

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

---

**MODELAGEM DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS PARA  
AVALIAÇÃO DE RISCO À DESERTIFICAÇÃO**



**HELIO LEANDRO LOPES**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Lúcia Bezerra Candeias**

**Co-orientador: Dr. Luciano José de Oliveira Accioly**

**Dissertação de Mestrado**

**Recife, 2005**

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

---

**HELIO LEANDRO LOPES**

**MODELAGEM DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS PARA AVALIAÇÃO  
DE RISCO À DESERTIFICAÇÃO**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de Concentração Cartografia e Sistemas de Geoinformação, defendida e aprovada no dia 04/03/2005.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Lúcia Bezerra Candeias**

**Co-orientador: Dr. Luciano José de Oliveira Accioly**

**Recife, 2005**

---

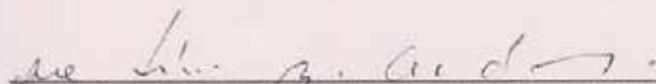
# MODELAGEM DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS PARA AVALIAÇÃO DE RISCO À DESERTIFICAÇÃO

POR

**HÉLIO LEANDRO LOPES**

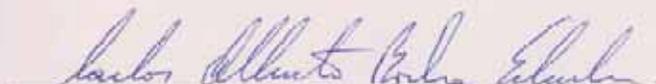
Dissertação defendida e aprovada em 04.03.05.

Banca Examinadora:



**Prof.ª. Dr.ª. ANA LÚCIA BEZERRA CANDEIAS (Orientadora)**

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



**Prof. Dr. CARLOS ALBERTO BORBA SCHULER**

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



**Prof. Dr. JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHÂNIO**

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) - SP

*Aos meus pais, pelos seus estados de estesia, felicidade e amor, transmitidos,  
Como também a educação e cultura ensinadas a mim.  
Também pela afirmação de sempre acreditar nos ideais,  
nunca desistir e de sempre buscar a vitória  
na honestidade e nos sentimentos do bem.*

*Vicente Lopes Rocha e  
Terezinha Oliveira Rocha.*

*Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

Sobretudo a DEUS!

Segue os agradecimentos às pessoas e instituições que colaboraram de forma essencial para o desenvolvimento deste trabalho:

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudo nesse período de estudo.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa.

À Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Cartografia pelos ensinamentos acadêmicos e de vida proporcionados pelos seus professores, funcionários e alunos de graduação e pós-graduação.

Ao CPTEC/INPE pelos dados meteorológicos cedidos.

Ao DISME/Recife pela cooperação de dados meteorológicos.

A minha família pela energia, momentos eternos de alegria, amor e felicidade proporcionados, em quem posso contar em todos os momentos da minha vida.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Lucia Bezerra Candeias, por acreditar nos meus esforços, pelos conhecimentos transmitidos, como também pela orientação, apoio e dedicação na realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador Dr. Luciano José de Oliveira Accidy, pela presteza, dedicação e conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Lázaro Nonato pela sua indicação e fundamental contribuição nesta pesquisa.

Ao Prof. Marconi dos Santos que contribuiu de forma essencial no desenvolver desta pesquisa

Aos professores do DeCart pela dedicação e ensinamentos prestados.

Ao amigo Aginaldo Araújo e Amanda Veloso pela contribuição essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Gominho pela presteza à visita à área de estudo.

A todos os amigos e parentes que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Amigo é algo que o coração nunca esquece. Aos amigos de residência Alberto Luiz, Gustavo Brasileiro e João Kennedy, pelos momentos de alegria, apoio, paciência, confiança e amizade que levarei para sempre.

Aos amigos e amigas de turma Julio Mascarenhas, Pablo Joaquim, Marcello Filho, Luciana Lima, Abdoral Lucas, Almair, Antonio e Jurandir, pelos momentos de diversão e aquisição de conhecimentos.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GEODÉSIA E CARTOGRAFIA</b> .....	<b>5</b>
2.1 A Terra elipsoidal.....	5
2.2 O Sistema geodésico brasileiro.....	7
2.3 Sistema de referência elipsoidal.....	8
2.3.1 Parâmetros Geométricos.....	8
2.3.2 Sistema de Coordenada Elipsoidal (Geodésico).....	8
2.4 A projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) .....	9
<b>3. COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS ALVOS</b> .....	<b>11</b>
3.1 Comportamento espectral da vegetação.....	13
3.2 Comportamento espectral dos solos .....	14
<b>4. DESERTIFICAÇÃO</b> .....	<b>16</b>
4.1 Desertificação no Brasil e no Estado de Pernambuco.....	19
<b>5. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>26</b>
5.1 Seleção da Área de Estudo.....	26
5.2 Localização da Área de Estudo.....	26
5.3 Fisiografia da área de estudo.....	28
5.3.1 Clima.....	28
5.3.2 Geologia .....	30
5.3.3 Relevo.....	32

5.3.4 Solo.....	33
5.3.5 Vegetação.....	35
5.3.6 Aptidão Agrícola .....	37
<b>6. QUANTIFICAÇÃO DE DESERTIFICAÇÃO.....</b>	<b>39</b>
6.1 Indicadores de Desertificação .....	40
6.1.1 Índices de vegetação.....	45
6.1.2 Temperatura e Emissividade .....	48
6.1.3 Albedo.....	50
6.1.4 Fluxo de calor no solo.....	51
6.1.5 Modelos Propostos .....	52
6.2 Tecnologias da Geoinformação Aplicada aos Indicadores da Desertificação .....	53
<b>7. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (EUPS).....</b>	<b>56</b>
7.1 Erodibilidade dos solos .....	56
7.2 Erosividade das Chuvas .....	58
7.3 Fator Topográfico (LS).....	59
7.4 Práticas de Controle de Erosão .....	60
7.5 Uso do Solo .....	61
<b>8. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>62</b>
8.1 Materiais .....	62
8.1.1 Dados Orbitais .....	62
8.1.2 Dados Topográficos.....	63
8.1.3 Modelos Biofísicos .....	63
8.1.4 O modelo EUPS .....	63
8.1.5 Dados Temáticos .....	63
8.1.6 Dados Climáticos .....	64
8.2 Método.....	64
8.2.1 Processamentos Preliminares e implantação de banco de dados .....	64
8.2.2 Cruzamento dos Planos de Informação .....	66
8.3 Modelagem e Inserção de dados de caracterização fisiográfica e biofísica da Bacia do Rio Brígida em planos de informação.....	70
I – Para os dados biofísicos.....	70
a) O Plano de Informação Albedo.....	70

b) O plano de informação NDVI.....	70
c) O plano de informação Emissividade .....	70
d) O plano de informação Temperatura da superfície .....	70
e) O Plano de Informação fluxo de calor no solo.....	70
II – PNE.....	72
a) Plano de informação solos .....	72
b) Plano de informação erodibilidade dos solos .....	72
c) Plano de informação Erosividade .....	72
d) Plano de informação curvas de nível.....	72
e) Plano de informação declividade .....	73
f) Plano de informação Drenagem .....	73
g) Plano de informação LS .....	73
h) O Plano de informação PNE.....	73
III – O Modelo proposto nesta dissertação .....	73
<b>9. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>76</b>
<b>10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICES</b>	
<b>Apêndice 1 – Mapa do Fluxo de Calor no Solo</b>	
<b>Apêndice 2 – Mapa da Temperatura da Superfície</b>	
<b>Apêndice 3 – Mapa do NDVI</b>	
<b>Apêndice 4 – Mapa do Albedo</b>	
<b>Apêndice 5 – Mapa da Emissividade</b>	
<b>Apêndice 6 – Mapa do Risco à Desertificação</b>	
<b>Apêndice 7 – Fotografias da Área de Estudo</b>	
<b>Apêndice 8 – Mapa do Modelo Digital de Elevação da Bacia do Rio Brígida</b>	
<b>Apêndice 9 – Mapas de Erosividade, Erodibilidade, Fator Topográfico e PNE</b>	
<b>Apêndice 10 – Programas em LEGAL</b>	

## RESUMO

**LOPES, Hello Leandro. Modelagem de Parâmetros Biofísicos para Avaliação de Risco à Desertificação.** Recife, 2005. 105 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

A integração de ações sustentáveis conciliando programas sociais, ambientais e econômicos são de vital importância em áreas com risco à desertificação. Esta pesquisa mostra a aplicação de parâmetros biofísicos e potencial de erosão na avaliação de processos degradatórios e identificação destas áreas de risco. É uma abordagem geral e pode ser utilizada em outras áreas. O modelo desenvolvido está baseado nos parâmetros: albedo, emissividade, temperatura, ndvi e fluxo de calor no solo, e erosividade, erodibilidade e LS (declividade e comprimento de rampa) e foi implementado na Linguagem LEGAL (SPRING 4.0 - INPE). Foram utilizadas também, imagens multitemporais dos sensores TM e ETM+ nas épocas de seca e chuva. Em seguida, todos os parâmetros foram calculados e analisados para determinar áreas mais prováveis ao risco de desertificação. A bacia do Rio Brígida em Pernambuco, Brasil, foi a área de estudo escolhida. Nesta bacia encontra-se a região do Araripe, que é conhecida pela exploração do gesso, agricultura de sequeiro, extração de lenha, que acarreta uma sobrecarga nos recursos naturais da Região. Com os resultados obtidos pelo modelo e confirmados em campo, é possível ter visão geral do crescimento, tanto de intensidade, quanto de avanço no grau de risco à desertificação. Finalmente, sugere-se, em trabalhos futuros, o estudo da interligação do modelo com o estado físico, químico e biológico, principalmente com o carbono que rege o equilíbrio do solo.

**Palavras-chave:** degradação, sensoriamento remoto, parâmetros biofísicos, potencial natural de erosão.

## **ABSTRACT**

The integration of sustainable actions reconciling social, environmental and economical programs are of vital importance in areas with risk of desertification. This research shows the application of biophysical parameters and erosion potential in the evaluation of degrading processes and identification of areas at risk of desertification. It is a general approach and it can be used in other areas. The developed model is based on the parameters: albedo, emissivity, temperature, ndvi, soil heat flux, erosivity, erodibility and LS(slope and slope length) and was implemented in the LEGAL Language (SPRING 4.0 - INPE). It was also used, multitemporal images of TM and ETM+ sensors in the drought and rain seasons. The whose set of parameters wore used as input to model to determine the more probable areas at risk of desertification. The selected area was the Brígida river basin at Pernambuco State, Brazil. This basin is wellknow by the exploration of gypsum which is processed using in many cases firewood as a source of energy. Thus, gypsum and firewood extraction together with the slash and burn of natural vegetation for agricultural purposes results in an overload of natural resources of this area. With the results obtained by the model, it is possible to have a general vision of the degradation growth, and the intensity, as of the progress in the risk degree. Finally, it is suggested, in a future research, the study of the interconnection of the model with the physical, chemical and biological state, mainly with the carbon that governs the balance of the soil.

**Keywords:** degradation, remote sensing, biophysical parameters, natural potential of erosion.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1:	Elipse Meridiana.	8
Figura 2:	Sistema Coordenadas Elipsoidal.	9
Figura 3:	Zona UTM 24, abrangendo a região entre as latitudes 36° W e 42° W, onde se encontra a área de estudo.	10
Figura 4:	Comportamento espectral dos alvos e posição das bandas espectrais.	12
Figura 5:	Elementos da fase de aquisição e interações da energia na atmosfera e sobre a superfície.	12
Figura 6:	Curva de reflectância típica de uma folha verde.	13
Figura 7:	Espectros de reflectância representativos de horizonte superficial de solos: (a) forma dominada pela matéria orgânica; (b) forma minimamente alterada; (c) forma alterada pelo ferro; (d) forma afetada pela matéria orgânica; (e) forma dominada pelo ferro.	15
Figura 8:	Desertificação no Semi-árido.	22
Figura 9:	Desertificação no Brasil.	23
Figura 10:	Mapa de susceptibilidade à desertificação do Estado de Pernambuco. Divisão Municipal.	24
Figura 11:	Mapa de ocorrência de desertificação e problemas ambientais do Estado de Pernambuco. Divisão Municipal.	25
Figura 12:	Fotos da área de estudo. (a) Mineradora no município de Araripina. (b) Área desmatada entre os municípios de Ouricuri e Parnamirim.	26
Figura 13:	Localização da área de estudo.	28
Figura 14:	Tipos climáticos para mesorregião do Sertão Pernambucano.	29
Figura 15:	Distribuição da precipitação média anual da Bacia do Brígida gerado no SPRING.	30
Figura 16:	Tipos de formação geológica.	31
Figura 17:	Unidades geoambientais.	32
Figura 18:	Esboço do relevo da bacia do Brígida.	32
Figura 19:	Esboço dos solos da mesorregião do Sertão Pernambucano.	33
Figura 20:	Mapa de solos da Bacia do Brígida.	34
Figura 21:	Vegetação da mesorregião do Sertão Pernambucano.	36
Figura 22:	Característica da Vegetação. Caatinga hipoxerófila perenifólia na Chapada do Araripe (a) e hiperxerófila caducifólia no município de Parnamirim (b).	37
Figura 23:	Esboço da Aptidão Agrícola da mesorregião do Sertão Pernambucano.	37
Figura 24:	Aptidão Agroecológica para a Bacia do Rio Brígida.	38

