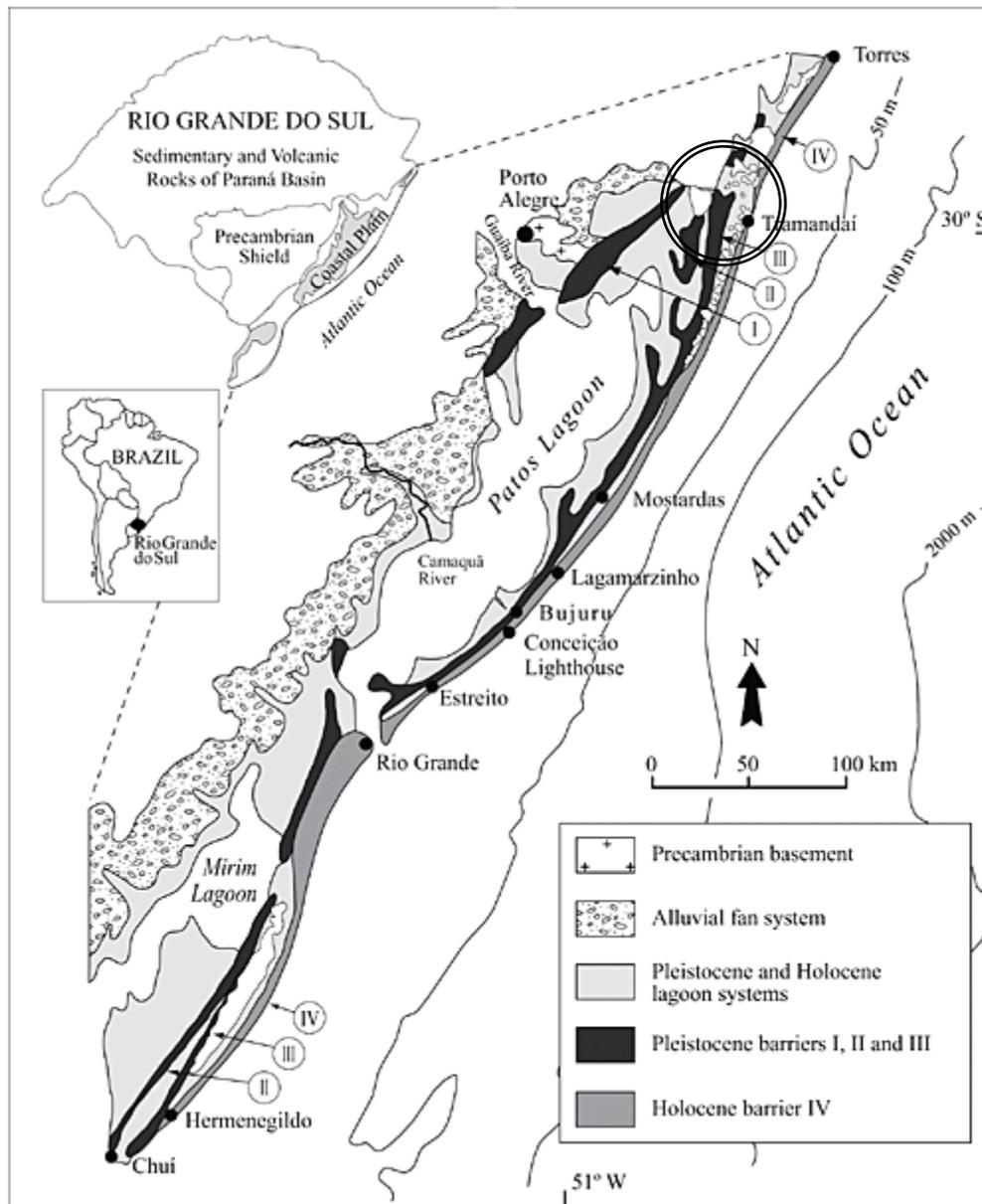


Figura 8. Lagoas da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Os números correspondem às lagoas da tabela. Lanzer, 1983.

A costa do Rio Grande do Sul é uma planície cujas elevações são raramente maiores que 20 metros, representadas principalmente por dunas fixas (Delaney, 1962). Apresenta uma ampla planície sedimentar cenozóica que encerra um conjunto de feições geomorfológicas sob condições de clima subtropical úmido costeiro. Possui um solo de baixa fertilidade natural e alta suscetibilidade eólica, fator que influencia no transporte de sedimentos para as lagoas e, conseqüentemente, na sua transparência (Schäfer e Schwarzbald, 1984). Schäfer (1985) explica que as lagoas costeiras do Rio Grande do Sul têm sua origem em um processo exógeno de regressões e transgressões marinhas pleistocênicas e holocênicas associadas a eventos de erosão de parte da costa e sua evolução é muito rápida (figura 9). No decorrer destas fases de regressão, lagos efêmeros com diferentes idades, estrutura morfológica e características ecológicas foram formados (Schäfer, 1989). Como conseqüência das oscilações do nível do mar houve um crescimento das restingas em direção a leste da linha da praia com acúmulo de sedimentos arenosos que levaram, juntamente com a invasão dos corpos lagunares, à formação de ambientes palustres (Schwarzbald, 1982). Considerando-se que o Holoceno, caracterizado por pequenas oscilações no nível do mar, iniciou há sete mil anos, é possível inferir sobre a recente formação deste ambiente. Na extensão entre o canal da laguna dos Patos (São José do Norte) e o rio Mampituba (Torres) existem barreiras relativamente conhecidas no que se refere à sua evolução durante o Holoceno. Nesta área ocorrem barreiras de natureza regressiva (de Tramandaí a Torres) e de natureza Transgressiva (de Tramandaí a São José do Norte). Estes tipos antagônicos de barreiras coexistem temporalmente por causa do balanço de sedimentos positivo e negativo que prevaleceu por séculos e milênios na costa do Rio Grande do Sul. Desta forma, a região de Tramandaí representa o local de transição entre estes dois tipos de barreiras (Dillenberg *et al*, 2005).



**Figura 9. Geologia Geral da planície costeira do Rio Grande do Sul. Em destaque, a área de estudo. Dillenburg *et al*, 2004.**

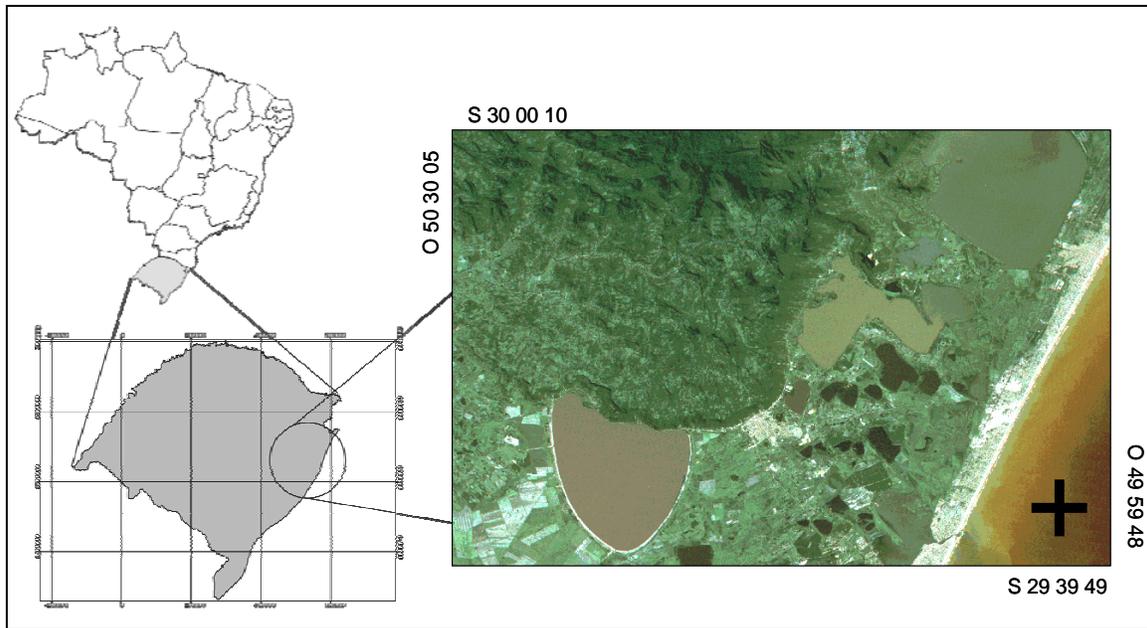
O clima da planície costeira é do tipo Cfa, segundo classificação de Köppen (1936), com temperatura relativamente uniforme em todo o litoral com distribuição homogênea de chuva o ano todo. Por ter exposição sudeste, esta área sofre grande influência de massas marítimas de ar quente, que levam a alta pluviosidade (Schäfer, 1989). Os ventos são predominantemente de nordeste e as precipitações são frequentes. Hasenack & Ferraro (1989) encontraram que as temperaturas médias do mês mais quente

superam os 22°C e a do mês mais frio fica entre -3°C e 18°C. Sendo que a umidade relativa do ar é mais elevada no inverno.

Segundo Schäfer e Schwarzbald (1984), a direção do vento é fator que influencia toda a Planície Costeira e pode estar relacionada à composição do material em suspensão. Em lagos rasos próximos a águas costeiras, a densidade de plâncton ou a composição mineral do material em suspensão podem afetar a transparência (Schäfer, 1992). A turbidez e a composição do material em suspensão dependem, além da morfologia da lagoa e da ação do vento, do substrato geológico que varia de áreas de banhado com argila e granulometria mais fina até depósitos de areia fina nos diferentes terraços pleistocênicos e holocênicos. Além disso, a ausência de estratificação causada pela mistura da água em função do vento evita a disponibilização de fosfato e leva a uma tendência oligotrófica das lagoas. Assim, neste ambiente, a produtividade não é limitada pela concentração de nutrientes.

Constitui-se em uma região de idade geológica recente, cujos ecossistemas apresentam características de fragilidade e raridade, mostrando uma seqüência de ambientes de especial valor paisagístico e produtividade biológica: praias marinhas, barreiras de dunas, banhados, cordão de lagoas doces e salobras e encosta da serra. A Bacia do rio Tramandaí encontra-se sobre rochas vulcânicas (Formação Serra Geral), rochas sedimentares (Formação Botucatu) e sedimentos costeiros não consolidados (Freitas, 2003).

A área de estudo se situa no litoral norte do Rio Grande do Sul (figura 10). A região do litoral norte é delimitada ao sul pelo município Balneário Pinhal, ao norte pelo rio Mampituba, a leste pelo oceano e, a oeste em função de sua formação geológica, relevo, bacia de drenagem e limites políticos, estendendo-se até os limites de São Francisco de Paula.



**Figura 10. Área de estudo. Litoral norte do rio Grande do Sul, Brasil.**

Schwarzbald (1996a) coloca que as lagoas do Sistema Tramandaí formam o mais novo sistema lagunar da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, e evoluíram por segmentação controlada pelo regime regional de ventos de direção Nordeste.