Figura 25:	Fluxograma dos processos da desertificação.	55
Figura 26:	Mapa da distribuição dos postos pluviométricos para a bacia do Rio Brígida.	64
Figura 27:	Dados orbitais para registro e mosaicagem.	65
Figura 28:	Mosaico das duas cenas 217/65 e 217/66 de 1987 e 2001.	65
Figura 29:	Recorte da imagem no formato da bacia (a)1985 e (b)2003.	66
Figura 30:	Fluxograma metodológico.	69
Figura 31:	Histograma da distribuição do fluxo de calor no solo para os anos de 1985, 1987, 2001 e 2003.	76
Figura 32:	Soma da precipitação para os quatro meses antes da tomada da imagem para o município de Ouricuri.	77
Figura 33:	Soma da precipitação para os quatro meses antes da tomada da imagem para o município de Cabrobó.	77
Figura 34:	Soma da precipitação para os quatro meses antes da tomada da imagem para o município de Araripina.	78
Figura 35:	Histograma da distribuição da temperatura da superfície para os anos de 1985, 1987, 2001 e 2003 na bacia do rio Brígida.	79
Figura 36:	Histogramas para a distribuição dos valores do NDVI para as quatro imagens analisadas.	81
Figura 37:	Histogramas para a distribuição dos valores do albedo para as quatro imagens analisadas.	83
Figura 38:	Histogramas para a distribuição dos valores da emissividade para as quatro imagens analisadas.	85
Figura 39:	Histogramas para a distribuição dos valores do risco à desertificação para as quatro imagens analisadas.	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Parâmetros elipsoidais.	6
Tabela 2:	Sistemas de Referência Geodésicos.	6
Tabela 3:	Clima e Índice de Aridez.	16
Tabela 4:	Classes de suscetibilidade à desertificação.	17
Tabela 5:	Dados dos Municípios pertencentes à Bacia do Rio da Brígida.	27
Tabela 6:	Nomenclatura das cartas topográficas na escala 1:100.000.	27
Tabela 7:	Classes de solos para a bacia do Brígida.	35
Tabela 8:	Indicadores de desertificação utilizados por quatro autores.	42
Tabela 9:	Área afetada pela desertificação segundo três autores.	43
Tabela 10:	Indicadores de desertificação definidos durante a reunião coordenada pelo IICA, em fevereiro de 2003.	43
Tabela 11:	Variação nos índices de vegetação em relação ao ruído do solo.	46
Tabela 12:	Classes de valores de erodibilidade do solo.	58
Tabela 13:	Erosividade para o Nordeste do Brasil.	59
Tabela 14:	Dados orbitais.	62
Tabela 15:	Banco de dados georreferenciados da bacia do rio Brígida.	67
Tabela 16:	Ponderação do Potencial Natural de Erosão.	74
Tabela 17:	Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para o fluxo de calor no solo.	78
Tabela 18:	Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para a temperatura da superfície.	80
Tabela 19:	Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para o NDVI.	82
Tabela 20:	Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e media do albedo.	84
Tabela 21:	Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para a emissividade.	86
Tabela 22:	Medidas de classes para a erodibilidade.	87
Tabela 23:	Intervalos do potencial natural de erosão e áreas.	87
Tabela 24:	Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para o risco à desertificação.	89
Tabela 25:	Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1985 e 2001 (seca).	90
Tabela 26:	Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1987 e 2003.	90
Tabela 27:	Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1985 e 1987.	91

Tabela 28:	Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1987 e 2001.	91
Tabela 29:	Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1987 e 2001.	92
Tabela 30:	Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 2001 e 2003.	92

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABES	Algoritmo para Balanço da Energia da Superfície
AUMs	<i>Animal Unit Months</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DISME	Distrito Regional de Meteorologia
DW	Peso Seco
EFEDA	<i>European Field Experiment in a Desertification threatened Area</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUPS	Equação Universal de Perdas de Solo
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
GINI	Grau de Desigualdade Existente na Distribuição de Individuo segundo a Renda Domiciliar per capita.
GP	<i>Grazing Pressure</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV	Índice de Vegetação
LEGAL	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
IICA	Instituto Interamericano de Cooperação para Agricultura
LST	<i>Land Surface Temperature</i>
MC	Meridiano Central
MSAVI	<i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i>
NDVI	<i>Normalized difference Vegetation Index</i>
NPP	<i>Net Primary Production</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Precipitação
PAI	Índice de Área de Planta
PIs	Planos de Informação
PNE	Potencial Natural de Erosão
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PSDI	<i>Palmer Severity Drought Index</i>
PVI	<i>Perpendicular Vegetation Index</i>
SAD-69	<i>South America Datum</i>
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>
SECTMA	Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente

SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPRING	Software para Processamento de Imagem
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SUS	Sistema Único de Saúde
SWT	<i>Split Window Technique</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UTM	Universal Transversa de Mercator
WDVI	<i>Weighted Difference Vegetation Index</i>
WI	<i>Weedy Invasive Vegetation</i>
ZAPE	Zoneamento de Pernambuco

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos várias definições de desertificação foram propostas. O conceito mais comum relaciona desertificação não somente com mudanças relacionadas com o clima, mas também com alterações induzidas pelo homem, e especialmente aquelas associadas com o uso inapropriado do solo, agricultura intensificada e consumo de madeira (IBRAHIM, 1978; HELLDÉN, 1991) citado por COLLADO *et al.* (2002).

A desertificação é resultado da interação entre processos complexos que varia de área para área. Durante décadas passadas o papel de técnicas espaciais no monitoramento e mapeamento tem sido examinados por muitos pesquisadores. As imagens de satélites em conjunto com as bases de dados locais e mapas têm sido usados para examinar a natureza, tendência e quantificação do processo de desertificação em diferentes ambientes. O delineamento e o mapeamento de áreas afetadas são realizados para estabelecer uma base confiável para o monitoramento do processo de desertificação e envolve estratégias adequadas para combatê-lo.

O registro da magnitude e tendência da desertificação há anos atrás tem dependido principalmente do uso de mapas de pesquisas antigas, relatórios de campo e fotografias aéreas, que, no entanto são raramente disponíveis. Estes esforços são freqüentemente dificultados devido à larga área envolvida, sua inacessibilidade, tempo e custo elevado.

Um plano de manejo integrado dos recursos requer o estabelecimento de base de dados confiáveis para o monitoramento contínuo de um curto e longo período de mudanças da superfície para o combate do problema. Para a tomada de decisão é necessário dispor de parâmetros de forma a indicar o estado atual do ecossistema ou a proporção da degradação.

Carvalho *et al.* (2001) relata que apesar de numerosos estudos realizados sobre o processo de desertificação, a sua compreensão é limitada, discutindo-se ainda conceitos e fundamentos básicos, e afirma que continua a busca da natural complementaridade entre ferramentas e conhecimentos multi e interdisciplinares para o desenvolvimento metodológico.

Para se obter dados mais concisos sobre a desertificação, é necessário que pesquisas utilizando análise temporal e detecção de áreas sob risco à desertificação envolvam dados mais precisos sobre os processos físicos relacionados a mudanças na

cobertura da superfície, já que isto provém de mudanças climáticas e processos de intervenção humana no meio ambiente.

Um dos métodos para quantificação, avaliação de risco e monitoramento da desertificação é através de parâmetros biofísicos: albedo, temperatura, emissividade, fluxo de calor no solo, fluxo de calor latente, índices de vegetação, etc. Esta quantificação é dada por meio de imagens orbitais e modulação dos parâmetros em um Sistema de Informação Geográfica, como também avaliação de históricos de precipitação e evapotranspiração.

Os parâmetros biofísicos aqui inseridos estão no modelo ABES (Algoritmo para Balanço da Energia da Superfície), que, segundo BASTIAANSEN (1995), pode servir como base para avaliar níveis de degradação do ambiente como, desertificação e salinização.

Foi desenvolvida neste trabalho uma modelagem para a desertificação. Para a comprovação dos dados foram realizadas duas visitas à área escolhida, para percepção da paisagem e avaliação do modelo. A primeira visita foi realizada em agosto e a outra foi realizada em novembro de 2004. Essas duas visitas serviram para avaliar o estado da paisagem.

Os resultados aqui atingidos mostram um aumento dos parâmetros calculados e no grau de risco à desertificação. O modelo poderá ser avaliado para determinar o estado de desertificação para um dado local.

Necessita-se de uma validação do modelo com o seu ajuste, de acordo com o estado de resiliência do ambiente. Essa validação pode levar em consideração fatores físicos, químicos e biológicos, tendo como principal fator o teor de carbono.

Na validação do modelo poderão ser inseridos outros parâmetros como a rugosidade da superfície, fluxo de calor latente, fração evaporativa, entre outros, como também, retirar alguns.

Para a sua elaboração esse trabalho foi dividido em 5 fases. Na primeira, realizou-se a coleta de dados temáticos (solos), numéricos (altimetria e dados pluviométricos) e análise dos modelos; os dados de altimetria foram digitalizados (12 cartas na escala 1:100000) e solos editados no Software SPRING do INPE, para a caracterização pedológica e altimétrica da bacia do rio Brígida, para a formação dos Planos de Informações (PIs) e para a definição do esquema conceitual. Foi realizada, também, uma revisão sobre os temas necessários ao desenvolvimento deste trabalho. Na segunda etapa foram realizados o registro, mosaicagem e recorte da imagem no formato da Bacia. Na terceira fase foram elaborados programas em

LEGAL dos modelos estudos (biofísicos). A quarta etapa foi desenvolvida com a inserção dos dados para o cálculo do Potencial Natural de Erosão – PNE, determinado na programação LEGAL. Na quinta fase, foram realizados os cruzamentos entre planos de informações através da LEGAL com o modelo proposto. Na última fase, foram gerados histogramas para percepção do avanço da degradação na Bacia do rio Brígida.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

- Desenvolver metodologia para avaliar o risco à desertificação.

### 1.1.2 Específicos

- Avaliar o estado atual de degradação usando parâmetros biofísicos;
- Validar combinação de dados biofísicos, na detecção do avanço da degradação;
- Aplicar parâmetros biofísicos na detecção e risco à desertificação.
- Analisar o comportamento dos parâmetros biofísicos nos períodos avaliados;
- Determinar o potencial natural de erosão para a inserção no modelo proposto; e
- Formular um modelo baseado nos parâmetros biofísicos e potencial natural de erosão para espacializar o risco à desertificação.

## 1.2 Organização do trabalho

Esta dissertação foi organizada em 9 capítulos:

O Capítulo 1 descreve a introdução da pesquisa.

No Capítulo 2 é abordada a relevância da Geodésia e da Cartografia para o tema proposto.

O Capítulo 3 apresenta um breve relato sobre o comportamento espectral da vegetação e do solo.

Já o Capítulo 4 aborda sobre desertificação, relatando pesquisas realizadas, definições, indicadores, modelos propostos e a desertificação no Brasil e em Pernambuco.

Tem-se um breve resumo sobre a equação de perdas de solos no Capítulo 5.

No Capítulo 6 é apresentado a fisiografia da área de estudo.

Os matérias e métodos são descritos no Capítulo 7.

Os resultados obtidos na pesquisa são mostrados no Capítulo 8 através dos parâmetros aplicados e modelo proposto. Os resultados são apresentados em gráficos tabela e mapas.

E, finalmente, no Capítulo 9, constam as conclusões e recomendações.

## 2. GEODÉSIA E CARTOGRAFIA

A representação temática dos mapas obtidos a partir de imagem de Sensoriamento Remoto necessita da Geodésia e de Cartografia. No caso aqui estudado, especialmente, tem-se a área de uma bacia que se estende do norte ao sul do estado de Pernambuco (bacia do rio Brígida).

Na elaboração do estudo aqui desenvolvido foram utilizadas diversas cartas topográficas (altimetria) e mapas temáticos (solos) em coordenadas UTM – Córrego Alegre, Geográfica – WGS-84 e UTM – SAD-69, sendo necessário transformá-las para um único sistema para a modelagem e cruzamento dos dados. Neste caso utilizamos a projeção UTM e o datum SAD-69.

Para o nosso caso, a área envolvida não pode ser simplificada como uma área plana. É necessário utilizar os conceitos de Geodésia e de Cartografia para trabalharmos como os dados corretamente.

Neste Capítulo é feita uma breve revisão sobre a forma da Terra e a descrição dos parâmetros do primeiro Elipsóide até o Elipsóide de Referência 67 que coincide com o SAD-69 que foi utilizado nesta pesquisa. A projeção adotada para a representação cartográfica neste trabalho foi a UTM – Universal Transversa de Mercator, que, também, é descrita neste capítulo.

### 2.1 A Terra elipsoidal

Para a determinação elipsoidal da Terra foram realizados muitos cálculos. Os cálculos dos comprimentos dos arcos de meridianos mostraram, como resultado, comprimento maior para o sul indicando um formato de elipsóide para a Terra com o eixo de rotação maior que o eixo equatorial.

A Academia Francesa de Ciência enviou expedições ao Peru e a Lapônia para medirem um comprimento de arco de meridiano. As medições provaram que a Terra era achatada nos pólos, segundo previa Newton. O achatamento terrestre foi, então, demonstrado pela primeira vez através de medições geodésicas.

Não havendo mais dúvidas quanto à forma terrestre, os geodestas concentraram seus trabalhos na determinação do “melhor elipsóide”, Acarretando, com isto, um grande número de parâmetros elipsoidais, conforme tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros elipsoidais.

Elipsóides	a(m)	$\alpha$
Everest – 1830	6377304	1/300,8
Bessel - 1841	6377397	1/299,2
Clarke – 1866	6378206	1/295
Clarke – 1880	6378249	1/293,5
Hayford – 1910	6378388	1/297
Krassovskii – 1938	6378245	1/298,3
Hough – 1956	6378270	1/297
Fischer – 1960	6378166	1/298,3
Kaula – 1961	6378165	1/298,3
Fischer – 1968	6378150	1/298,3
Referência - 1967	6378160	1/298,25

Fonte: SANTOS (2001).

A IAG (Associação Internacional de Geodésia) preocupada com a grande quantidade de elipsóides efetuou estudo para a determinação de um elipsóide que pudesse servir como referência e considerou o elipsóide determinado por Hayford como mais bem qualificado devido à grande quantidade de dados inclusive com técnicas de ajustamento, que é conhecido como: Elipsóide Internacional de Hayford (SANTOS, 2001).

No ano de 1967 a UGGI (União Internacional de Geodésia e Geofísica), tendo em vista os trabalhos mais recentes, inclusive os dados fornecidos por satélites, fez nova recomendação: O Elipsóide de Referência 1967 (SANTOS, 2001).

Atualmente, com o desenvolvimento do Posicionamento Global, assume esta importância um sistema único para efeito de determinação de coordenadas, surgindo, desta forma, alguns sistemas de referência geodésicos de elipsóide próprio (Tabela 2).

Tabela 2. Sistemas de Referência Geodésicos.

	GRS 1967	WGS 1973	GRS 1980	WGS 1984
a(m)	6378160	6378135	6378137	6378137
$\alpha$	1/298,24	1/298,267	1/298,257	1/298,2572233
$\omega$	$7292115 \times 10^{-11}$	$72922 \times 10^{-11}$	$722112 \times 10^{-11}$	$7292115 \times 10^{-11}$

Fonte: SANTOS (2001).

## 2.2 O Sistema geodésico brasileiro

O referencial horizontal do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) é definido sob a condição de paralelismo entre o seu sistema de coordenadas cartesianas e o do CTRS. A figura geométrica da Terra é definida pelo Elipsóide de Referência 1967. Nessa definição fica implícito que o semi-eixo menor do elipsóide é paralelo ao de rotação da Terra, e o plano do meridiano de origem é paralelo ao plano meridiano de Greenwich. O referencial altimétrico é materializado pela superfície equipotencial que coincide com o nível médio do mar, definido pelas observações maregráficas tomadas na baía de Imbituba, no litoral de Santa Catarina (MONICO, 2002).

A componente horizontal do SGB atual tem como origem o vértice CHUÁ, e o elipsóide adotado, conforme já citado, é o de Referência 1967, que coincide com a definição do SAD 69. Os parâmetros definidores do elipsóide do SGB são:

- $a$  (semi-eixo maior) = 6378160,0
- $f$  (achatamento) = 1/298,25

Na orientação topocêntrica do elipsóide, adotaram-se as coordenadas geodésicas do vértice CHUÁ, o qual pertence à cadeia de triangulação do paralelo 20° S. Tais coordenadas são:  $\Phi = 19^\circ 45' 41,6527''$  S e  $\lambda = 48^\circ 06' 04,0639''$  W com o azimute de  $\alpha = 271^\circ 30' 04,05''$  SWNE para o vértice Uberaba. A altura do geóide nesse vértice é considerada nula ( $N = 0$ ), enquanto as componentes meridiana e primeiro vertical do desvio da vertical são dadas respectivamente por  $\epsilon = -0,31''$  e  $\eta = 3,59''$ .

A definição e a realização do SAD 69 e do sistema de referência WGS 84 são diferentes. Como as atividades cartográficas no território brasileiro são referenciadas ao SAD 69, algumas soluções devem ser adotadas para que os resultados obtidos com o GPS possam ser utilizados para fins de mapeamento, ou outras atividades que necessitem de informações georreferenciadas (MONICO, 2000).

No georreferenciamento de informações adquiridas na área de estudo (bacia do rio Brígida) foi utilizado GPS, no qual as coordenadas utilizadas são geográficas e o sistema de referência é o WGS 84, com isso foi necessário uma transformação para a projeção UTM e SAD-69.

## 2.3 Sistema de referência elipsoidal

O elipsóide é uma das figuras matemáticas que melhor se ajusta à superfície física da Terra e tem uma geometria simples de manipular e é ideal para trabalhos práticos e de mapeamento (SANTOS, 2001).

O elipsóide de revolução é gerado pela rotação de uma elipse meridiana em torno do seu semi-eixo menor.

### 2.3.1 Parâmetros Geométricos

Na figura 1,  $PP'$  é o eixo menor da elipse e tem comprimento igual a  $2b$ , o eixo maior  $EE'$  de comprimento igual a  $2a$  fornece o equador quando a elipse gera o elipsóide através da sua rotação em torno do semi-eixo menor.

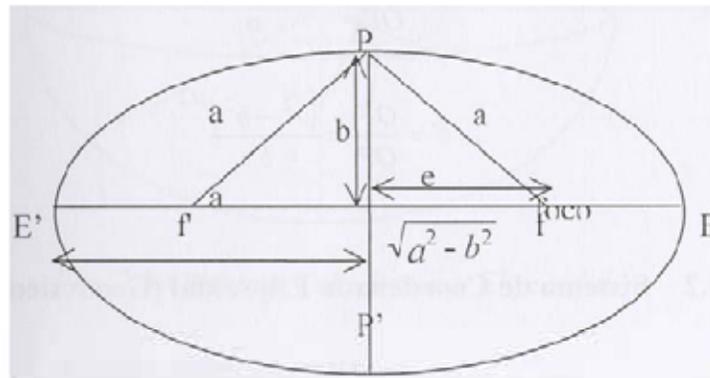


Figura 1. Elipse Meridiana. Fonte: SANTOS (2001).

A elipse fica perfeitamente determinada através de dois parâmetros geométricos: semi-eixo maior ( $a$ ) e o semi-eixo menor ( $b$ ). Segundo SANTOS, 2001, geralmente o semi-eixo menor é substituído por outros entes geométricos, tais como: achatamento, 1ª excentricidade, 2ª excentricidade ou distância focal (excentricidade linear).

### 2.3.2 Sistema de Coordenada Elipsoidal (Geodésico)

O sistema tem a origem no centro do elipsóide, o eixo Z coincide com o semi-eixo menor (figura 2). O plano XY, perpendicular ao eixo Z, fornece o equador. O eixo X é definido pela interseção do meridiano “zero” e o plano do equador, o eixo Y forma um sistema dextrógiro. O sistema de coordenadas polares elipsoidal é definido pela latitude geodésica ( $\Phi$ ) e a longitude geodésica ( $\lambda$ ).

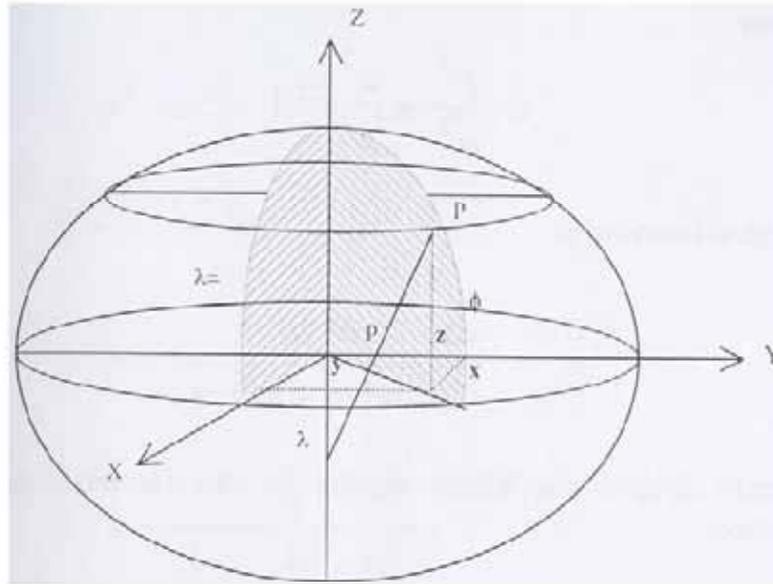


Figura 2. Sistema Coordenadas Elipsoidal. Fonte: SANTOS (2001).

A latitude geodésica é o ângulo formado pela normal ao elipsóide e sua projeção no equador sendo medido no meridiano do ponto P e positivo no hemisfério norte. A longitude geodésica é o ângulo formado pelo meridiano "zero" e o meridiano do ponto, medido no plano do equador contado positivamente a leste.

#### 2.4 A projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)

Esta é a projeção oficial utilizada na Cartografia Brasileira, em que o cilindro envolvente é secante. Isso faz com que o raio do cilindro se torne menor que o raio da esfera. Esta projeção é conforme, o que faz manter a verdadeira forma das áreas a serem representadas. Possui um fracionamento em zonas ou fusos, de maneira a não ultrapassar certos limites aceitáveis de deformação.

A numeração das zonas, iniciando com a zona 1, tem sua origem no meridiano de 180° W (antimeridiano de Geenwich) e prossegue para Leste até chegar à zona 60, que está compreendida entre 174° E e 180° E (60 fusos de 6°). Em latitude, os fusos são limitados aos paralelos de 80° S e 84° N, devido as deformações serem grandes para latitudes acima deste intervalo.

A representação dos resultados atingidos nesta pesquisa foi feita em mapas utilizando a projeção UTM, em que a área de estudo esta localizada no fuso 24 e tem meridiano central de 39°W

Na figura 3, está esquematizado um fuso UTM. Como visto, o meridiano central da região de interesse, o Equador e os meridianos situados a  $90^\circ$  do meridiano central, são representados por retas; os outros meridianos e os paralelos são curvas complexas. Sobre as linhas de secância, a deformação da escala é nula ( $K = 1$ ), sendo negativa entre essas linhas, com maior redução sobre o meridiano central ( $K = 0,9996$ ), e positiva fora dessas linhas, com valor máximo sobre o meridiano limite do fuso ( $K = 1,001$ ).

O sistema linear utilizado pela projeção é em metros, em que os valores são sempre números inteiros. A origem das medidas do reticulado é o cruzamento do Meridiano Central (MC) com o Equador, aos quais foram arbitrados os seguintes valores: para o Meridiano Central, 500.000m, determinando as distâncias em sentido Oeste, para o Equador, 10.000.000m para o hemisfério Sul, e 0m, para o hemisfério Norte, de acordo com a figura 4.

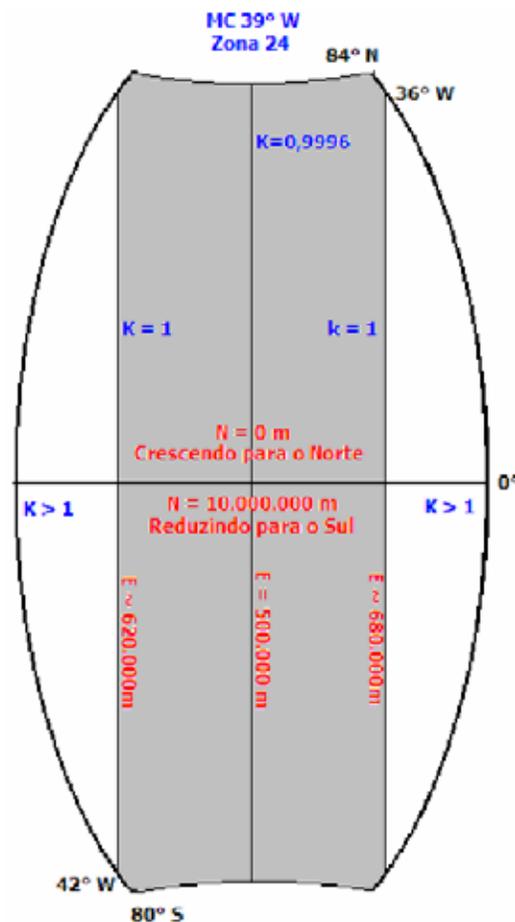


Figura 3. Zona UTM 24, abrangendo a região entre as longitudes  $36^\circ W$  e  $42^\circ W$ , onde se encontra a área de estudo. Fonte: MAIA (1999), adaptada

### 3. COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS ALVOS

Este trabalho tem uma grande ligação com o comportamento espectral dos alvos, pois é a partir deste comportamento analisado nas bandas do sensor TM (LANDSAT) e nas bandas sintéticas é possível concluir pontos importantes quanto ao estado do ambiente. Esta análise e representação são possíveis através do sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas.