Schwarzbald (1982) dividiu o litoral norte em dois subsistemas: Subsistema Norte que se estende da Lagoa Itapeva ao norte até a Lagoa Tramandaí ao sul e Subsistema Sul, que se estende da Lagoa Armazém ao norte até a Lagoa Cerquinha ao sul. As lagoas do litoral norte são, em sua maioria, rasas e com muito material em suspensão.

Vários estudos já foram realizados sobre as lagoas do litoral norte, como por exemplo: composição e distribuição da comunidade de macroinvertebrados bentônicos (Freitas, 2003), qualidade da água e zooplâncton (Pedrozo, 2000), macroinvertebrados bentônicos (Rodrigues e Würdig, 1996; Rodrigues, 1996), macrófitas aquáticas (Schwarzbald, 1982), moluscos (Lanzer, 1983), poluição da lagoa Barros (Oliveira, 1983), entre outros. Sobre a lagoa Caconde foram realizados também vários estudos, dentre os quais destaco os sobre morfologia e sedimentologia (Machado, 1994), físico-química d água (Leite, 1994; Leite e Fonseca, 1995), comunidades fitoplanctônicas

(Konrath, 1995), comunidades perifíticas (Tedesco, 1995), de macrófitas (Haas, 1996; Rocha, 1996), comunidade zooplanctônica (Güntzel, 1995) e comunidades de peixes (Hartz, 1997).

Na lagoa dos Barros são encontradas baixas transparências, principalmente em função do manto de fundo composto por material argiloso (Oliveira, 1983).

Schwarzbold (1996 b), em estudo realizado na Lagoa Caconde, observou que este é um ecossistema raso muito produtivo, no qual as características físico-químicas da água são influenciadas pela sazonalidade climática e pela morfologia. Apresenta regime de circulação polimítico, caracterizado pela ausência de compartimentalização horizontal.

Schwarzbold (1982) cita os seguintes valores morfométricos para as lagoas em estudo (tabela 1):

**Tabela 1. Valores de superfície, profundidade máxima e profundidade mínima de lagoas do litoral Norte. Schwarzbold, 1982.**

lagoa	Superfície (km <sup>2</sup> )	Profundidade máxima (m)	Profundidade mínima (m)
Malvas	15,00	1,9	1,37
Palmital	11,72	3,0	1,96
Pinguela	29,08	3,3	2,12
Peixoto	3,26	2,5	1,68
Caconde	4,06	2,5	1,68
Lessa	6,86	2,0	1,40
Fortaleza	18,54	2,6	1,74
Cerquinha	8,66	1,8	1,28
Barros	90,00	4,1	2,54

### 3.2 Sensoriamento remoto

Foram utilizadas imagens captadas pelo sensor CCD do *Chinese Brazilian Environment Remote Sensing* (CBERS), obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As imagens têm órbita 156/133, e zero por cento de cobertura de nuvens, já que estas constituem um grande empecilho à passagem da energia reflectiva.

Os sensores do satélite CBERS são o CCD, o IR-MSS e o WFI. O sensor CCD (*Charge-Coupled Device*) é uma câmera de alta resolução. Capta imagens de 113 km de largura com resolução espacial de 19,5 X 19,5 m. Sua periodicidade é de 26 dias e suas bandas têm a seguinte resolução espectral (Tabela 2):

**Tabela 2. Bandas espectrais do sensor CCD do CBERS.**

Bandas	Faixas Espectrais (nm)	Região do espectro
B1	450 – 520	Azul
B2	520 – 590	Verde
B3	630 – 690	Vermelho
B4	770 – 890	IV próximo
B5 (PAN)	510 - 730	VIS-IV próximo

O sensor IR-MSS (*Infrared Multispectral Scanner Subsystem*) é uma câmera de varredura que opera em quatro faixas espectrais que abrangem desde o visível até o termal. Cada cena tem 120 km de largura, resolução espacial de 77,8 X 77,8 m e sua periodicidade é de 26 dias (Tabela 3).

**Tabela 3. Bandas espectrais do sensor IR-MSS do CBERS**

Bandas	Faixas Espectrais (nm)	Região do espectro
B6	500 – 1.100	VIS-IV próximo
B7	1.550 – 1.750	IV médio
B8	20.80 – 2.350	IV médio
B9	10.040 – 12.050	IV médio

Já o sensor WFI (*Wide Field Imager*) é um sensor cuja cena tem 890 km de largura com resolução espacial de 256 X 256 m. Com ele, é possível obter uma cobertura completa do globo em cinco dias (Tabela 4):

**Tabela 4. Bandas espectrais do sensor WFI do CBERS.**

Bandas	Faixas Espectrais (nm)	Região do espectro
B10	630 – 690	Vermelho
B11	770 - 890	IV próximo

Neste trabalho foram utilizadas apenas imagens do sensor CCD (Bandas de 1 a 4) por conterem os comprimentos de onda de interesse e boa resolução espacial.

Também foram utilizadas imagens do sensor Landsat TM 5, com resolução espacial de 30 metros. Este sensor é amplamente utilizado para estudos de qualidade da água (Lathrop & Lillesand, 1986; Harrington & Schiebe, 1992; Baban, 1994). Na tabela 5 é possível visualizar uma comparação entre as bandas de cada um destes dois sensores:

**Tabela 5. Comparação entre as características espectrais das bandas dos sensores CCD e IR-MSS do CBERS e as bandas do Landsat TM.**

CBERS		Landsat TM		Principais Aplicações
Banda	Faixa espectral ( $\mu\text{m}$ )	Banda	Faixa espectral ( $\mu\text{m}$ )	
1 – CCD	0,45 – 0,52	1	0,45 – 0,52	Mapeamento de águas costeiras; diferenciação entre solo e vegetação; diferenciação entre vegetação conífera e decídua (azul até verde)
2 – CCD	0,52 – 0,59	2	0,52 – 0,60	Reflectância da vegetação verde sadia (verde até amarelo)
3 – CCD	0,63 – 0,69	3	0,63 – 0,69	Absorção de clorofila, diferenciação de espécies vegetais (laranja até vermelho)
4 – CCD	0,77 – 0,89	4	0,76 – 0,90	Levantamento de biomassa, delineamento de corpos d'água (IV próximo)
1-IR/MSS	1,55 – 1,75	5	1,55 – 1,75	Medidas de umidade da vegetação; diferenciação entre nuvens e neve (IV médio)
3 - IR-MSS	10,4 – 12,5	6	10,4 – 12,5	Mapeamento do estresse térmico em plantas; outros mapeamentos térmicos (IV termal)
2 -IR - MSS	2,08 – 2,35	7	2,08 – 2,35	Mapeamento hidrotermal (IV médio)
Pan – CCD	0,51 – 0,73			Verde até IV próximo

### 3.2.1 Correção geométrica de imagens digitais

Foi feita pelo módulo Registro do SPRING. Foram informadas coordenadas geográficas planas de carta topográfica digitalizada e geo-referenciada e as correspondentes coordenadas da imagem de linha e coluna, pelo modo “via tela”. Após o cálculo do erro residual foram selecionados os pontos que melhor corrigiram a imagem, com erro de menos de um pixel (menos de 20 metros no caso do CBERS e menos de 30 metros no caso do Landsat TM) e efetuado o registro.

### 3.2.2 Conversão dos números digitais em reflectância

Os números digitais foram convertidas para reflectância aparente, com rotina “reflete\_CCD” escrita em LEGAL do Spring e considerando o ângulo zenital, a elevação solar e os coeficientes de calibração de cada banda. (Anexo 1).

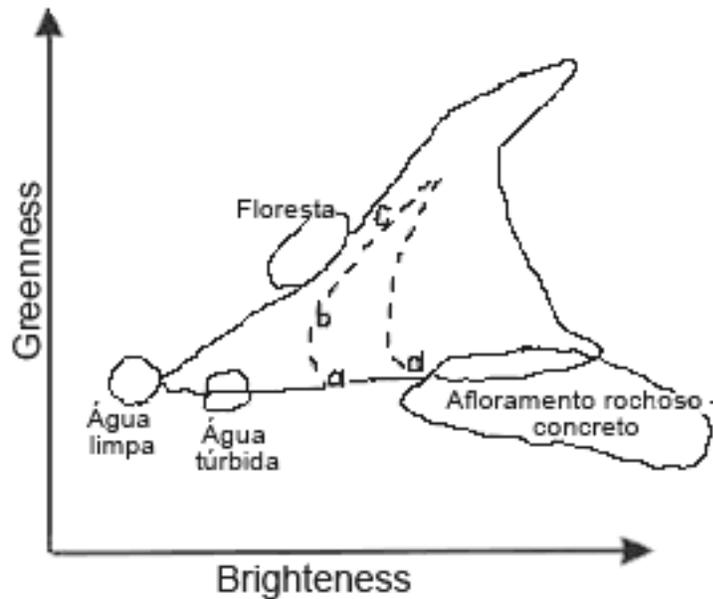
### 3.2.3 Correção atmosférica

Foi feita a correção atmosférica da imagem CBERS de 27 de novembro de 2005 pelo modelo 6S (anexo 2) e a conversão para reflectância de superfície através de rotina escrita com linguagem LEGAL implantada no software.

### 3.2.4 Normalização

Considerando a alta cobertura de nuvens nas imagens das datas de coleta, apenas foi possível utilizar a imagem CBERS do dia 27 de novembro de 2005. Para possibilitar a utilização da imagem do sensor Landsat TM, tomada em 18 de novembro de 2005, e da imagem CBERS de 01 de novembro do mesmo ano para maiores análises comparativas, foi feita a normalização, tomando como referência a imagem CBERS de 27 de novembro de 2005. Silva *et al* (2003) colocam que, com a normalização, ou retificação, de uma imagem de acordo com outra já com correção atmosférica, pretende-se que a imagem normalizada pareça ter sido obtida pelo mesmo sensor e nas mesmas condições atmosféricas e de iluminação que a imagem referência. O objetivo da normalização é eliminar a influência da atmosfera e de iluminação entre as imagens, tornando as diferenças existentes entre as imagens decorrentes apenas das relativas a modificações do alvo ou fenômeno. Neste sentido, as técnicas de normalização visam permitir a comparabilidade das imagens. Gleriani *et al* (2003) colocam que uma das mais clássicas transformações espectrais é a *Tasseled cap* (Kauth & Thomas, 1976), que descreve a trajetória espectro-temporal dos pixels em uma cena agrícola que resulta em um desenho semelhante a um capuz, o que originou este nome (figura 11).

*Tasseled cap* é uma transformação de coordenadas pela mudança dos eixos e tem usos diversos, dos quais destacam-se os que fazem uso de sua alta sensibilidade às variações espectrais dos tipos de cobertura (Crist *et al.*, 1986). É amplamente utilizada na normalização.



**Figura 11.** Formato típico do gráfico “tasseled cap” com a localização espectral de algumas classes de alvos. Os pontos (a) solo exposto, (b) desenvolvimento do dossel, (c) ápice do dossel e (d) senescência, descrevem a trajetória temporal dos pixels de uma cena agrícola. Rudorff, 2006.

As duas primeiras componentes desta transformação, que são utilizadas para a normalização, são *brightness* e *greenness*. A imagem *brightness* é a soma ponderada de todas as bandas e está relacionada à variação espectral dos solos. A imagem *greenness* está relacionada ao vigor da vegetação e representa a diferença entre o canal infravermelho próximo e os canais do espectro visível e infravermelho médio:

$$BR = 0,3037*tm1+0,2793*tm2+0,4743*tm3+0,5585*tm4+0,5082*tm5+0,1863*tm7$$

$$GR = -0,2848*tm1-0,2435*tm2-0,5436*tm3+0,7243*tm4+0,0840*tm5-0,1800*tm7$$

Na imagem Landsat, calcula-se estas duas componentes com as bandas de 1 a 5 e banda 7, pois a banda 6, na faixa termal, não é utilizada. Na imagem CBERS, calcula-se com as bandas de 1 a 5, embora apenas as de 1 a 4 sejam utilizadas para as correlações. Através da visualização destas duas componentes, feições pseudo-invariantes claras e escuras de cada uma foram determinadas através do intervalo dos valores de número digital. O uso do princípio da ortogonalidade entre as componentes garante que feições situadas em determinadas regiões do gráfico tenham poucas variações, são pseudo-invariantes. São exemplos as rochas expostas e águas profundas. A partir destas informações foram geradas máscaras temáticas a fim de calcular a média das imagens de reflectância nas duas datas. As médias das máscaras de cruzamento dos pontos claros e escuros foram calculadas para as duas imagens.

Depois de feita a normalização, são calculadas as médias de claros e escuros a fim de comparar com a imagem referência. Esta transformação espectral aplicada à normalização proporciona a análise de n bandas em um só produto.

### 3.3 Métodos limnológicos:

#### 3.3.1 Lagoas amostradas

Foram amostradas doze lagoas ao todo, em cinco coletas (tabela 6).

**Tabela 6. Lagoas, localização do ponto de coleta e datas das coletas.**

Lagoa	Data	X	Y
Armazém	13/02/06	580343	6680582
Barros	27/11/05	565638	6690499
Barros	13/02/06	565649	6690494
Barros	30/04/06	565548	6691286
Caconde	27/11/05	576920	6696467
Caconde	13/02/06	576928	6696464
Caconde	30/04/06	576929	6696462
Caieira	27/11/05	579216	6695697
Cerquinha	27/11/05	580529	6697211
Fortaleza	27/11/05	574693	6663523
Fortaleza	05/04/06	574699	6663527
Fortaleza	30/04/06	574703	6635331
Lessa	18/01/06	583742	6696390
Lessa	13/02/06	583343	6696342

Malvas	18/01/06	583808	6700939
Malvas	13/02/06	583813	6700939
Malvas	05/04/06	585380	6702626
Malvas	30/04/06	584938	6702667
Palmital	27/11/05	581895	6701715
Palmital	18/01/06	580448	6700963
Palmital	13/02/06	580449	6700957
Palmital	05/04/06	581895	6701715
Palmital	30/04/06	581801	6701526
Passo	05/04/06	586469	6696056
Passo	30/04/06	586581	6695949
Peixoto	27/11/05	573825	6695634
Peixoto	13/02/06	573837	6695619
Peixoto	05/04/06	573811	6695626
Peixoto	30/04/06	573334	6695492
Pinguela	27/11/05	577071	6701619
Pinguela	13/02/06	577454	6700403
Pinguela	05/04/06	577071	6701619
Pinguela	30/04/06	578786	6703354

### 3.3.2 Coletas

As coletas foram realizadas com auxílio de barco. Procurou-se, em cada lagoa, atingir um ponto central, a fim de reduzir o efeito de borda, principalmente porque a maioria das lagoas apresenta grande quantidade de macrófitas nas margens (figura 12).



**Figura 12. Lagoa Malvas, Osório, mostrando a borda com macrófitas.**

Em cada ponto foram medidos: transparência do disco de Secchi, turbidez e clorofila-a. As datas foram definidas em função das datas de passagem do satélite CBERS.

#### **a) Transparência do Disco de Secchi (TDS)**

Neste trabalho foi utilizado um disco branco de material plástico, com 20 cm de diâmetro e fita métrica. O método consiste em afundar o disco na água, em linha reta, e registrar a menor profundidade na qual ele não está mais visível.

#### **b) Material em suspensão**

As amostras foram coletadas a uma profundidade de 15 centímetros, acondicionadas em garrafas identificadas e levadas para o laboratório de Limnologia da Universidade de Caxias do Sul. Foram homogeneizadas, e sua turbidez medida em unidades FAU em espectrofotômetro com comprimento de onda de 750 nm.

#### **c) Clorofila-a**

A extração seguiu o método de extração por álcool etílico a frio (Schroeder, 1994; comunicação pessoal). A amostra foi coletada a uma profundidade de 15 cm e filtrada em campo, com bomba de vácuo e filtro de fibra de vidro (espessura de 1,5 mm) sem incidência direta da luz. Procurou-se filtrar 500 mL de cada amostra, mas em águas com muita turbidez filtrou-se o máximo possível, ficando o valor mínimo em 160 mL na Lagoa Caconde. Este filtro foi colocado diretamente em embalagem plástica preta e mergulhado em etanol 90%. Esta embalagem permaneceu refrigerada por um período de 24 horas. Após, o filtro foi macerado com adição de etanol até dissolução completa. Esta massa foi novamente filtrada com filtro de membrana (45  $\mu\text{m}$ ) até perder a cor verde amarelado. Uma amostra deste extrato foi medida em espectrofotômetro no comprimento

de 655 nm. A leitura é corrigida pela medida da absorbância da turbidez em 750 nm, para evitar a interferência desta variável na medição da clorofila-a. Para o cálculo da concentração da clorofila-a utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{Clo-a (mg/m}^3\text{)} = \frac{29,6 * A_v * V_e}{V_p * D}$$

Onde:

D = largura da cubeta em centímetros

$A_v$  = diferença de absorção 655nm e 750nm ( $E_{655} - E_{750}$ )

$V_e$  = volume do extrato em mililitros

$V_p$  = volume da amostra de água em mililitros

### **3.4 Estatística**

Os dados limnológicos e de sensoriamento remoto geo-referenciados foram inseridos em planilha do software SPSS 13 para análise de correlação e regressão. Foi utilizado o método de regressão linear e Power, de logaritmização x e y, para linearização das relações não lineares entre as variáveis.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em geral, as técnicas de monitoramento do estado trófico de águas paradas utilizando sensoriamento remoto, baseiam-se na reflectância da clorofila-a. Segundo Woodruff (1999), a crescente turbidez e os efeitos ecológicos associados em águas estuarinas e oceânicas levaram ao avanço nos estudos *in situ* e por sensoriamento remoto deste parâmetro, bastante variado em sua composição e decorrente resposta espectral. Porém, como demonstrado por Ferrari *et al* (1996), as substâncias amarelas presentes nos corpos d'água representam uma importante fonte de erro na determinação de variáveis biológicas nos dados de sensoriamento remoto. O uso da TDS como medida de trofia de um lago pressupõe que esta variável seja derivada quase que exclusivamente da turbidez orgânica, como a biomassa de algas. Schäfer (1989) já apontava que a circulação da água e o efeito muito forte dos ventos de direção nordeste nas lagoas costeiras tornam a medição da clorofila-a muito incerta, não servindo como indicadora da intensidade do metabolismo do lago.

Woodruff *et al* (1999) aplicaram imagens do sensor AVHRR buscando estudar seu potencial de monitorar a atenuação da luz como medida de turbidez. Sua área de estudo, um estuário na Carolina do Norte, Estados Unidos, apresenta predomínio de sedimentos suspensos, devido aos tributários carregados de suspensão orgânica e inorgânica. Estes autores ressaltam que algoritmos derivados da reflectância obtida por sensoriamento remoto fornecem dados específicos para o local para onde foram calculados com acurácia razoável, mas sua utilização universal é limitada.

A aplicação de métodos de sensoriamento remoto é limitada pela nebulosidade e chuvas. No presente estudo, a alta frequência de condições inapropriadas para obtenção de imagens livres de influência de nebulosidade e chuvas foi um empecilho para realização de coletas, utilização de mais imagens e aproveitamento dos dados limnológicos obtidos. Esta condição climática pode ser explicada pela influência da encosta da Serra Geral na alta taxa de condensação nos ventos quentes e úmidos vindos do oceano Atlântico.

Correlações da reflectância com sólidos em suspensão têm se mostrado muito úteis em estudos de estimativa de distribuição espacial desta suspensão e acompanhamento de transporte de nutrientes, fatores em muitos casos importantes para gerenciamento e monitoramento de poluição (Rudorff, 2006).

Rudorff *et al* (2005) encontraram na alta turbidez mineral um limitador para avaliação do estado trófico, pois em seu trabalho na região Amazônica, verificaram que a presença dominante de sedimentos em suspensão provoca um aumento da reflectância ao longo da faixa espectral de interesse e mascara as feições produzidas pelo fitoplâncton; desta forma, dificultando sua quantificação por meio das bandas de absorção dos pigmentos fotossintéticos. Os autores recomendam que se caracterize com maior precisão os pigmentos do fitoplâncton de águas tropicais e adapte os algoritmos existentes, devido às diferenças nas concentrações de sólidos suspensos totais entre sistemas aquáticos de regiões temperadas e de regiões tropicais.

#### **4.1 Processamento das imagens:**

Foi realizado o processamento das imagens para análise, de acordo com estes passos:

1. Registro de cada uma das três imagens utilizadas neste trabalho (CBERS de 01/11/2005 e de 27/11/2005 e Landsat TM de 18/11/2005), no qual buscou-se um erro de geo-referenciamento menor que um pixel, ou seja, 20 metros em imagens CBERS e 30 metros em imagens Landsat; menor que 0,6 mm na carta topográfica em escala 1:50.000.
2. Conversão dos números digitais ou tons de cinza em reflectância aparente em cada uma das três imagens;
3. Correção atmosférica da imagem CBERS de 27/11/2005 (imagem referência), através da qual foi calculada a reflectância de superfície;

4. normalização das imagens CBERS de 01/11/2005 e Landsat TM de 18/11/2005, a fim de possibilitar a comparabilidade das imagens. Para isto, foram testados vários limiares de claro e escuro nas feições pseudo-invariantes, a fim de obter um resultado similar à reflectância de superfície da imagem referência.