Segundo (LILLESAND E KIEFER, 1994), sensoriamento remoto é a ciência e a arte que permite a identificação e a análise de características de diferentes tipos de alvos, através da energia eletromagnética emitida ou refletida por eles. Essa energia é captada por diferentes sensores, em diferentes comprimentos de onda e localizados em plataformas orbitais, sub orbitais ou, até mesmo, em nível de solo, e é transformada em imagens ou produtos espectrais. Dessa forma, para interpretar os produtos gerados pelos sistemas de sensoriamento remoto, é necessário avaliar o comportamento espectral dos alvos, bem como os parâmetros que influenciam na radiação refletida ou emitida pela superfície. Exemplos clássicos desses comportamentos podem ser observados na Figura 4. Nesta observa-se as faixas espectrais dos sensores, os alvos e as faixas do azul, verde, vermelho, infravermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Observa-se que há interseção entre as faixas de imageamento dos sensores. Um dos motivos para esta ocorrência é devido a absorção da atmosfera por certos comprimentos de onda (NOVO, 1992).

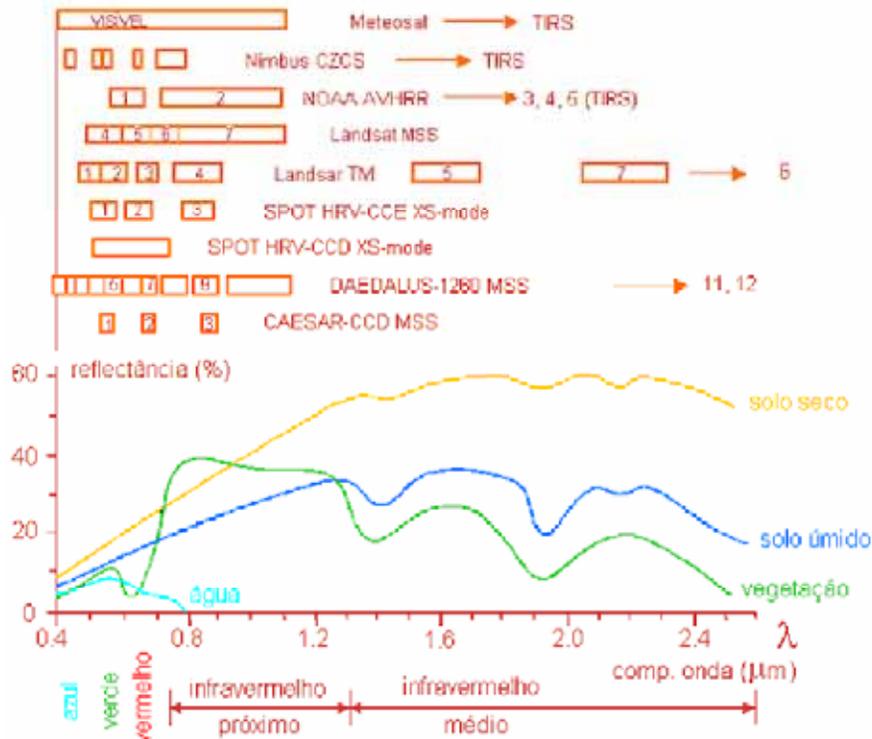


Figura 4. Comportamento espectral dos alvos e posição das bandas espectrais. Fonte: BAKKER *et al.* (2001).

Os elementos da fase de aquisição são os seguintes: Energia Radiante; Fonte de Radiação; Alvo; Trajetória e Sensor que é mostrado na figura 5 (BAKKER *et al.* 2001).

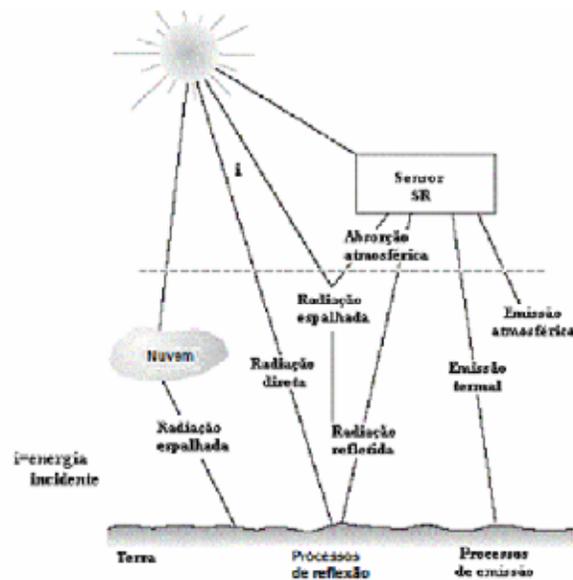


Figura 5. Elementos da fase de aquisição e interações da energia na atmosfera e sobre a superfície. Fonte: BAKKER *et al.* (2001).

### 3.1 Comportamento espectral da vegetação

A aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no estudo da vegetação inclui a necessidade de compreender o processo de interação entre a REM (Radiação Eletromagnética) e todas as partes que compõem uma planta, o que subentende o estudo dessa interação com os diversos tipos fisionômicos de dosséis (florestas, culturas agrícolas, formações de porte herbáceo, etc.). A figura 6 representa a curva de reflectância típica de uma folha verde e pode ser estendida ao comportamento do dossel vegetal.

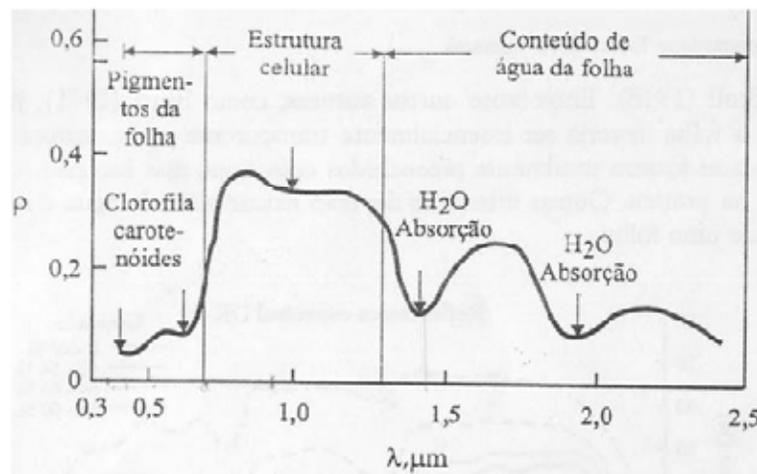


Figura 6. Curva de reflectância típica de uma folha verde. Fonte: NOVO (1989).

Uma vez que a folha é o principal elemento da vegetação sob o ponto de vista do processo de interação com a REM, estudar sobre as características de reflectância das folhas é uma forma de estender para os dosséis. De fato, quando as curvas de reflectância de uma folha verde sadia são comparadas com as medições espectrais de dosséis, apresentam formas muito semelhantes. Essa semelhança permite que os padrões de reflectância, apresentados pelos dosséis vegetais em imagens multiespectrais possam ser previstos, exatamente, de acordo com o padrão de reflectância da Figura 6 vista anteriormente. Para a vegetação verde, as imagens referentes à região do visível, em função da ação dos pigmentos fotossintetizantes, os dosséis apresentam tonalidade escura por causa da baixa reflectância da REM nessa faixa espectral; nas imagens da região do infravermelho próximo, esses mesmos dosséis deverão apresentar-se com tonalidade clara, e em imagens do infravermelho de ondas curtas os tons de cinza são intermediários entre o escuro das imagens do visível e o claro daquelas do infra, vermelho próximo (MADEIRA NETTO, 1999).

Segundo GATES *et al.* (1965), o aumento da reflectância no infravermelho próximo é atribuído à estrutura interna da folha (tamanho e formato das células e quantidade de espaços intercelulares). Uma pequena redução na reflectância nessa região é devido a uma diminuição dos espaços intercelulares, resultante do processo de desidratação da folha. No infravermelho médio, as bandas de forte absorção em 1.400 e 1.900 nm, estão associadas ao conteúdo de água das folhas. A diminuição da intensidade das feições de absorção nessa região resulta também do processo de desidratação.

### 3.2 Comportamento espectral dos solos

Com relação a reflectância do solo, não somente da luz visível, mas também de todos os outros comprimentos da faixa do espectro óptico, é uma propriedade cumulativa que deriva do comportamento espectral dos constituintes minerais, orgânicos e fluidos que, combinados, compõem os solos. As variações espectrais entre os diferentes tipos de solos estão normalmente associadas a processos de absorção da radiação eletromagnética atribuídos a esses componentes. Além da composição, o tamanho das partículas elementares e sua organização desempenham também papel importante nas propriedades de reflectância dos solos e, por isso, a forma dos espectros de reflectância fornece informações valiosas sobre algumas de suas características físico-químicas. Essas possibilidades fazem da espectrorradiometria de reflectância uma ferramenta importante para a identificação dos componentes dos solos, seja com experimentos em laboratório, medidas radiométricas feitas no campo ou por meio da análise espectral de imagens de sensores remotos (MADEIRA NETTO, 1999).

Um fator que influencia o comportamento espectral dos solos são os óxidos de ferro que, dependendo do tipo e quantidades relativas, dão aos solos diferentes tonalidades de vermelho e amarelo (MOREIRA, 2001).

A figura 7 a seguir mostra o comportamento espectral representativos de horizontes superficiais de solos com seus vários constituintes.

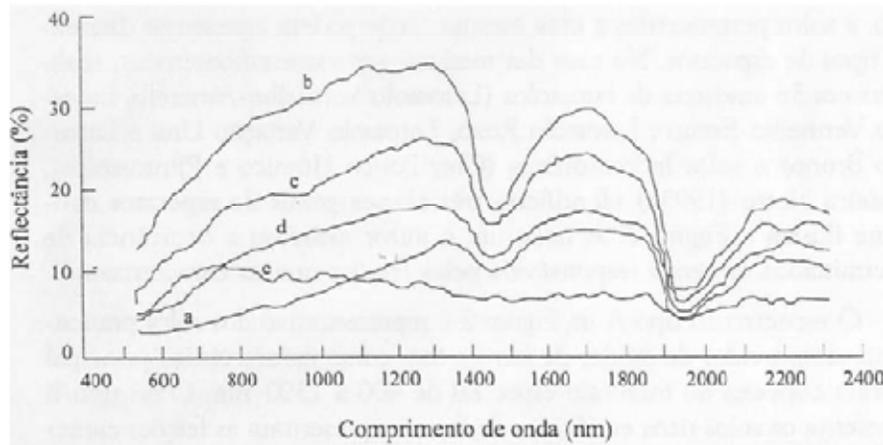


Figura 7. Espectros de reflectância representativos de horizonte superficial de solos: (a) forma dominada pela matéria orgânica; (b) forma minimamente alterada; (c) forma alterada pelo ferro; (d) forma afetada pela matéria orgânica; (e) forma dominada pelo ferro. Fonte: (MADEIRA NETTO, 1999).

Analisando a figura 7, o comportamento espectral da curva (a) em que há uma baixa reflectância é devido ao alto teor de matéria orgânica e textura argilosa. As características dos espectros são dominadas pela matéria orgânica e baixo albedo. Com relação ao comportamento do espectro (b) é devido a baixos teores de matéria orgânica e de óxido de ferro, conferindo altos albedos. No espectro (c) representa teores baixos de matéria orgânica e médio em óxido de ferro. Quanto ao espectro (d) há alto teor de matéria orgânica e a textura é arenosa. Já o espectro (e) é representativo de um horizonte superficial com teor alto de óxido de ferro e textura argilosa. Neste espectro os albedos são muito baixos e valores decrescentes para os comprimentos de onda superiores a 750 nm.

#### 4. DESERTIFICAÇÃO

Segundo a Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (UNITED NATIONS, 2001), a desertificação é o "processo de degradação das terras das regiões áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas, resultante de diferentes fatores, entre eles as variações climáticas e as atividades humanas". Estão ligadas a esta conceituação as degradações do solo, da fauna, da flora e dos recursos hídricos. É importante diferenciar o termo "desertificação" do termo "seca". A mesma convenção define seca como um fenômeno natural que ocorre quando a precipitação diminui significativamente em relação à precipitação normal, causando sérios desequilíbrios hidrológicos e afetando negativamente os sistemas produtivos. Já a desertificação vem da interação de processos complexos como: agricultura intensificada, salinização, erosão, mecanização inadequada, em que esses fatores afetam o equilíbrio físico, químico e biológico do ecossistema, e o fenômeno de seca vem intensificar ainda mais o desequilíbrio no ambiente afetado por estes processos.

Quando a precipitação diminui significativamente o índice de aridez diminui, expondo a região afetada a desequilíbrios no ecossistema.

Historicamente, a aceitação da definição de aridez para fins de aplicação no Plano de Ação de Combate à Desertificação, elaborada pelas Nações Unidas, ocorreu em 1977 a partir de metodologia desenvolvida por Thornthwaite em 1941.

O índice de aridez é determinado pela relação entre a precipitação média anual e a evapotranspiração.

Conforme essa definição, o grau de aridez de uma região depende do volume de precipitação (P) e da perda máxima possível de água pela evaporação e transpiração (ETP), ou a Evapotranspiração Potencial. As classes de variação para este índice são apresentadas na tabela 3. A tabela 4 apresenta a susceptibilidade de uma região à desertificação de acordo com o índice de aridez.

Tabela 3. Clima e Índice de Aridez.

Clima	Índice de Aridez
Hiper-árido	< 0,05
Árido	0,05 - 0,20
Semi-árido	0,21 - 0,50
Sub-úmido seco	0,51 - 0,65
Sub-úmido e úmido	> 0,65

Fonte: MMA (1998).

Para as áreas de aplicação da Convenção no Brasil, o índice de aridez varia de 0,21 até 0,65.

Tabela 4. Classes de suscetibilidade à desertificação.

Grau de suscetibilidade	Índice de Aridez
Muito alto	0,03 - 0,20
Alto	0,21 - 0,50
Moderado	> 0,50

Fonte: SAADI (2000).

De acordo com SAMPAIO *et al.* (2003), os efeitos temporários da seca podem ser drásticos. Estes efeitos fazem parte de uma cadeia de relações, podendo ser mais graves quando as condições iniciais são precárias e deixando no seu rastro condições deterioradas. Portanto, os efeitos da seca guardam uma relação estreita com a desertificação. Áreas em processo de desertificação são mais susceptíveis aos males provocados pelas secas e a susceptibilidade à desertificação deve incluir uma estimativa da probabilidade de ocorrência de secas.

É importante a separação dos efeitos da seca, até certo ponto passageiros, dos efeitos de longo prazo causados pelo processo da desertificação. Ecossistemas naturais, relativamente preservados, têm condições de se recuperarem dos efeitos danosos de fenômenos como a seca. No entanto, quando mal manejados, os ecossistemas naturais apresentam, entre outros, problemas de erosão e retenção de água, o que os tornam mais vulneráveis aos efeitos da seca (SECTMA, 2004).

A desertificação pode ser iniciada e perpetuada por um grande campo de atividades em regiões climaticamente marginais, incluindo práticas agrícolas, nomadismo e criação de gado, mineração, turismo, cultivo comercial, assentamento e colonização, derrubada da vegetação nativa, e uso de tecnologias inapropriadas. Além do mais, condições climáticas, topográficas, geológicas, vegetais e outras, podem diferir largamente de um país para outro e entre regiões dentro de um país. As tecnologias e medidas de controle de desertificação devem ser desenvolvidas de acordo com as necessidades do local e necessidades sociais. Finalmente, o objetivo em combater a desertificação é restaurar e manter os recursos para o uso sustentável (RHODES, 1991).

A desertificação possui diferentes causas, mas essas causas são basicamente relacionadas ao manejo inadequado solo. A retirada da vegetação, queimadas, uso

inapropriado da irrigação, mineração, cultivo em declive, etc., são algumas práticas que causam a perda de recursos e redução da capacidade produtiva dos solos (PERNAMBUCO, 1999).

Além do manejo, tem-se que a degradação da terra nas zonas áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas, também está associada à pobreza. Este fator também intimamente ligado ao processo de desertificação.

As áreas susceptíveis à desertificação ocupam mais de 30% da superfície terrestre e abrigam quase 1 bilhão de pessoas, conforme dados do PNUMA (MMA, 1998).

As perdas econômicas anuais atribuídas à desertificação giram em torno de US\$ 26 bilhões e o custo de recuperação das terras em todo o mundo pode chegar a US\$ 90 bilhões de dólares para um período de vinte anos, conforme dados do relatório de avaliação publicado pelo PNUMA (MMA, 1998).

Atualmente a análise da desertificação mostra a degradação dos recursos naturais como resultado da redução da bio-productividade, e tem largamente ganhado atenção no mundo. A maioria da discussão sobre desertificação refere-se à atividade humana em regiões áridas e semi-áridas com precipitação anual em torno de 300mm ou menos. Os abusos físicos e biológicos impostos à natureza tal como água inadequada, solo e vegetação degradados provindos de planos impróprios (implantação de projetos sem análise de impacto ambiental e zoneamento econômico-ecológico) e pressão da população, especialmente em países em desenvolvimento, resulta em uma super exploração dos recursos existentes. Isto perturba o equilíbrio do ecossistema e leva à rápida degradação das fontes de recursos (ALI e MIRZA, 1993).

De acordo com OKIN *et al.* (2000) a degradação de terras áridas tem recebido atenção significativa na área técnica e popular durante varias décadas passadas. Muitos desses interesses têm sido em relação à natureza devido: (1) desertificação estar expandida no sudoeste dos EUA e globalmente; (2) tem conseqüências financeiras e sociais severas, aumento do risco de segurança alimentar e saúde, e diminuição da produtividade agrícola; e (3) algumas formas de desertificação são irreparáveis em escala humana a um custo razoável. O aumento do uso de terras áridas por habitação humana, agricultura, indústria, e recreação, aumentam a quantidade de terras áridas diretamente impactadas. Desta forma, é importante entender o processo de degradação de regiões áridas neste contexto. Processos

adequados de entendimento permitirão uma identificação melhor de áreas sob elevado risco de desertificação antes que danos sérios tenham ocorrido.

Em face de diversos fatores sócio-econômicos não sustentáveis, a vulnerabilidade de terras áridas à degradação clama por um desenvolvimento conectado com modelos de processos de degradação e estratégias de monitoramento de forma a minimizar os danos ambientais e promover o manejo sustentável de atividades humanas em regiões áridas.

A dramática mudança de paisagens que acompanha a degradação da vegetação árida pode ser monitorada usando técnicas e tecnologias presentes e futuras de sensoriamento remoto. Quando informado por modelos, ferramentas de monitoramento remoto podem ser usadas no futuro para identificar áreas em risco evolutivo de degradação antes que grandes áreas sejam afetadas adversamente (OKIN *et al.*, 2001).

Segundo RUBIO e BOCHET (1998), apesar da seriedade dos impactos ambientais e sócio-econômicos da desertificação, poucos esforços têm sido feitos para delinear técnicas de monitoramento e diagnóstico para avaliar a situação e tendência da desertificação. Indicadores são integrados em informações sintéticas que podem prover dados em estágio inicial, situação e evolução de processos físicos, químicos, biológicos e antropogênicos.

#### **4.1 Desertificação no Brasil e no Estado de Pernambuco**

As áreas afetadas pelo processo de desertificação no Brasil estão inseridas no trópico semi-árido.

O trópico semi-árido compreende uma área de 980.711km<sup>2</sup>, distribuídos em oito Estados do Nordeste e municípios no norte de Minas Gerais.

O semi-árido apresenta grande diferenciação ecológica, com secas e estiagens que afetam quase a totalidade da atividade agropecuária e, mais acentuadamente, as pequenas e médias propriedades, e provoca graves problemas sócio-econômicos e migrações em massa para outras partes do País (MMA, 1998).

Segundo o MMA (1998) estudos disponíveis indicam que o processo da desertificação na região semi-árida vem comprometendo seriamente uma área de 181.000km<sup>2</sup>, com a geração de impactos difusos e concentrados sobre o território.

Nas áreas onde os efeitos estão concentrados em pequena parte do território, os danos ocorrem com profunda gravidade, configurando o que se chama de Núcleo Desertificado.

Os estudos permitiram uma identificação inicial de quatro Núcleos, onde a desertificação pode ser considerada extremamente grave, com forte comprometimento dos recursos naturais. São eles (SECTMA, 2004):

- 1) Núcleo do Seridó, localizado na região centro-sul do Rio Grande do Norte e centro-norte da Paraíba, compreendendo uma área de aproximadamente 2.341km<sup>2</sup>, envolvendo vários municípios vizinhos ao município de Parelhas;
- 2) Núcleo de Irauçuba no noroeste do Estado do Ceará, que abrange uma área de 4.000km<sup>2</sup> incluindo os municípios de Irauçuba, Forquilha e Sobral;
- 3) Núcleo de Gilbués no Piauí, com uma área aproximada de 6.311km<sup>2</sup> envolvendo os municípios de Gilbués e Monte Alegre;
- 4) Núcleo de Cabrobó, em Pernambuco, que totaliza uma área de 5.960km<sup>2</sup> e abrange os municípios de Cabrobó, Belém de São Francisco e Floresta.

Além da fragilidade natural motivada pelas características dos seus solos e pelas condições climáticas, esses núcleos desenvolveram-se sobre forte e indevida interferência humana. Entre as causas antrópicas apontadas como de importância no processo de desertificação, algumas são comuns a todos os núcleos de desertificação, enquanto outras podem ser atribuídas às características específicas das atividades desenvolvidas nos municípios incluídos em cada um deles. Entre as causas comuns estão o desmatamento indiscriminado, as queimadas e o sobrepastejo pelos caprinos e ovinos, principalmente. No núcleo de desertificação do Seridó o problema do desmatamento é agravado por cerca de 70 olarias cujos produtos cerâmicos são de reconhecida qualidade nos grandes centros urbanos do Nordeste. A ineficiência na geração da energia pelas indústrias de cerâmica dessa região tem agravado o processo de desertificação por causa da demanda por lenha (SECTMA, 2004).

Foi realizado um estudo pelo convênio SEMA/SUDENE, com o objetivo de detectar processos de degradação dos solos e da cobertura vegetal, no qual foram listadas áreas representativas de desertificação, que deveriam ser estudadas como áreas piloto (VASCONCELOS SOBRINHO, 1982). Seis foram as áreas pilotos selecionadas para estudos detalhados:

1) Estado do Piauí. Região fitogeográfica caatinga - cerrado. Municípios de Gilbués, Simplício Mendes, Cristino Castro, Ribeiro Gonçalves, Corrente, Bom Jesus e municípios vizinhos.

2) Estado do Ceará. Região fitogeográfica dos Inhamuns. Municípios de Tauá, Armeiroz, Mombaça, Aiuaba, Catarina, Saboeiro, Irauçuba e áreas de municípios vizinhos.

3) Estado do Rio Grande do Norte. Região fitogeográfica do Seridó. Municípios de Currais Novos, Acari, Parelhas, Equador, Carnaúba dos Dantas, Caicó, Jardim do Seridó e áreas de municípios vizinhos,

4) Estado da Paraíba. Região fitogeográfica dos Cariris Velhos. Municípios de Juazeirinho, São João do Cariri, Serra Branca, Cabaceiras, Camalaú, e também Picuí, na região do Seridó, e municípios vizinhos.

5) Estado de Pernambuco. Região fitogeográfica do Sertão Central. Municípios de Salgueiro, Parnamirim, Cabrobó, Itacuruba, Belém do São Francisco, Petrolina, Afrânio, Ouricuri, Araripina e municípios vizinhos.

6) Estado da Bahia. Região fitogeográfica do Sertão do São Francisco. Municípios de Uauá, Macururé, Chorrochó, Abaré, Rodelas, Glória, Jeremoabo, Juazeiro e municípios vizinhos.

Nesse estudo, VASCONCELOS SOBRINHO (1982) detalha a área 5, em Pernambuco, no qual identifica oito núcleos de desertificação dentro da área piloto de Pernambuco:

1) Núcleo de Umãs. Entre os municípios de Salgueiro e Terra Nova.

2) Núcleos de Terra Nova. Pequenas áreas no município de Terra Nova.

3) Núcleos entre Terra Nova e a BR - 116. Também nos municípios de Salgueiro e Terra Nova.

4) Núcleos da BR - 116. Margeando a estrada, entre Salgueiro e Cabrobó.

5) Núcleos de Itacuruba, Cabrobó e adjacências. Em ambas as margens da estrada que liga Cabrobó a Belém do São Francisco e Itacuruba e Cabrobó a Orocó.

6) Núcleos marginais da Br - 232. Ao longo da estrada Salgueiro - Parnamirim.

7) Núcleos das adjacências da Chapada do Araripe, localizados principalmente em Araripina.

8) Núcleos de Afrânio - Petrolina, alcançando áreas dos municípios de Afrânio, Petrolina, Ouricuri e Santa Cruz.

A figura 8 mostra o mapeamento de áreas com processos de desertificação no semi-árido. Esse estudo foi realizado pela Embrapa e difere da figura 9, que espacializa a desertificação no Brasil. Algumas áreas na figura 8 são classificadas como "severa", e na figura 9 não são classificadas como em processo de desertificação.



Figura 8. Desertificação no Semi-árido. Fonte: EMBRAPA (1994), apud SECTMA (2004).



Figura 9. Desertificação no Brasil. Fonte: MMA (2002) apud SECTMA (2004).

De acordo com o MMA (1998), as perdas econômicas causadas pela desertificação também são de grande importância. Segundo metodologia desenvolvida pelas Nações Unidas, as perdas causadas pela desertificação equivalem a US\$ 250,00 por hectare em áreas irrigadas, US\$ 40,00 por hectare em áreas de agricultura de sequeiro e US\$ 7,00 por hectare em áreas de pastagem.

Em um estudo realizado pelo MMA, foi diagnosticado que as perdas econômicas podem chegar a US\$ 800 milhões por ano devido à desertificação. Os custos de recuperação das áreas mais afetadas alcançam US\$ 2 bilhões para um período de vinte anos.