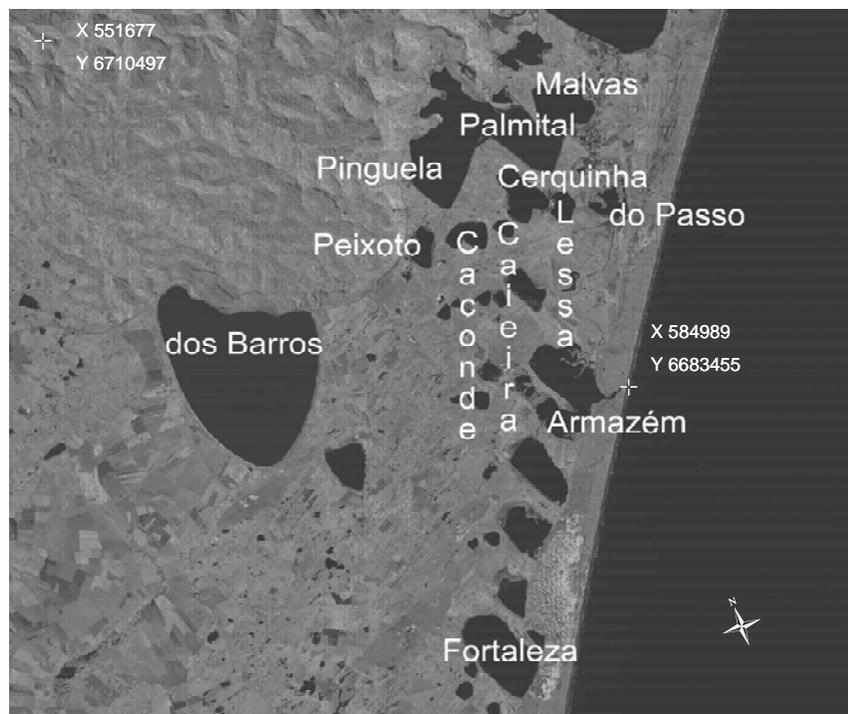
Somente após este processamento, obteve-se o dado de reflectância de superfície das três imagens. Utilizando a ferramenta “Leitura de pixels” do software SPRING, obtiveram-se os valores de reflectância de superfície para cada ponto onde foram coletadas as variáveis limnológicas (tabela 7).

**Tabela 7. Dados de reflectância de superfície calculados para os locais de coleta. S: CBERS de 27/11/05; TM: Landsat de 18/11/05 normalizada; R: CBERS de 01/11/05 normalizada.**

Lagoa	S1	S2	S3	S4	TM1	TM2	TM3	TM4	R1	R2	R3	R4
Barros	35	20	25	31	44	25	24	74	54	27	30	76
Caconde	11	7	13	20	42	22	21	75	48	23	27	77
Caieira	15	9	14	16	41	21	20	72	47	22	24	74
Cerquinha	18	11	16	18	41	21	21	73	47	22	25	74
Palmital	41	23	27	24	48	27	26	73	57	28	30	74
Peixoto	19	11	17	18	44	23	22	73	50	24	27	74
Pinguela	34	20	25	23	45	26	25	73	56	28	30	75

#### 4.2 Dados Limnológicos:

Foram realizadas coletas em cinco datas, escolhidas para coincidir com a passagem do satélite CBERS. Em 2005: 27 de novembro; em 2006: 18 de janeiro, 13 de fevereiro, 05 de abril, e 30 de abril. As coletas ocorreram nas seguintes lagoas: Barros, Caconde, Lessa, Malvas, Palmital, Passo, Peixoto, Armazém, Cerquinha, Caieira, Fortaleza e Pinguela (Figura 13). Em cada lagoa foram coletados: transparência do disco de Secchi, clorofila-a e turbidez (tabela 8).



**Figura 13. Lagoas onde realizaram-se coletas.**

**Tabela 8. Valores de transparência do Disco de Secchi, clorofila-a e turbidez das coletas em 12 lagoas**

Lagoa	Data	Secchi (cm)	Turbidez (FAU)	Clorofila-a (mg/L)
Armazém	13.02.06	36	100	25,738
Barros	13.02.06	18	222	7,629
Barros	27.11.05	60	106	22,354
Barros	30.04.06	9	206	20,344
Caconde	13.02.06	65	25	13,715
Caconde	27.11.05	115	15	28,416
Caconde	30.04.06	73	21	14,212
Caieira	27.11.05	45	12	45,288
Cerquinha	27.11.05	120	6	2,695
Fortaleza	05.04.06	60	29	4,884
Fortaleza	27.01.06	-	5	5,400
Fortaleza	30.04.06	100	11	5,179
Lessa	13.02.06	82	20	9,271
Lessa	18.01.06	83	12	11,93
Malvas	05.04.06	55	28	16,176
Malvas	13.02.06	65	31	8,552
Malvas	18.01.06	53	18	8,65
Malvas	30.04.06	63	26	17,482
Palmital	05.04.06	60	29	9,898
Palmital	13.02.06	47	31	6,275
Palmital	18.01.06	56	18	11,949
Palmital	27.11.05	48	22	41,804

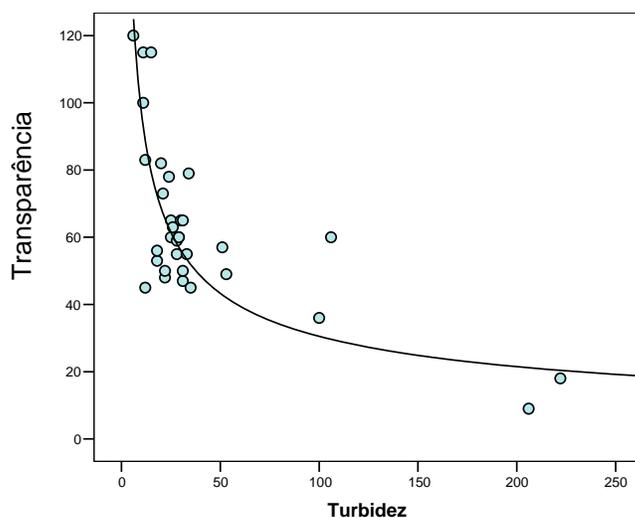
Palmital	30.04.06	60	25	8,865
Passo	05.04.06	55	33	12,195
Passo	30.04.06	79	34	20,986
Peixoto	05.04.06	50	31	9,143
Peixoto	13.02.06	57	51	46,814
Peixoto	27.11.05	115	11	16,854
Peixoto	30.04.06	49	53	49,191
Pinguela	05.04.06	65	30	8,956
Pinguela	13.02.06	59	28	10,956
Pinguela	27.11.05	50	22	14,312
Pinguela	30.04.06	78	24	10,745

Foram calculadas as correlações entre as variáveis limnológicas (tabela 9).

**Tabela 9. Correlações linear e Power entre os valores de transparência do Disco de Secchi, clorofila-a e turbidez.**

Variáveis	linear		Power	
	R <sup>2</sup>	p	R <sup>2</sup>	P
Turbidez e Secchi	0,403	<0,001	0,642	<0,001
Clorofila-a e Secchi	0,052	0,203	0,049	0,217
Clorofila-a e turbidez	0,004	0,731	0,073	0,128

Com o método Power de linearização das relações não lineares, confirmou-se a correlação inversa significativa entre turbidez e transparência (figura 14) e também se confirmou a ausência de correlação significativa entre clorofila-a e TDS e entre clorofila-a e turbidez.

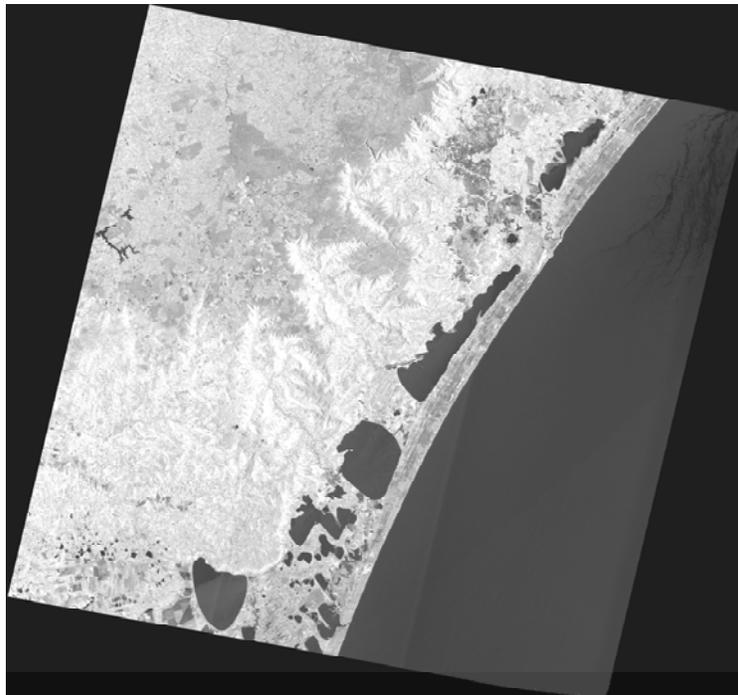


**Figura 14. Correlação Power entre turbidez e transparência. R<sup>2</sup> = 0,642; p <0,001. n = 33.**

A correlação linear entre clorofila-a e turbidez explicou apenas 5% da variância da turbidez, enquanto a correlação parcial entre clorofila e turbidez, corrigida por transparência teve 1% explicado, mostrando que a turbidez não se deve majoritariamente à concentração de clorofila-a, confirmando os resultados publicados por Schäfer, 1992. A correlação parcial é a correlação entre duas variáveis após a retirada da correlação destas duas com outra variável, que influencia ambas, ou seja, é a correlação entre uma variável dependente e uma variável independente quando os efeitos de outras variáveis independentes foram removidos do modelo.

### 4.3 Correlações:

Para fins de análise de correlação com reflectância foram utilizados dados da coleta realizada em 27 de novembro de 2005, em sete lagoas (Barros, Caconde, Palmital, Peixoto, Caieira, Cerquinha e Pinguela) (tabela 10), pois esta foi a única data na qual se obteve uma imagem (figura 15) sem cobertura de nuvens nos alvos desejados.



**Figura 15. Cena 156\_133 do satélite CBERS, banda 4, de 27 de novembro de 2005, sem cobertura de nuvens.**

**Tabela 10. Valores de transparência do Disco de Secchi, clorofila-a e turbidez da coleta de 27 de novembro de 2005**

Lagoa	Clorofila-a (mg/L)	Transparência do Disco de Secchi (cm)	Turbidez (FAU)
Barros	22,354	60	106
Caconde	28,416	115	15
Caieira	45,288	45	12
Cerquinha	2,695	120	6
Palmital	41,804	48	22
Peixoto	16,854	115	11
Pinguela	14,321	50	22

Todos os dados da reflectância possuem distribuição normal, com exceção de CBERS de 01/11, utilizando o teste de normalidade Shapiro-Wilk.

Calculou-se a correlação linear e a correlação parcial entre clorofila-a e turbidez (tabela 11).