O Estado de Pernambuco é dividido em três regiões: Sertão, Agreste e Zona da Mata.

A área total do Estado é de 98.937km<sup>2</sup> e possui 7.399.071 habitantes distribuídos em 185 municípios. O agreste e o Sertão juntos perfazem uma área de 90.067 km<sup>2</sup>, com 145 municípios, e representam, de acordo com a Convenção sobre Desertificação, áreas com risco de desertificação (Figura 10). Cerca de 3.572.000 pessoas residem nestas duas regiões (PERNAMBUCO, 1999).



Figura 10. Mapa de susceptibilidade à desertificação do Estado de Pernambuco. Divisão Municipal. Fonte: PERNAMBUCO (1999).

Só o Sertão ocupa 63% do Estado, ou 63.209,8km<sup>2</sup>, com uma população de 1.255.071 habitantes, tendo uma densidade demográfica de 19,86 hab/km<sup>2</sup>.

As ocorrências de áreas susceptíveis em Pernambuco foram divididas em três grandes grupos, de acordo com o nível de degradação: a) "Muito Severo"; b) "Severo"; e c) "Áreas Susceptíveis" com diversos problemas ambientais, que ainda não configura processos de degradação intenso (Figura 11) (PERNAMBUCO,1999).

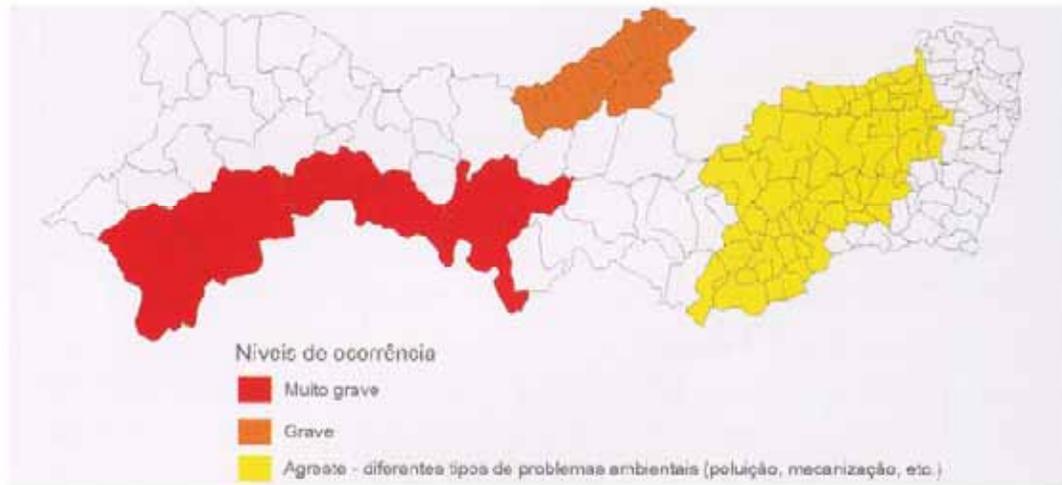


Figura 11. Mapa de ocorrência de desertificação e problemas ambientais do Estado de Pernambuco. Divisão Municipal. Fonte: PERNAMBUCO, 1999.

As áreas com nível "Muito Severo" de degradação fazem parte da mesoregião do São Francisco (RD São Francisco e RD Itaparica), perfazendo um total de 22.884km<sup>2</sup>, enquanto aquelas com um nível "Severo" estão no Sertão de Pernambuco (RD Pajeú/Moxotó), representando 10.152,2km<sup>2</sup> (figura 11). As "Áreas Susceptíveis" que têm problemas ambientais, no qual as causas estão associadas ao uso intensivo de pesticidas, mecanização, etc. totalizam 19.285,8km<sup>2</sup> (PERNAMBUCO, 1999).

## 5. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 5.1 Seleção da Área de Estudo

A Bacia do Rio Brígida foi selecionada como área de estudo por estar dentro das Áreas Prioritárias do Governo de Estado de Pernambuco, bem como por conter a região do Araripe, e esta região estar envolvida com processos de extração de minério (figura 12), desmatamento para agricultura de sequeiro, obtenção de lenha para carvão e olarias, criação de animais, e alguns municípios ultrapassando o limite de densidade demográfica estabelecido pela ONU para regiões susceptível a desertificação que é de 20 hab./km<sup>2</sup>, havendo assim uma sobrecarga no ecossistema caatinga, que é um bioma frágil.

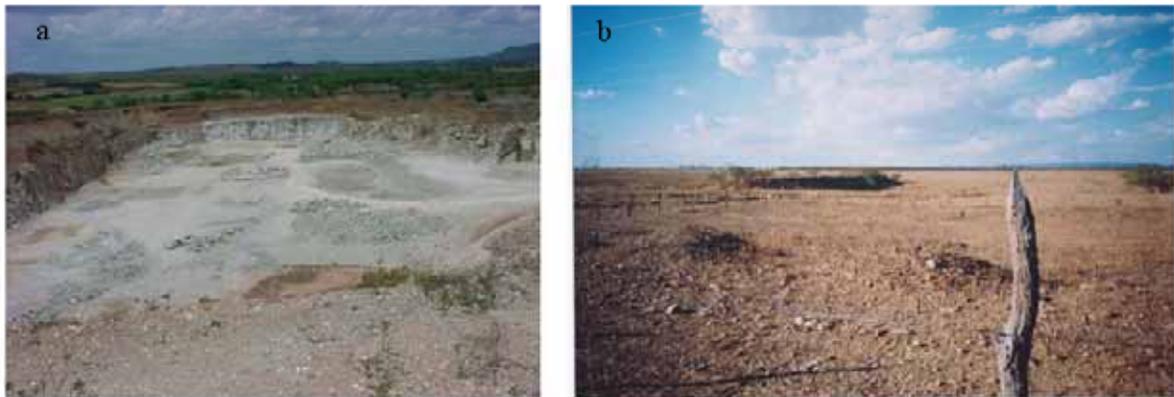


Figura 12. Fotos da área de estudo. (a) Mineradora no município de Araripina. (b) Área desmatada entre os municípios de Ouricuri e Pamamirim.

### 5.2 Localização da Área de Estudo

A área selecionada está localizada no oeste do Estado de Pernambuco, na parte central do Trópico Semi-Árido brasileiro. A Bacia do Rio Brígida faz parte da mesorregião do Sertão Pernambucano, que é constituída por seis microrregiões homogêneas: Araripina, Salgueiro, Pajeú, Moxotó, Petrolina e Itaparica, abrangendo um total de 39 municípios. Na área de estudo estão situados 6 municípios com área total incluída na bacia (Tabela 5).

Tabela 5. Dados dos Municípios pertencentes à Bacia do Rio da Brígida. Coordenadas geográficas – WGS-84.

Municípios	Área (km <sup>2</sup> )	População	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Arapipina	1914,40	70.592	07°34'34"	40°29'54"	622
Bodocó	1.604,90	31.712	07°46'42"	39°56'28"	443
Granito	519,70	6.104	07°52'04"	39°36'53"	447
Ipubi	972,10	23.210	07°39'07"	40°08'56"	535
Ouricuri	2383,90	56.623	07°52'57"	40°04'54"	451
Trindade	229,30	21.919	07°45'43"	40°16'04"	518

Outros municípios com parte de seus territórios inseridos na Bacia são: Cabrobó, Exu, Moreilândia, Orocó, Parnamirim, St<sup>a</sup> Maria da Boa Vista, St<sup>a</sup> Cruz, St<sup>a</sup> Filomena e Serrita.

A área da Bacia está localizada entre as coordenadas 7° 18' 57" a 8° 36' 30" de latitude Sul e 39° 17' 16" a 40° 43' 30" de longitude Oeste, encontra-se mapeada nas seguintes folhas topográficas descritas na Tabela 6, e ocupa uma área de aproximadamente 14000 km<sup>2</sup>.

Tabela 6. Nomenclatura das cartas topográficas na escala 1:100.000.

SB-24-Y-C-III MI-1202	SB-24-Y-D-I MI-1203	SB-24-Y-D-II MI-1204	SB-24-Y-D-III MI-1205
SB-24-Y-C-VI MI-1281	SB-24-Y-D-IV MI-1282	SB-24-Y-D-V MI-1283	SB-24-Y-D-VI MI-1284
SC-24-V-A-III MI-1360	SC-24-V-B-I MI-1361	SC-24-V-B-II MI-1362	SC-24-V-B-III MI-1363
SC-24-V-A-VI MI-1438	SC-24-V-B-IV MI-1439	SC-24-V-B-V MI-1440	SC-24-V-B-VI MI-1441

As cartas topográficas relacionadas na tabela 12., foram construídas a partir de levantamento aerofotogramétrico na escala de 1:100.000 e editadas pelo Serviço Geográfico do Exército em 1968, e neste trabalho foram utilizadas para digitalização das curvas de nível. A localização da área de estudo está representada na Figura 13.





Figura 14. Tipos climáticos para mesorregião do Sertão Pernambucano.

Para a região de estudo temos os climas BSwh', BSw'h' e BSs'h', com predomínio do tipo BSwh'.

O clima é tropical tendendo a seco pela irregularidade da ação das massas de ar (controlado por massas Equatoriais e Tropicais). O tipo climático BSwh' apresenta-se como de clima quente semi-árido, tipo estepe, com a estação chuvosa atrasada para o outono. O mês mais frio mostra-se com temperatura superior a 18 °C. As mesmas características são observadas para os tipos climáticos BSw'h' e BSs'h'. No entanto, o tipo BSw'h' tem a estação chuvosa no verão; enquanto o tipo BSs'h' tem a estação chuvosa adiantada para o outono. Ocupando uma menor faixa de área ocorre o tipo climático Aw', que é caracterizado por um clima tropical chuvoso, com inverno seco. A estação chuvosa se atrasa para o outono e a temperatura do mês mais frio é superior a 18 °C.

Um mapa da média anual da precipitação é visto na figura 15, gerado a partir de dados médios anuais adquiridos na Sudene, na página da UFPB, CPTEC/INPE e DISME/Recife.

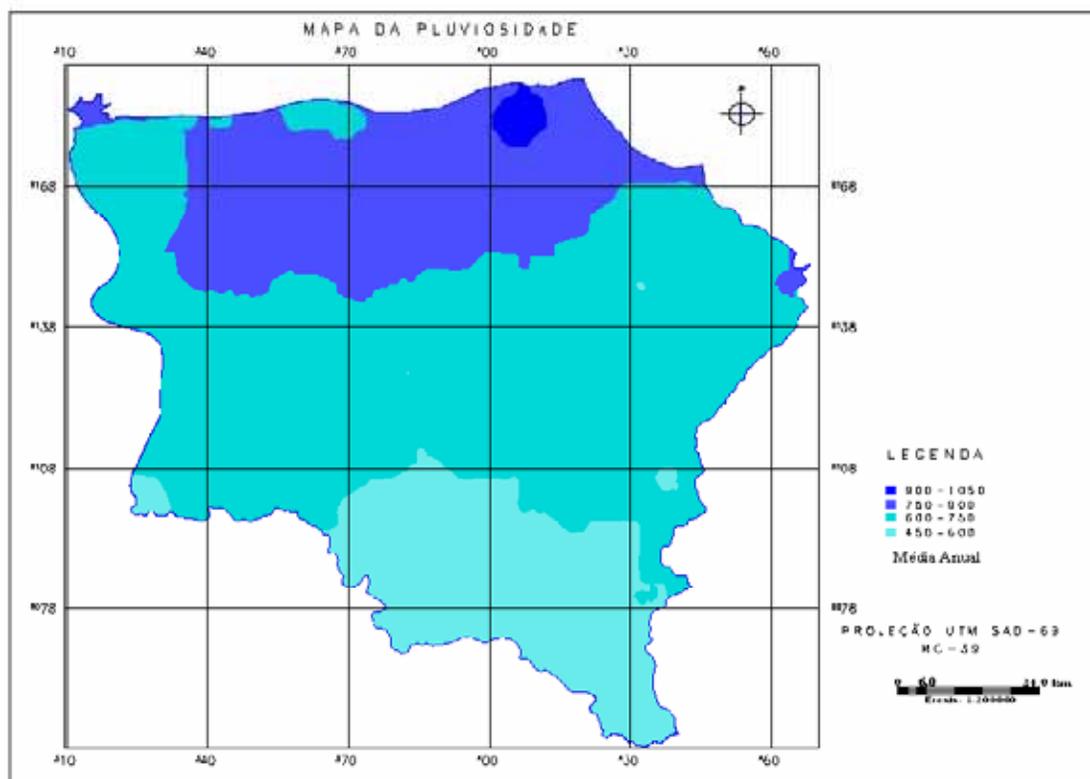


Figura 15. Distribuição da precipitação média anual da Bacia do Brígida gerado no SPRING.

### 5.3.2 Geologia

A mesorregião do Sertão Pernambucano está situada no grande complexo cristalino de rochas pertencentes ao desenvolvimento geológico do período Pré-Cambriano (B e CD). Localmente este complexo é recoberto com sedimento pedimentar e formações que se originaram nos períodos Cretáceos e Jurássicos (Figura 16). Ele é constituído principalmente por rochas metamórficas, sedimentares e ígneas, representadas por gnaisses, xistos, arenitos e granitos, constituindo a paisagem típica do sertão pernambucano (BRASIL, 1973). As áreas relacionadas ao Pré-Cambriano (B), que ocupam preferencialmente a parte norte desta mesorregião, são formadas principalmente pelas seguintes rochas: xistos, filitos e quartzitos. A maior parte dos solos desenvolvidos a partir de rochas dessa formação são litólicos, apresentando-se pouco desenvolvido e pedregoso, comumente susceptível ao processo de erosão.

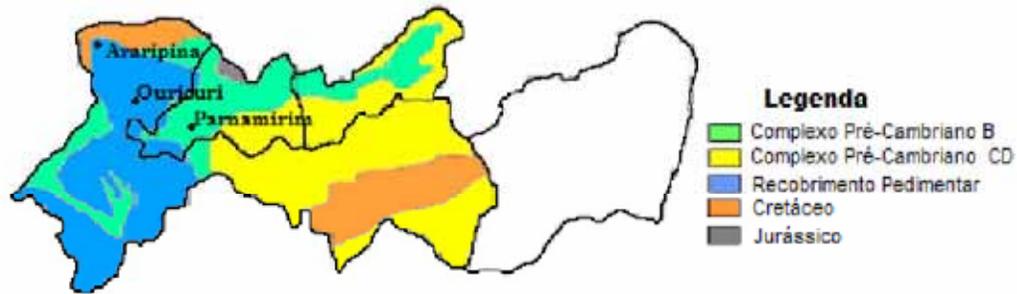


Figura 16. Tipos de formação geológica. Fonte: BRASIL (1973).

As rochas mais importantes encontradas em áreas Pré-Cambrianas (CD) estão ocupando principalmente a parte centro-leste da mesorregião, sendo representadas principalmente por gnaisses, biotitas e migmatitos. Também ocorrem com frequência inclusões de granitos, micaxistos, filitos, quartzitos. Entre os solos mais importantes derivados de rochas do Pré-Cambriano (CD), destacam-se os Luvisolos Crônicos que apresentam alta susceptibilidade à erosão e os Neossolos Litólicos, comumente susceptíveis à erosão.

Na parte oeste da mesorregião ocorre a formação Pré-Cambriana com recobrimento pedimentar constituído por material arenoso e areno-argiloso. Os principais solos provenientes desta cobertura são os Latossolos, que restringem o processo de erosão, devido à drenagem satisfatória e ao baixo gradiente textural e, os Argissolos que, devido à diferença textural entre os horizontes A e B, estão sujeitos a riscos maiores de erosão.

A formação Cretácea ocupa uma pequena porção da mesorregião, sendo constituída principalmente por rochas calcárias e arenitos. Essas rochas dão origem principalmente aos Latossolos, os quais apresentam restrições aos processos erosivos.

Na Bacia do Rio Brígida ocorrem formações do complexo Pré-Cambriano (B), Recobrimento pedimentar e Cretáceo, sendo na sua maior parte formada por Recobrimento pedimentar que ocorre na parte sul da Bacia que possui menores altitudes. Na parte norte, na Chapada do Araripe a formação é do período Cretáceo.

A figura 17 mostra em detalhe as unidades geoambientais da bacia.

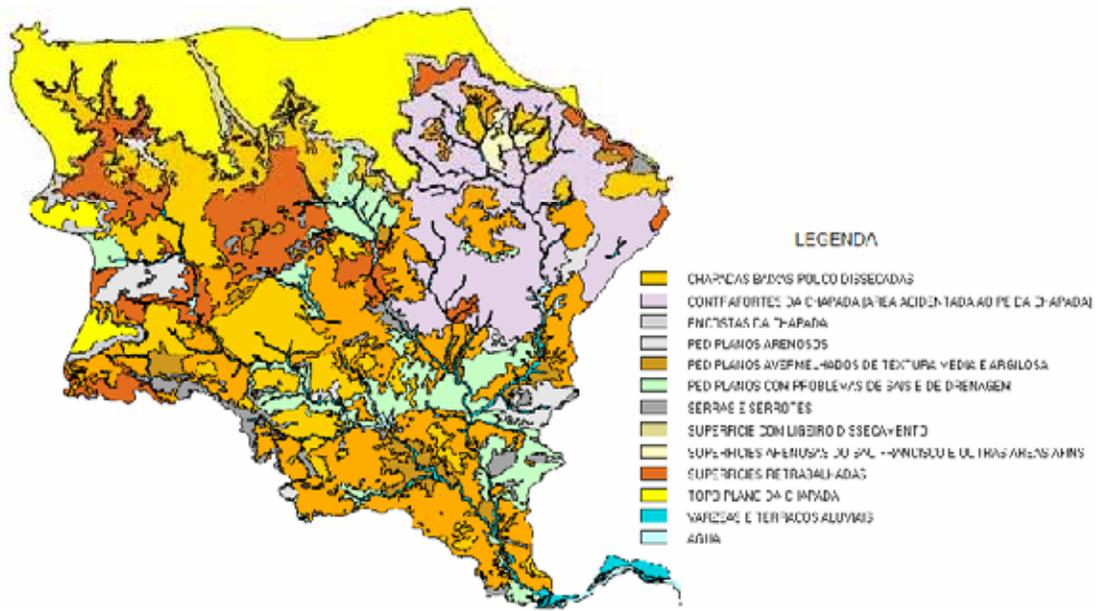


Figura 17. Unidades geoambientais. Fonte: ZAPE (2001).

### 5.3.3 Relevo

O relevo predominante na mesorregião é constituído na sua maior parte pela Depressão do São Francisco, conforme mostrado na Figura 18. A Depressão do São Francisco é resultante de atuação de uma morfogênese recente que apresenta como fator principal a instalação da rede de drenagem do Rio São Francisco.

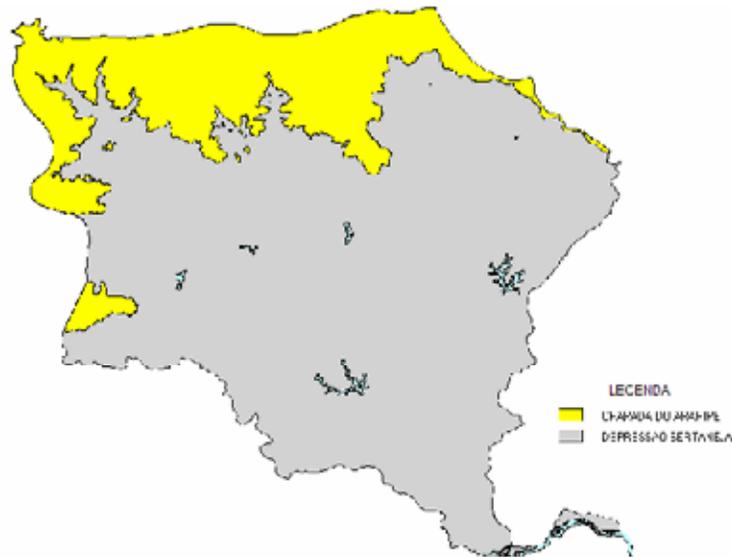


Figura 18. Esboço do relevo da bacia do Rio São Francisco. Fonte: ZAPE (2001).

Esta depressão caracteriza-se por apresentar um relevo geralmente plano e suave ondulado cujas declividades variam de 1 a 8%. Ocorrem também pediplanos em evolução,

com maiores ondulações, cujas declividades oscilam de 8 a 30%. As altitudes dessas áreas variam de 300 a 500m. Aparece ocupando a parte centro-oeste da mesorregião do Sertão Pernambucano, e na Bacia do Brígida aparece na região sul desde o pé da Chapada até o Rio São Francisco.

Na região Norte da Bacia, predominam os terrenos planos da Chapada do Araripe. Trata-se de uma superfície estrutural conservada, elaborada em rochas sedimentares cretáceas e que se caracteriza por apresentar um relevo suave ondulado, com encostas escarpadas e com altitudes médias que variam de 500 a 900 m.

### 5.3.4 Solo

Os solos formadores da mesorregião do Sertão Pernambucano correspondem predominantemente às classes Latossolos Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd), associações de Luvisolos Crômicos (TC) e Neossolo Litólico Eutrófico (RLe), como mostra a Figura 19.

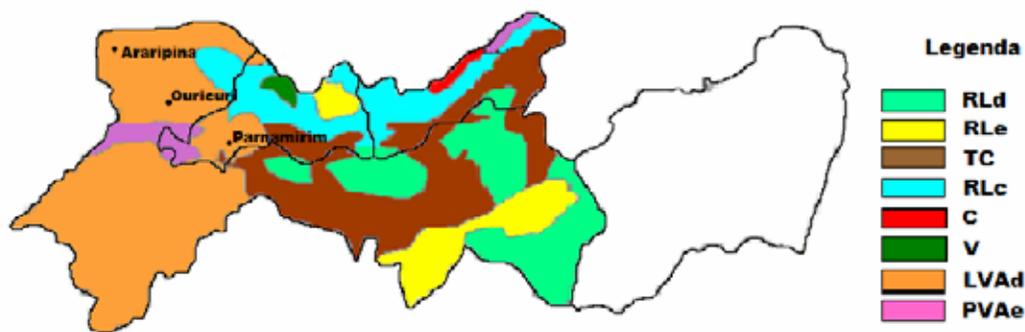


Figura 19. Esboço dos solos da mesorregião do Sertão Pernambucano. Fonte: BRASIL (1973).

Uma classificação mais detalhada segue na figura 20, que mostra predomínio de Latossolo Amarelo, Podzólico Amarelo e Solos Litólicos (Tabela 7).

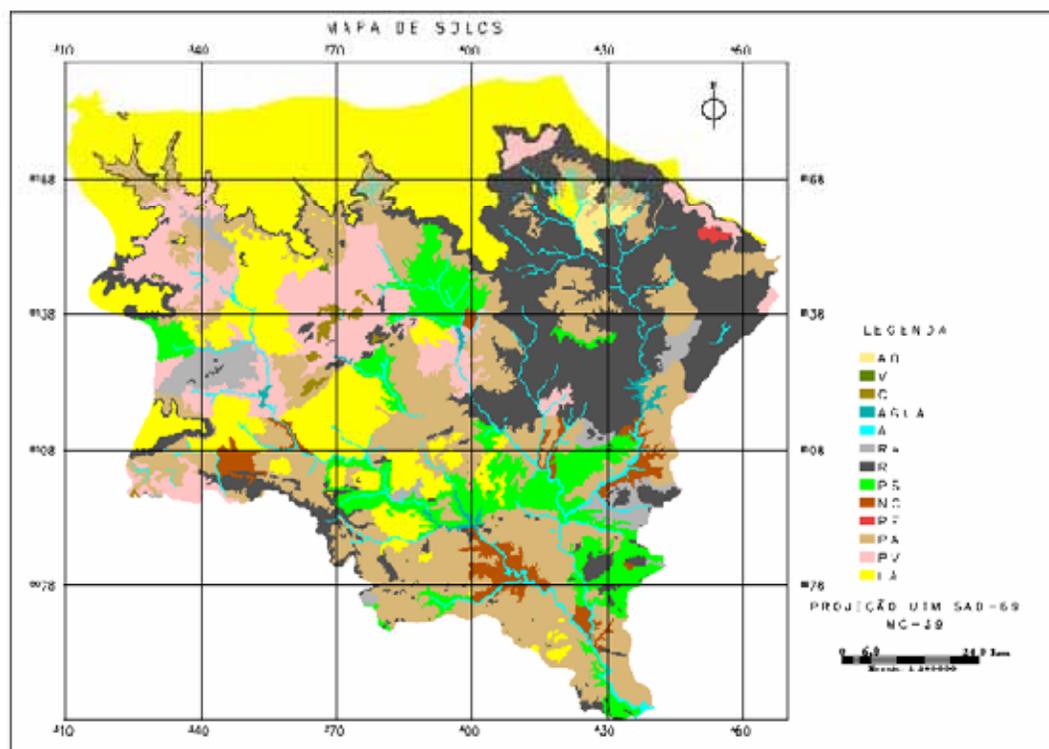


Figura 20. Mapa de solos da Bacia do Brígida. Fonte: ZAPE (2001).

O Latossolo Amarelo e o Latossolo Vermelho-Amarelo são ambos distróficos, possuem horizonte A moderado e textura média e argilosa, vegetação natural do tipo caatinga hipoxerófila e relevo plano. A classe de terra para irrigação é boa e possui um potencial para irrigação alto, tendo restrições quanto à altura de recalque e fertilidade natural.

Os Podzólicos Amarelo e Vermelho-Amarelo que ocorrem na Bacia possuem transição abrupta e não abrupta, textura arenosa e média/argilosa ocorrem em conjunto com Podzólico Acinzentado de textura arenosa e média; ambos com atividade de argila baixa, distrófico e eutrófico, plântico e não plântico, possuem horizonte A moderado, vegetação natural do tipo caatinga hipoxerófila, com relevo plano e suave ondulado. Possuem classe para irrigação boa e regular, respectivamente. Os limites para irrigação são fertilidade natural e drenagem para o Podzólico Amarelo e Vermelho Amarelo e, textura arenosa, drenagem deficiente e fertilidade natural para o Podzólico Acinzentado.