**Tabela 11. Correlações linear e parcial (corrigida pela transparência do Disco de Secchi) entre clorofila-a e turbidez.**

	Correlação linear	Correlação parcial
R <sup>2</sup>	0,0025	0,07
p	0,992	0,613

Através da correlação parcial de Pearson, percebe-se que a correlação entre clorofila-a e TDS não aumenta de forma significativa ao retirar-se a turbidez, levando a inferir que a TDS é muito mais explicada pela turbidez do que pela clorofila-a. Este resultado confirma o calculado com os 33 casos estudados neste trabalho (tabela 9).

Foi calculada a correlação linear entre clorofila-a e dados de reflectância (tabela 12), entre transparência do disco de Secchi e dados de reflectância (tabela 12) e entre turbidez e dados de reflectância (tabela 14).

**Tabela 12. Correlação de Pearson entre clorofila-a e fatores de reflectância. \***

Banda	CB1	CB2	CB3	CB4	TM1	TM2	TM3	TM4	R1	R2	R3	R4
R <sup>2</sup>	0,008	0,0004	0,0010	0,0004	0,0500	0,0200	0,0025	0,0300	0,0100	0,0064	0,0003	0,0006
P	0,8420	0,8880	0,9450	0,9650	0,6090	0,7560	0,9150	0,7080	0,8020	0,8650	0,9700	0,9550

\* abreviações: ver tabela 7.

**Tabela 13. Correlação de Pearson entre transparência do Disco de Secchi e dados de reflectância. \***

Banda	CB1	CB2	CB3	CB4	TM1	TM2	TM3	TM4	R1	R2	R3	R4
R <sup>2</sup>	0,410	0,410	0,380	0,160	0,210	0,320	0,270	0,180	0,370	0,350	0,160	0,020
P	0,116	0,116	0,139	0,370	0,299	0,178	0,223	0,337	0,147	0,159	0,367	0,735

\* abreviações: ver tabela 7.

**Tabela 14. Correlação de Pearson entre turbidez e dados de reflectância. \***

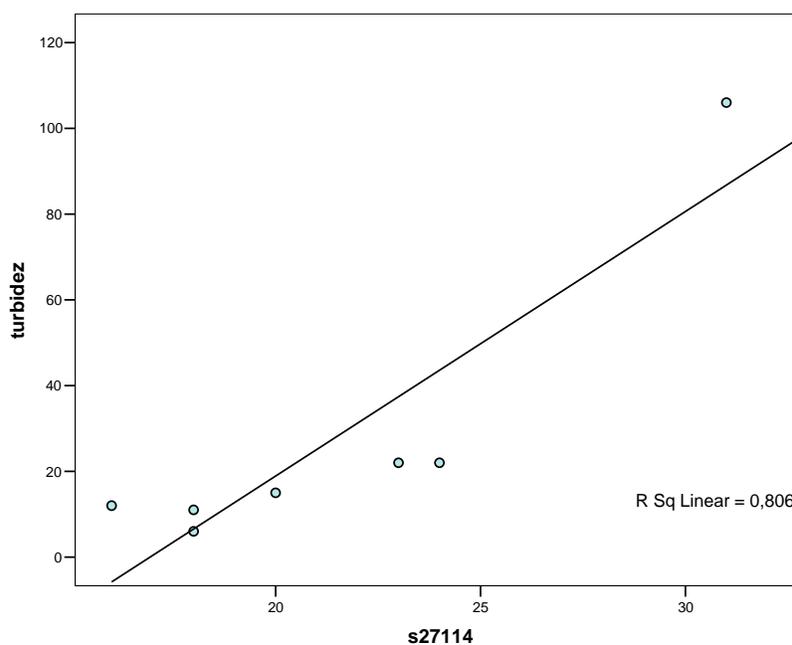
Banda	CB1	CB2	CB3	CB4	TM1	TM2	TM3	TM4	R1	R2	R3	R4
R <sup>2</sup>	0,250	0,240	0,270	<b>0,800</b>	0,040	0,150	0,140	0,110	0,170	0,230	0,300	0,180
P	0,252	0,255	0,231	<b>0,006</b>	0,656	0,376	0,401	0,451	0,353	0,274	0,198	0,321

\* abreviações: ver tabela 7.

A clorofila-a não apresentou correlação significativa com nenhuma banda, assim como a transparência do disco de Secchi. A turbidez e a banda 4 do CBERS estão altamente correlacionadas (figura 16).

$$\text{Turbidez} = 6,171 (\text{R}\lambda \text{ CBERS4}) - 104,514$$

$$R^2 = 0,806; P = 0,006$$



**Fig. 16. Regressão linear entre turbidez e fator de reflectância de superfície da banda 4 do CBERS;**

$$R^2 = 0,806. n = 7$$

Curran & Novo (1988) apontam a não linearidade da relação entre radiância e concentração de sólidos suspensos. Considerando a natureza geométrica dos dados de reflectância, calculou-se a correlação pelo método Power, que procura linearizar as relações não lineares entre as variáveis (figura 17) pela logartimização log de x e y.

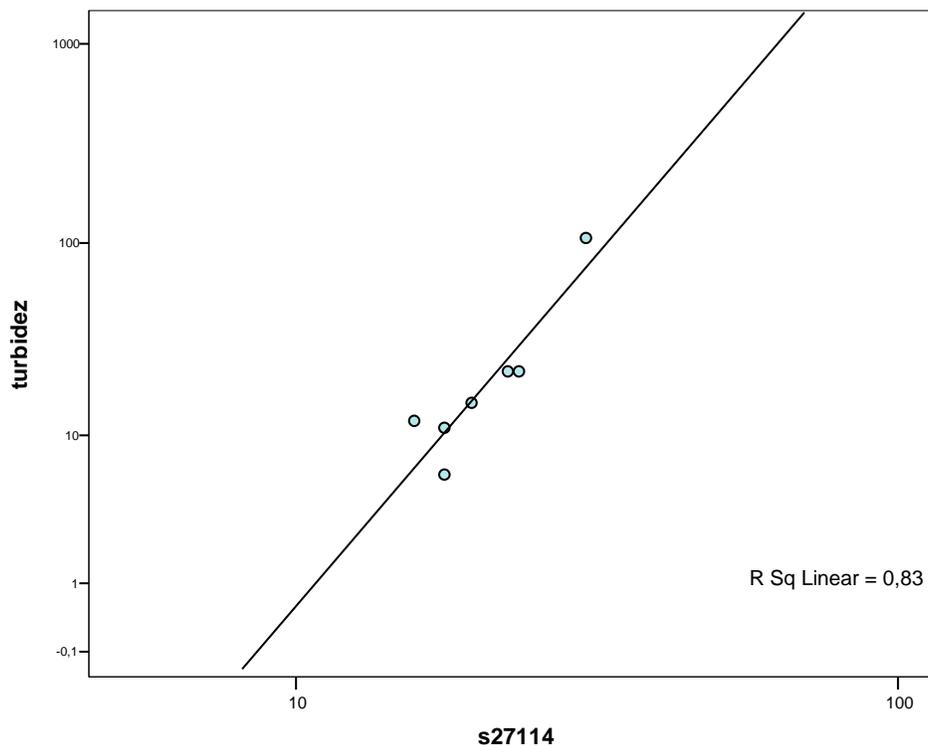
$$y = a + bx$$

$$\log y = \log a + b \cdot \log x$$

$$y = 10^a \cdot x^b$$

$$\text{turbidez} = 0,000273 \cdot (\text{CBERS4 } R\lambda)^{3,647}$$

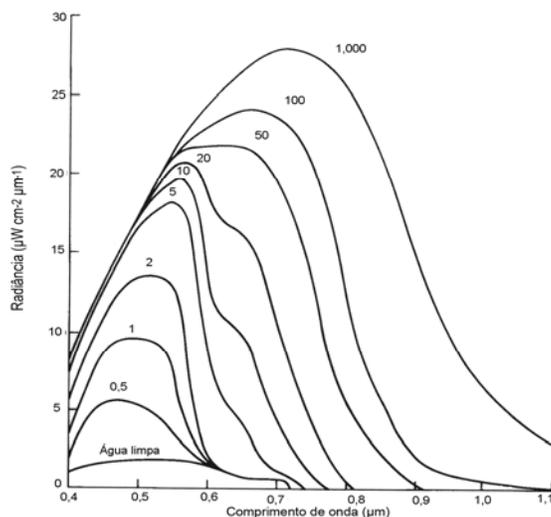
$$R^2 = 0,83; p = 0,005$$



**Figura 17. Regressão Power entre turbidez (y) e reflectância da banda 4 do CBERS (x) (reflectância de superfície).  $R^2 = 0,83$ ;  $p = 0,005$ ;  $n = 7$ .**

Por este método calculou-se que 83% da variância da turbidez pode ser explicada pela reflectância da banda 4 do CBERS.

Curran e Novo (1988) mostraram que o aumento da concentração de sólidos suspensos acarreta no deslocamento da curva de radiância em direção ao infravermelho, o que pode explicar que a única correlação significativa foi com a banda 4, situada no infravermelho próximo (Figura 18).



**Figura 18.** Gráfico relacionando o aumento da concentração de material em suspensão (x) com o deslocamento do pico da radiância em direção ao infravermelho (y). Curran e Novo (1988).

A fim de aumentar as possibilidades de uso de métodos de sensoriamento remoto, foi testada a aplicabilidade de imagens normalizadas, não tomadas na mesma data de coletas a campo, para estimativa da turbidez, baseado na correlação entre a reflectância da banda 4 do CBERS de 27/11 e as imagens CBERS de 01/11 e Landsat TM de 18/11 (tabela 15), que também não apresentaram influência de nebulosidade. A partir das correlações significativas foram calculados os valores esperados da turbidez nas sete lagoas (tabela 16).

**Tabela. 15.** Correlação entre a reflectância da banda 4 do CBERS de 27/11 e as reflectâncias das imagens normalizadas com distribuição normal.

	TM1	TM2	TM3	TM4	R1	R2	R3	R4
S4	0,539	0,715	0,713	0,418	0,722	0,771*	0,839*	0,442

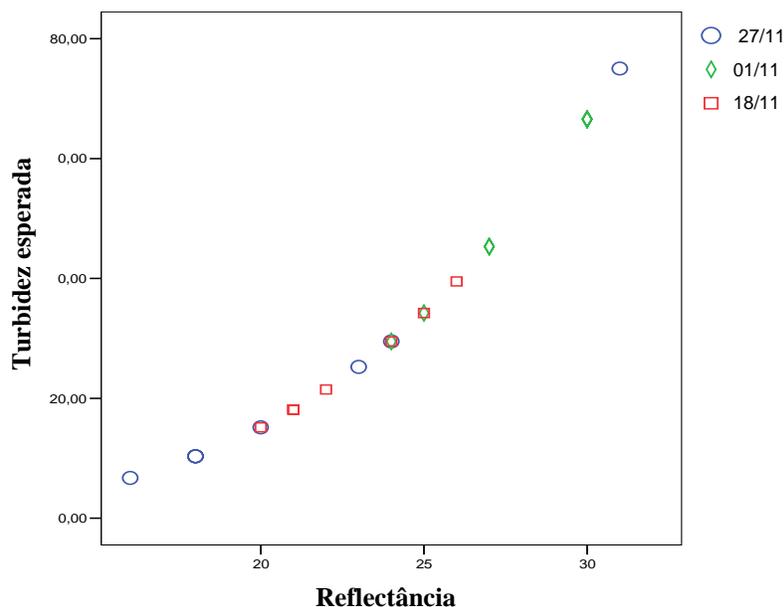
**Correlações significativas. \***

Foram encontradas correlações significativas entre o fator de reflectância da banda 4 do CBERS e as bandas dois e três o CBERS normalizado. A correlação com as bandas dois e três do Landsat não foi significativa, mas muito forte, já que quase 50% da variância é explicada.

**Tabela 16. Valores estimados de turbidez para as datas 01/11, 18/11 e 27/11, calculados a partir da reflectância da imagem referência (CBERS 27/11, banda 4) e das imagens normalizadas (CBERS 01/11, banda 3 e Landsat TM, banda 3).**

Lagoa	01/11	18/11	27/11
Barros	66	29	75
Caconde	45	18	15
Caieira	29	15	6
Cerquinha	34	10	18
Palmital	66	29	39
Peixoto	45	21	10
Pinguela	66	34	25

Esta correlação mostra a possibilidade de utilizar imagens normalizadas na estimativa de turbidez provável em datas de tomada de imagens posteriormente normalizadas (figura 17).



**Figura 19. Correlação entre a turbidez esperada calculada a partir da reflectância das imagens: referência (banda 4) e normalizadas nas bandas de maior correlação (Landsat TM banda 3 e CBERS 01/11 banda 3).**

É necessário considerar que a aproximação dos valores de turbidez deve ser entendida apenas como previsão de faixas de valores e não como valores absolutos, devido à explicação parcial (83%) da variância da turbidez pela reflectância da imagem de referência. Este resíduo reduz a precisão da previsão das reflectâncias altamente relacionadas com os dados de referência. Mesmo assim, abre uma possibilidade de utilização de imagens de data não concomitante com a coleta a campo em um monitoramento de maior amplitude temporal, uma vez que permitem reconstituir parcialmente situações ecológicas anteriores. Nos casos em que a turbidez detectada tenha uma alta correlação com a clorofila-a estas imagens podem servir para acompanhamento do desenvolvimento do estado trófico de lagos onde não se dispõe de dados sobre a concentração de clorofila-a ou da densidade do fitoplâncton. Então, o processo de normalização mostrou-se de grande potencial em casos onde não há informações ecológicas sobre os objetos em estudo.

O parâmetro chave dos índices de estado trófico é a clorofila-a. Nas lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, em função da alta turbidez, é necessário o uso de sensores com maior resolução espectral para monitorar a concentração deste pigmento. Schäfer (1989) já estabeleceu que o tipo óptico da maioria das lagoas costeiras é definido pela turbidez, não sendo a transparência relacionada à produtividade primária nestes ambientes. Bukata *et al* (1981b) colocaram como sendo virtualmente impossível estabelecer um modelo que possa prever com precisão quais os principais COAs de massas d'água, levando-se em consideração, principalmente, as várias espécies que compõem o fitoplâncton e o zooplâncton e a diversa composição do material orgânico dissolvido e inorgânico em suspensão. É indispensável o conhecimento das condições ecológicas específicas do local de estudo, pois, em diversos locais, turbidez é indicadora de poluição, o que não ocorre nas lagoas costeiras já que a alta concentração de material em suspensão é decorrente da ressuspensão contínua causada pelo vento, diminuindo a produção primária pela diminuição da entrada de luz. Pela sua importância, a turbidez deve ser estudada mais detalhadamente na sua composição e resposta espectral, mesmo que nestes ecossistemas, o aumento da turbidez não esteja relacionado ao aumento do metabolismo da lagoa.

Hellweger *et al* (2004) encontrou correlação significativa entre turbidez mineral e banda vermelha (3) do Landsat TM. Neste caso, o resultado permitirá um monitoramento da influência do carreamento dos rios contribuintes e cálculo do efeito das chuvas para isto. Isto exemplifica como as variáveis de importância para monitoramento são determinadas pelas características específicas do ecossistema.

Para esta área de estudo, um monitoramento passível de ser realizado a médio e longo prazo é necessário. A utilização de sensoriamento remoto para este fim é possível, mas para avaliação e acompanhamento do estado trófico, outros sensores devem ser testados a fim de conciliar custo/benefício com resolução espectral satisfatória para as características desta região. Neste trabalho, é possível inferir que as condições ecológicas específicas da área de estudo constituem fator limitante para a metodologia de monitoramento proposta.

Em estudos de caracterização da relação entre parâmetros, uma sólida base de dados é imprescindível. É necessário que os dados das coordenadas geográficas sejam coletados de forma correta e com boa precisão e estejam disponíveis para futuros trabalhos que visem o monitoramento através do sensoriamento remoto, pois permitirão uma reconstrução das condições dos corpos d'água na época de cada estudo, através da modelagem. A exemplo do que foi feito por Bojinski *et al* (2003), o estabelecimento de uma base de dados espectrais da região traria grande avanço para o conhecimento e monitoramento de sua situação trófica.

Referente à proposta de monitoramento do estado trófico, Rudorff *et al* (2005) já colocaram que o ambiente mais difícil de ser estudado por meio de sensoriamento remoto é o aquático, em função da grande variedade de constituintes ópticos que influenciam a sua resposta espectral. Segundo estes autores, há três questões principais a serem respondidas pelos pesquisadores: quais os constituintes da água que controlam as variações espectrais? Quais as concentrações e faixas espectrais passíveis de detecção? Quais os principais fatores ambientais que afetam os padrões observados? Isso vem reforçar a necessidade de um extensivo trabalho de campo para embasar estudos utilizando sensoriamento remoto.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

1. As condições climáticas regionais constituem fator limitante externo atmosférico; a alta nebulosidade acarreta na impossibilidade de utilizar várias imagens.

2. A alta dinâmica dos sistemas límnicos gera a necessidade de uma base maior de dados, para análises com maior comparabilidade.

3. O material em suspensão é parâmetro-chave das características ópticas estando relacionado ao metabolismo, mas não à produtividade primária. Esta característica opticamente majoritária pode mascarar as feições espectrais produzidas pelo fitoplâncton.

4. Foi possível utilizar a reflectância de imagens de datas não concomitantes com a data da coleta, após o processo de normalização, para estimar faixas valores prováveis de turbidez.

5. Uso da reflectância para avaliação do estado trófico apresentou forte limitação devido à baixa resolução espectral dos sensores, que não permitiu identificar feições correlatas à concentração de clorofila-a obtida *in situ*.

### **Perspectiva de monitoramento:**

Sensoriamento remoto apresenta potencial para monitoramento do estado trófico, segundo vasta bibliografia, mas deve-se buscar resolução espectral adequada às características específicas desta área de estudo.

**REFERÊNCIAS**

ALVAREZ-COBELAS, Miguel, BALTANÁS, Angel, VELASCO, José Luís & ROJO, Carmem. Daily variations in the optical properties of a small lake. Freshwater Biology, 47, 1051 – 1063. 2002.

ANKCORN, P. D. Clarifying turbidity – the potential and limitations of turbidity as a surrogate for water quality monitoring. Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference. University of Georgia. Kathryn J. Hatcher, editor, Institute of Ecology, The University of Georgia, Athens, Georgia. 2003.

BABAN, S. M. J. Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U. K. using Landsat imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, 7: 1247 – 1267. 1993.

BABAN, S. M. J. Mapping turbidity, surface temperature and water circulation patterns with the aid of satellite imagery. J. IWEM, abr – 8: 197/204. 1994.

BABAN, S. M. J. Use of remote sensing and geographical information systems in developing lake management strategies. Hydrobiologia. 395/396: 211 – 226. 1999.

BARBOSA, Cláudio C. F.; NOVO, Evlyn M. L. de M.; CARVALHO, João C.; PEREIRA FILHO, Waterloo & MANTOVANI, José Eduardo. Caracterização espectral das massas d'água amazônicas. Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil: INPE, p. 2419 - 2425. 2003.

BOJINSKI, Stephan; SCHAEPMAN, Michael; SCHLÄPFER, Daniel & ITTEN, Klaus. SPECCHIO: a spectrum database for remote sensing applications. Computers & Geosciences. 29: 27 – 38. 2003.

BRAGA, C. Z. F. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da concentração de clorofila-a, transparência e profundidade da água na lagoa de Araruama, RJ. Tese (doutorado em Geociências). São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.

BROHEDE, Samuel. Optical Remote Sensing of the middle atmosphere from satellites. Tese de doutorado. Suécia, Göteborg: Chalmers University of Technology. 2004.

BUKATA, R. P.; BRUTON, J. E.; JEROME, J. H.; JAIN, S. C. & ZWICK, H. H. Optical water quality model of Lake Ontario. 1. Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in Lake Ontario. Applied Optics, v. 20, n. 9, May 1:1696-1703. 1981.

BUKATA, R. P.; BRUTON, J. E.; JEROME, J. H.; JAIN, S. C. & ZWICK, H. H. Optical water quality model of Lake Ontario. 2. Determination of chlorophyll-a and suspended mineral concentrations of natural waters from submersible and low altitude optical sensors. Applied Optics, v. 20, n. 9, May 1:1704-1714. 1981.

BUKATA, R. P.; JEROME, J. H.; KONDRATYEV, K. Y.; POZDNYAKOV, D. V.; KOTYHOV, A. A. Modeling the radiometric color of inland waters: implications to a) Remote sensing and b) limnological color scales. Journal of Great Lakes Research. 23 (3): 254-269. 1997.

CARLSON, R. E. A Trophic State Index for lakes. Limnology and Oceanography. 22:361 – 369. 1977.

CHAVEZ Jr., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, v. 24, p. 459-479, 1988.

COSTA, M. P. de O. Estimativa de clorofila-a em água costeira utilizando dados do sensor TM/Landsat. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.

CRIST, E. P., LAURIN, R., & CICONE, R. C. Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data. In Proceedings of IGARSS' 86 Symposium, 1465-70. Paris: European Space Agency. 1986.

CURRAN, P. J. & NOVO, E. M. M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. Journal of Coastal Research. 4, 3: 351 – 368. 1988.

DEKKER, A. G.; MALTHUS, T. J.; WIJNEM, M. M. & SEYHAN, E. Remote sensing as a tool for assessing water quality in Loosdrecht lakes. Hydrobiologia (Historical Archive). V. 233, Numbers 1-3. May: 137 – 159. 1992.

DELANEY, P. J. V. Considerações sobre a fisiografia e a geologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Escola Geol. Porto Alegre, Avulso (2): 7, 31. 1962.

DEWIDAR, Kh. & KHEDR, A. Water quality assessment with simultaneous Landsat - 5 TM at Manzala Lagoon, Egypt. Hydrobiologia, 457: 49 – 58, 2001.

DILLENBURG, S. R.; ESTEVES, L. S. & TOMAZELLI, L. J. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências. 76 (3): 611-623. 2004.

DILLENBURG, S. R.; TOMAZELLI, L. J.; MARTINS, L. R. & BARBOZA, E. G. Modificações de longo período da linha de costa das barreiras costeiras do Rio Grande do Sul. GRAVEL. 3: 9 – 14. Novembro – 2005.

DILLON, P. J. & RIGLER, F. H. The phosphorus - chlorophyll relationship in lakes. Limnology and Oceanography. V. 19 (5). sep 1974.

EASTMAN, J.R. Idrisi for Windows. Manual do Usuário: introdução e exercícios tutoriais. Porto Alegre: UFRGS - Centro de Recursos Idrisi, 1998. 235 p.

EKSTRAND, S. Landsat TM based quantification of chlorophyll-a during algae blooms in coastal waters. International Journal of Remote Sensing. Vol. 13, n. 10. 1913 – 1926. 1992.

FERRARI, Giovanni M.; HOEPFFNER, Nicolas & MINGAZZINI, Marina. Optical properties of the water in a deltaic environment: prospective tool to analyze satellite data in turbid waters. Remote Sensing of Environment. 58. 1996.

FILHO, W. P.; BARBOSA, C. C. F. & NOVO, E. M. L. de M. Influência nas condições do tempo em espectros de reflectância da água. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil: INPE, p. 415 - 422. 2005.

FORSBERG, C. & RYDING, S.O. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish wastereceiving lakes. Arch. Hydrobiol. **89**, 189–207. 1980.

FREITAS, S. M. F. de. Distribuição espaço-temporal da comunidade de macroinvertebrados bentônicos associados ao sedimento e uso na interpretação da qualidade das águas das lagoas Marcelino, Peixoto e Pinguela, lagoas costeiras da Bacia do Rio Tramandaí, Osório, Rio Grande do Sul, Brasil. Dissertação. (Mestrado em Ecologia) Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

FROIDEFOND, Jean-Marie; GARDEL, L.; GUIRAL, D.; PARRA, M. & TERNON, Jean-François. Spectral remote sensing reflectance of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence. Remote Sensing of Environment, 80: 225 – 232. 2002.

GLERIANI, José Marinaldo; ANTUNES, Mauro Antonio Homem & EPIPHANIO, José Carlos Neves. Coeficientes da transformação espectral Tasseled Cap para uma cena com predomínio de Latossolo roxo. Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil: INPE, p. 101-107. 2003.

GUASSELLI, Laurindo Antônio. Avaliação do comportamento espectral de lagoas do litoral norte / RS em relação a alguns parâmetros limnológicos. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

GÜNTZEL, A. Estrutura e variações espaço-temporais da comunidade zooplanctônica da lagoa Caconde, Osório, RS. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995.

HAAS, S. Variação sazonal da biomassa, composição química e aspectos da dinâmica populacional da *Scirpus californicus* (C. A. Meyer) Steud. na margem nordeste da Lagoa

Caconde, Osório, RS. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1994.

HAKVOORT, Hans; HAAN, Johan de; JORDANS, Rob; PETERS, Steef & RIJKEBOER, Machteld. Towards airborne remote sensing of water quality in The Netherlands – validation and error analysis. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 57 – 2002. 171 – 183.

HARRINGTON, J. A. & SCHIEBE, E, F. R. Remote sensing of Lake Chicot, Arkansas: monitoring suspended sediments, turbidity, and Secchi depth with Landsat MSS data. Remote Sensing of Environment, 39: 15-27. 1992.

HARTZ, S. M. Alimentação e estrutura da comunidade de peixes da lagoa Caconde, litoral norte do RS, Brasil. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais). Centro de Ciências Biológicas e da Saúde - Universidade Federal de São Carlos. 1997.

HASENACK, H. & FERRARO, L. W. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Pesquisas. N. 22. p: 53 – 70. 1989.

HEDGER, R. D.; OLSEN, N. R. B.; MALTHUS, T. J. & ATKINSON, P. M. Coupling remote sensing with computational fluid dynamics modeling to estimate lake chlorophyll-a concentration. Remote Sensing of Environment, 79:116 – 122. 2002.

HELLWEGER, F. J.; SCHLOSSER, P.; LALL, U. & WEISSEL, J. K. Use of satellite imagery for water qualities studies in New York Harbor. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 61: 437 – 448. 2004.

ISLAM, Mohammad Rezwanul; BEGUM, Syeda Fahliza; YAMAGUCHI, Yasushi & OGAWA, Katsuro. Distribution of suspended sediment in the coastal sea of the Ganges – Brahmaputra River mouth: observation from TM data. Journal of Marine Systems. 32. 307 – 321. 2002.

JONES, R. Anne; RAST, Walter & LEE, Frech. Relationship between summer mean and maximum chlorophyll-a concentrations in lakes. Environmental Science and Technology, vol 13. n 7. 1979.

KAUTH, R. J. & THOMAS, G. S. The Tasseled Cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat, Proceedings of Symposium Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, Indiana. 1976, 4B41-4B51.

KISHINO, Motoaki; TANAKA, Akihiko & ISHIZAKA, Joji. Retrieval of chlorophyll *a*, suspended solids, and colored dissolved organic matter in Tokyo Bay using ASTER data. Remote Sensing of Environment. 2005 - Vol. 99. 67 – 74.

KLOIBER, Steven M.; BREZONICK, Patrick L.; OLMANSON, Leif G.; BAUER, Marvin E. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. Remote Sensing of Environment. 82:38–47. 2002.

KONDRATYEV, K. Y.; Bobylev, L. P.; Pozdnyakov, D. V.; Melentyev, V. V.; Naumenko, M. A.; Mokievsky, K. A.; Korotkerich, O. E.; Zaitsev, L. V.; Karetnikov, S. G.; Beletsky, D. V. & Litvinenko, A. V. Combined application of remote sensing and *in situ* measurements in monitoring environmental processes. Hydrobiologia, 322: 227 – 232, 1996.

KONRATH, J. Flutuação temporal da taxa de fixação de carbono particulado, estrutura do fitoplâncton e fatores ambientais em uma lagoa costeira eutrófica (Lagoa Caconde, Osório, RS). Dissertação (Mestrado em Ecologia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimater. In: Köppen, w. & Geiger, R.,; Handbuch der Klimatologie. Bd. 1, Teil C. Berlin. 1936. In: LANZER, R. M. Interpretação da distribuição e ocorrência de moluscos dulceaquícolas nas lagoas costeiras da região sul do Brasil. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1983.

LANZER, R. M. Interpretação da distribuição e ocorrência de moluscos dulceaquícolas nas lagoas costeiras da região sul do Brasil. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1983.

LATHROP, R G. J. R; LILLESAND, T. M. Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and central Lake Michigan. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 52:671-680. 1986.

LEITE, F. P. Parâmetros ambientais e índices de qualidade da água como forma de avaliação ecológica Caconde, Osório, RS. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1994.

LEITE, F. P. & FONSECA, O. J. M. Aplicação de índices de qualidade das águas na lagoa Caconde, Osório, RS. In: Marques, D. da M. (org.) I Seminário de qualidade de águas continentais no Mercosul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. p. 249 – 260.

LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc. Second Edition. New York. 1987.

MACHADO, N. A. F. Sedimentologia da lagoa Caconde, Osório, RS. Porto Alegre: Centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 35p. Relatório Técnico.

MOREIRA, M. A. Fundamentos de Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação. Universidade Federal de Viçosa, 2. ed. 2003.

NOVO, E. M. L. de M. Sensoriamento Remoto. Princípios e Aplicações. Editora Edgard Blucher Ltda. APDR. 2a edição. São José dos Campos. 1995.

NOVO, E. M. L. de M. Sensoriamento Remoto aplicado à Ecologia. In: Roland, F.; César, D. & Marinho, M. (Org.). Lições de Limnologia. São Carlos: RiMa. 2005.

OLIVEIRA, M. E. A. de. Lagoa dos Barros: aspectos da sua poluição e tipologia limnológica. Dissertação. (Mestrado em Ecologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 1983.

PEDROZO, C. da S. Avaliação da qualidade ambiental das lagoas da planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil, com ênfase na comunidade zooplancônica. Tese (Doutorado

em Ecologia e Recursos Naturais). Centro de Ciências Biológicas e da Saúde - Universidade Federal de São Carlos. 2000.

POZDNYAKOV, Dmitry; SHUCHMAN, Robert; KOROSOV, Anton; HATT, Charles. Operational algorithm for the retrieval of water quality in the Great Lakes. Remote Sensing of Environment. 97 – 2005. 352 – 370.

REIS, R. S.; NOVO, E. M. L. de M.; ESPÍNDOLA, E. L. G. & SEVERI, W. Uso de imagens Landsat e dados de campo para avaliar a distribuição espacial de material em suspensão em reservatórios do semi-árido brasileiro. Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil: INPE, p. 2569 - 2577. 2003.

ROCHA, César Henrique Barra. Sensoriamento Remoto. In: Geoprocessamento Tecnologia transdisciplinar, Juiz de Fora – MG, 2ª Edição, pp. 120-121. 2002.

ROCHA, P. C. B. Zonação da margem e distribuição de macrófitas auáticas na lagoa Caconde, Osório, RS. Monografia (Bacharelado em Ciências Biológicas – ênfase em Ecologia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1996.

RODRIGUES, G. G. & WÜRDIG, N. L. Estudo da macrofauna de invertebrados bênticos de uma lagoa da planície costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. Anais do 3º Congresso de Ecologia do Brasil. Brasília, Brasil: 1996. p. 404.

RUDORFF, C. de M.; ARRAUT, E. M.; BARBOSA, C. C. F.; CARVALHO, J. C.; FILHO, W. P.; NOVO, E. M. L. de M. Avaliação de algoritmos bio-óticos em massas d'água amazônicas. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil: INPE, p. 431-438. 2005.

RUDORFF, Conrado de Moraes. Estudo da composição das águas da Planície Amazônica por meio de dados de sensor Hyperion/EO-1 e de reflectância de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

SASS, G. Z.; CREED, I. F.; BAYLEY, S. E. & DEVITO, K. J. Understanding variation in trophic status of lakes on the Boreal Plain: a 20 year retrospective using Landsat TM imagery. Remote Sensing of Environment (2007), doi:10.1016/j.rse.2006.12.010 (Article in press).

SCHÄFER, Alois. Fundamentos de Ecologia e Biogeografia das Águas Continentais. Editora da Universidade - UFRGS – GTZ. Porto Alegre. 1985.

SCHÄFER, A. System Characteristics and Ecological Classification of Subtropical Coastal Lakes in South Brazil. In: ERDELEN, W; ISHWARAN, N; MÜLLER, P. (Eds.) Proceedings of the International and Interdisciplinary Symposium Tropical Ecosystems. Saarbrücken, Alemanha, 1989. P. 11 a 21.

SCHÄFER, Alois. Die Küstenseen Südbrasilens. Ein Beitrag zur biogeographischen Raumanalyse der Restinga. Franz Steiner Verlag. Stuttgart. 1992.

SCHRÖDER, R. Relevant parameters to define the trophic state of lakes. Arch. Hydrobiol. Stuttgart, 121 – 4:463 – 472. 1991.

SCHWAZRBOLD, A. Influência da morfologia no balanço de substâncias e na distribuição de macrófitos aquáticos nas lagoas costeiras d Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 1982.

SCHWARZBOLD, Albano & SCHÄFER, Alois. Gênese e morfologia das Lagoas Costeiras do Rio Grande do Sul. Amazoniana. IX – 1:87 – 104. 1984.

SCHWAZRBOLD, A.; CARDOSO, L. S.; LAYBAUER, L.; BAGER, A.; MIRANDA, A. L.; RIETH, D. B.; SPANEMBERG, G.; SCHIFINO, L. C.; ZANCAN FILHO, L. C.; RODRIGUES, S. C. & GUECHEVA, T. N. Caracterização limnológica preliminar da Lagoa Fortaleza – uma lagoa costeira do Rio Grande do Sul. Anais do 3º Congresso de Ecologia do Brasil. Brasília, Brasil: 1996. p. 388.

SCHWAZRBOLD, A.; FONSECA, O. J. M.; HARTZ, S. M.; MACHADO, N. A.F.; FIALHO, C. B.; BECKER, F.; GÜNTZEL, A.; HAAS, S.; KONRATH, J.; LEITE, F.;

ROCHA, P. C. B.; RODRIGUES, G.; SCHIFINO, L. & TEDESCO, C. Limnologia da Lagoa Caconde, litoral norte do estado do Rio Grande do Sul, BR. Anais do 3º Congresso de Ecologia do Brasil. Brasília, Brasil: 1996. p. 389.

SILVA, Patrícia Guedes da; GRAÇA, ALENCASTRO Paulo Maurício de; SANTOS, João Roberto dos & SHIMABUKURO, Yosio Edemir. Avaliação da correção atmosférica e retificação radiométrica em estudos multitemporais. Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte, Brasil: INPE, p. 2135 - 2142. 2003.

SILVA, Brenner Stefan Gomes & VALERIANO, D. M. Correção atmosférica e topográfica de imagens de satélite em terrenos montanhosos. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, Brasil: INPE. p. 3587-3597. 2005.

TEDESCO, C. D. Variação espacial e sazonal de microalgas perifíticas em substrato artificial na margem nordeste da lagoa Caconde, Osório, RS. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995.

THIEMANN, Sabine & KAUFMANN, Hermann. Determination of Chlorophyll Content and Trophic State of Lakes Using Field Spectrometer and IRS-1C Satellite Data in the Mecklenburg Lake District, Germany. Remote Sensing of Environment. 73:227–235 2000.

TYLER, John E. The Secchi disc. Limnology and Oceanography. vol 13, n. 1. Jan 1968.

VERMOTE, E.F.; TANRÉ, D., DEUZÉ, J. L., HERMAN, M. & MORCRETE, J.-J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. v. 35, n. 3, p. 675– 686, 1997. 781 pp.

WANG, X. J. & MA, T. Application of Remote Sensing techniques in monitoring and assessing the water quality of Taihu Lake. Bulletin of environmental Contamination and Toxicology. 67:893 – 870. 2001.

WETZEL, R.G. Limnology. Second Edition. Saunders College Publishing. 860 pp. 1983.

WOODRUFF, Dana L.; STUMPF, Richard P.; SCOPE, Julie A. & PAERL, Hans W. Remote estimation of water clarity in optically complex estuarine waters. Remote Sensing of Environment. 68. 1999.

XIAO, Xiangming; ZHANG, Qingyuan; BRASWEL, Bobby; URBANSKI, Shawn; BOLES, Stephen; WOSJY, Steven; MOORE III, Berrien & OJIMA, Dennis. Modelling gross primary of temperature deciduos broadleaf forest using satellite images and climate data. Remote Sensing of Environment, 91. 256 – 270. 2004.

ZAGATTO, P. A.; LORENZETTI, M. L.; LAMPARELLI, M. C.; SALVADOR, M. E. P.; MENEGON Jr, N. & BERTOLETTI, E. Aperfeiçoamento de um índice de qualidade de águas. Acta Limnologica Brasiliensia. Vol 11 (2) – 111 a 126, 1999.

ZHANG, Y.; KOPONEN, S. S.; PULLIAINEM, J. T. & HALLIKAINEM, M. T. Application of empirical neural networks to chlorophyll-a estimation in coastal waters using remote optosensores. IEEE Sensors Journal, Vol. 3, No. 4, Ago 2003.

ZULLO JÚNIOR, Jurandir. Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.

Anexo 1. Programa em linguagem LEGAL do Spring usado para conversão em reflectância:

```

Reflete_CCD
{
Imagem Im1, Im2, Im3, Im4, Im5 ("CBERS");
Image Im11, Im12, Im13, Im14, Im15 ("Reflectancia");
Digital Im6, Im7, Im8, Im9, Im10 ("Grade");

Im1=Recupere (Nome="CB1");
Im2=Recupere (Nome="CB2");
Im3=Recupere (Nome="CB3");
Im4=Recupere (Nome="CB4");
Im5=Recupere (Nome="CB5");

Im6=Novo (Nome="CB1_apa_gr", ResX=20, ResY=20, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im7=Novo (Nome="CB2_apa_gr", ResX=20, ResY=20, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im8=Novo (Nome="CB3_apa_gr", ResX=20, ResY=20, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im9=Novo (Nome="CB4_apa_gr", ResX=20, ResY=20, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im10=Novo (Nome="CB5_apa_gr", ResX=20, ResY=20, Escala=50000, Min=0, Max=255);

Im11=Novo (Nome="CB1_apa", ResX=20, ResY=20, Nbits=8);
Im12=Novo (Nome="CB2_apa", ResX=20, ResY=20, Nbits=8);
Im13=Novo (Nome="CB3_apa", ResX=20, ResY=20, Nbits=8);
Im14=Novo (Nome="CB4_apa", ResX=20, ResY=20, Nbits=8);
Im15=Novo (Nome="CB5_apa", ResX=20, ResY=20, Nbits=8);

elev=62.0033/57.2957795130;
zen=90/57.2957795130 - elev;
pi=3.141592654;
dist=1;

Cc1=1.009;
Cc2=1.930;
Cc3=1.154;
Cc4=2.127;
Cc5=1.483;

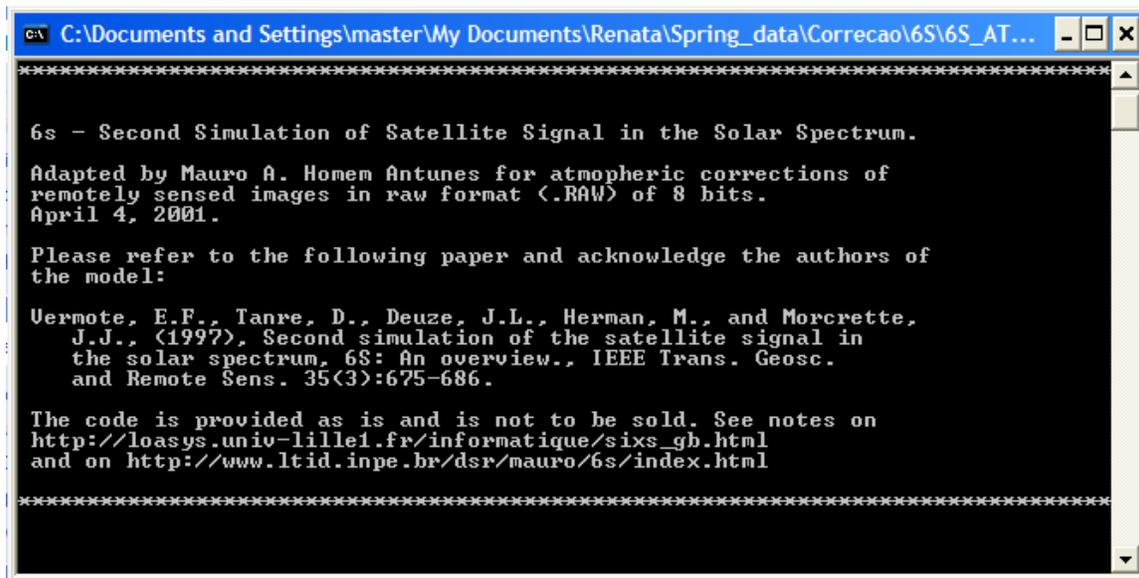
esun1=1934.03;
esun2=1787.10;
esun3=1548.97;
esun4=1069.21;
esun5=1664.33;

Im6= ((pi*(Digital(Im1/Cc1))*dist^2)/(esun1*cos(zen)))*255;
Im6= Im6 <= 0 ? 0 : Im6;
Im11= Imagem (Im6);
Im7= ((pi*(Digital(Im2/Cc2))*dist^2)/(esun2*cos(zen)))*255;
Im7= Im8 <= 0 ? 0 : Im7;

```

```
Im12= Imagem (Im8);
Im8= ((pi*(Digital(Im3/Cc3))*dist^2)/(esun3*cos(zen)))*255;
Im8= Im8 <= 0 ? 0 : Im8;
Im13= Imagem (Im8);
Im9=((pi*(Digital(Im4/Cc4))*dist^2)/(esun4*cos(zen)))*255;
Im9= Im9 <= 0 ? 0 : Im9;
Im14= Imagem (Im9);
Im10=((pi*(Digital(Im5/Cc5))*dist^2)/(esun5*cos(zen)))*255;
Im10= Im10 <= 0 ? 0 : Im10;
Im15= Imagem (Im10);
}
```

## Anexo 2. Software para aplicação do 6S:



```
C:\Documents and Settings\master\My Documents\Renata\Spring_data\Correcao\6S\6S_AT... - [ ] X
*****

6s - Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum.

Adapted by Mauro A. Homem Antunes for atmospheric corrections of
remotely sensed images in raw format (.RAW) of 8 bits.
April 4, 2001.

Please refer to the following paper and acknowledge the authors of
the model:

Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., and Morcrette,
J.J., (1997), Second simulation of the satellite signal in
the solar spectrum, 6S: An overview., IEEE Trans. Geosc.
and Remote Sens. 35(3):675-686.

The code is provided as is and is not to be sold. See notes on
http://loasys.univ-lille1.fr/informatique/sixs_gb.html
and on http://www.ltid.inpe.br/dsr/mauro/6s/index.html

*****
```