Tabela 7. Classes de solos para a bacia do Brígida.

Solo	Área (km <sup>2</sup> )
Latossolo Amarelo – LA	3763,75
Podzólico Vermelho – PV	1289,31
Podzólico Amarelo – PA	3346,03
Podzólico Vermelho-Escuro – PE	17,62
Bruno Não-Cálcico – NC	309,95
Planossolo – PL	1087,05
Solos Litólicos – R	2796,81
Regossolo – Re	385,19
Solos Aluviais – A	385,33
Cambissolo – C	54,88
Vertissolo – V	7,14
Areias Quartzosas – AQ	84,05
Água	58,44

Fonte: ZAPE (2001).

As classes do Podzólico Vermelho-Amarelo que ocorrem ao pé da Chapada possuem atividade de argila baixa e textura média e argilosa. Ocorrem em conjunto com Latossolos Amarelo e Vermelho-Amarelo de textura média, e Cambissolo de atividade de argila baixa, laterítico, textura média e argilosa, com substrato sedimentar sobre rochas gnaisse e anfibólitos; todos Eutróficos e Distróficos, com presença de horizonte A moderado, caatinga hipoxerófila, relevo plano e suave ondulado (ZAPE, 2001).

Os Solos Litólicos são de textura arenosa e média, com relevo ondulado e forte ondulado, substrato arenoso. Ocorrendo com Podzólico Vermelho-Amarelo de atividade de argila baixa, profundo e pouco profundo, textura média e argilosa com relevo suave ondulado a forte ondulado, possuem horizonte A moderado e caatinga hipoxerófila.

### 5.3.5 Vegetação

A região coberta pela Caatinga possui solos relativamente férteis. Embora não tenha potencial madeireiro, exceto pela extração secular de lenha, a região é rica em recursos genéticos dada a sua alta biodiversidade. Por outro lado, o aspecto agressivo da vegetação contrasta com o colorido diversificado das flores emergentes no período das chuvas, cujo índice pluviométrico varia entre 300 e 800 milímetros anualmente.

A Caatinga apresenta três estratos: arbóreos (8 a 12 metros), arbustivo (2 a 5 metros) e o herbáceo (abaixo de 2 metros).

A caatinga é o tipo de vegetação característica e dominante no Sertão Pernambucano. A mais recente classificação oficial da formação da caatinga é apresentada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1997), considerando-a como uma savana estépica. As classes de savana foram classificadas em: savana estépica parque, savana estépica florestada, savana estépica arbórea e savana estépica gramíneo-lenhosa (Figura 21).



Figura 21. Vegetação da mesorregião do Sertão Pernambucano. Fonte: Brasil (1973)  
Adaptada.

Segundo MENDES (1997), a caatinga é diferente da savana, da estepe e de outros tipos de vegetação encontrados nas regiões secas da Terra. É mata aberta, esgalhada, de altura irregular, verdejante e viçosa no período chuvoso e desfolhada, de aspecto seco, estorricado e cinzento na estação seca anual e por ocasião das secas que assolam periodicamente a Região. Na estação seca, a grande maioria das espécies perde as folhas, paralisa o crescimento e fica aparentemente morta, em vida latente, e as espécies efêmeras fenecem. Logo após as primeiras chuvas, verifica-se uma verdadeira transmutação, quando as plantas rapidamente se revestem de folhas e muitas delas iniciam a floração.

As plantas lenhosas da caatinga possuem copas baixas, abertas, esparramadas e frutos pequenos e numerosos. A fisionomia, o porte das plantas, a frequência e a composição florística são dependentes da fertilidade e da disponibilidade hídrica dos solos. O padrão fisionômico e florístico da caatinga são alterados pelas áreas de exceção circunscritas aos enclaves de matas das serras úmidas e pelas matas ciliares que recobrem as margens aluviais dos rios intermitentes e permanentes que cortam o Semi-Árido.

As figuras 22a e 22b mostram as características da vegetação existentes na Bacia do Brígida. Na figura 22a é mostrada a caatinga do tipo hipoxerófila predominante na Chapada

e a figura 22b mostra a caatinga hiperxerófila predominante na depressão sertaneja da Bacia.

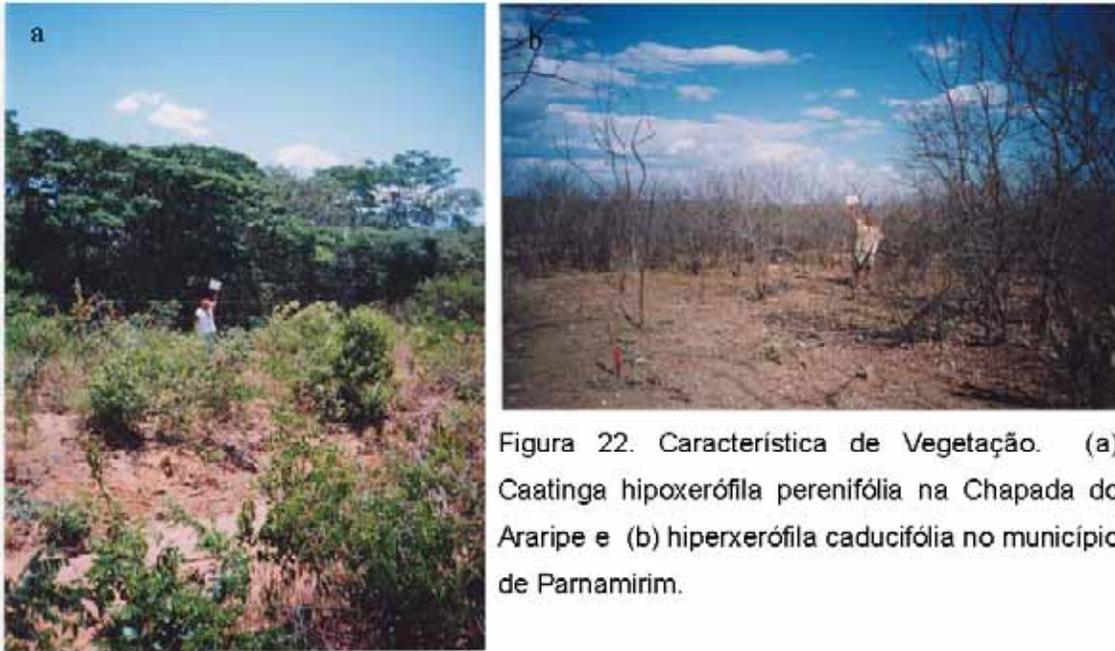


Figura 22. Característica de Vegetação. (a) Caatinga hipoxerófila perenifólia na Chapada do Araripe e (b) hiperxerófila caducifólia no município de Parnamirim.

### 5.3.6 Aptidão Agrícola

O potencial agrícola está relacionado a vários fatores intrínsecos do solo, que viabilizam ou limitam a utilização da terra. Essa viabilidade ou limitação está associada à fertilidade natural, à eficiência de armazenamento de água, a não-susceptibilidade à erosão e ao não impedimento ao uso de implementos agrícolas.

Diferentes classes de aptidão agrícola podem ser definidas, segundo o IBGE (1997). Na mesorregião do sertão pernambucano, conforme a Figura 23, aparecem somente as classes de aptidão inapta, restrita e regular, em ordem de importância. Essas restrições são devidas, principalmente, aos baixos índices pluviométricos.

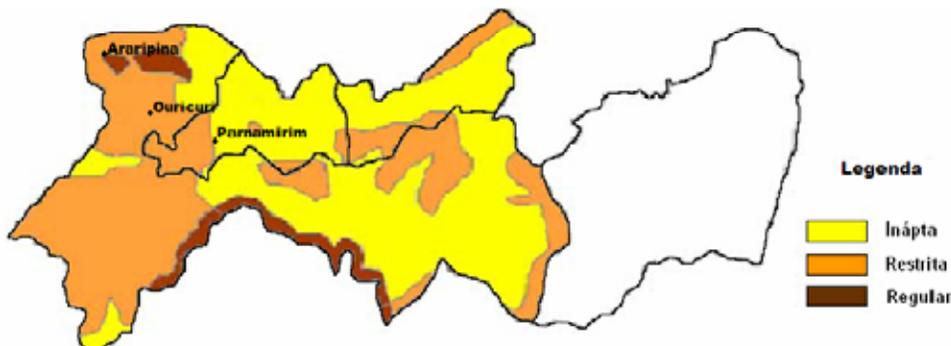


Figura 23. Esboço da Aptidão Agrícola da mesorregião do Sertão Pernambucano. Fonte: BRASIL (1979).

Segundo BRASIL (1979), as terras do Sertão Pernambucano são classificadas, na sua maior parte, como de aptidão restrita e/ou inaptas para culturas de ciclo curto ou longo. Entretanto, ocorre uma faixa de aptidão regular na sua parte sul, que acompanha o rio São Francisco, e numa outra área mais a noroeste.

Várias classes de aptidão mais detalhadas foram definidas em ZAPE (2001), para a Bacia do Rio Brígida (Figura 24).

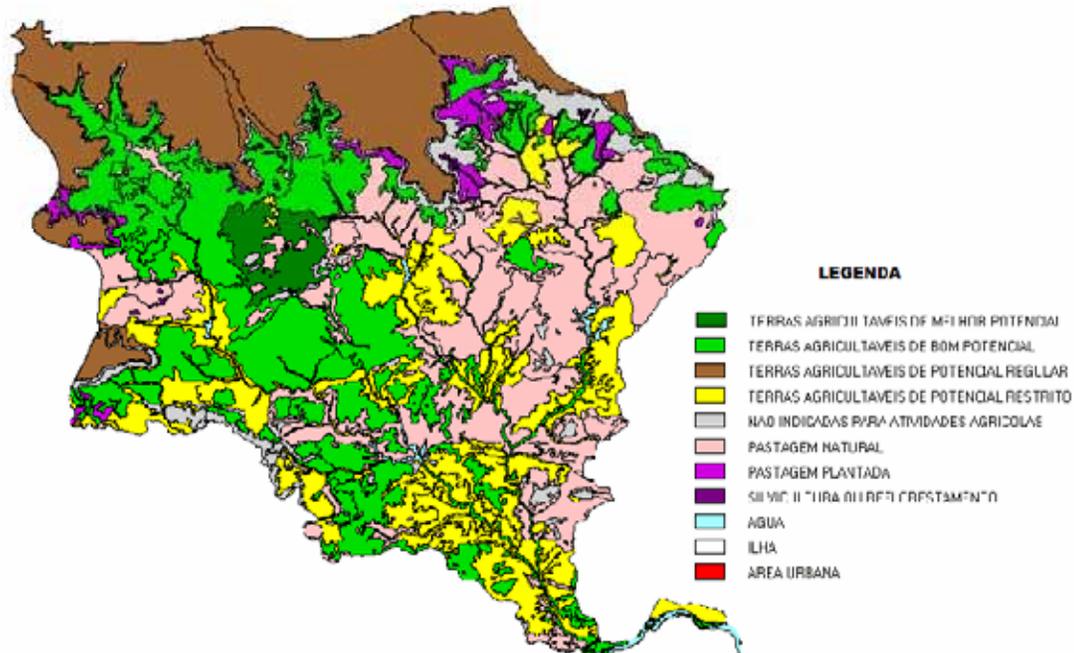


Figura 24. Aptidão Agroecológica para a Bacia do Rio Brígida. Fonte: ZAPE (2001).

Na Chapada do Araripe tem-se associação de terras agricultáveis de Potencial Regular (R) = 100% e classificadas como C4 (5 a 7 meses consecutivos secos).

Na parte leste tem-se associação de terras agricultáveis Indicadas para Pastagem Natural (N) = 100% e classificadas como C6 (8 a 10 meses consecutivos secos).

Na região oeste da Bacia a maior parte são de terras agricultáveis de Potencial Bom (B) = 70%; Potencial Regular (R) = 30% e C6 = 8 a 10 meses consecutivos secos.

Na Região sul da Bacia as terras agricultáveis são: Potencial Restrito (T) = 45%; Indicadas para Pastagem Natural (N) = 35%; Potencial Bom (B) = 20% e C6 = 8 a 10 meses consecutivos secos.

## 6. QUANTIFICAÇÃO DE DESERTIFICAÇÃO

A desertificação refere-se à degradação do solo em regiões áridas, semi-áridas, e sub-úmidas resultantes de variações climáticas e atividades humanas. Nesta definição proposta pela Convenção sobre Desertificação das Nações Unidas (UNEP), a desertificação é considerada o resultado de uma série de processos naturais e antropogênicos, um resultado que leva para uma gradual degradação do meio ambiente com a perda da produtividade econômica e biológica do solo. Os processos que levam à desertificação citado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (FAO/UNEP) são os seguintes: degradação da cobertura vegetal (remoção ou destruição da cobertura vegetal), biológico (redução do conteúdo de matéria orgânica), físico (mudanças desfavorável nas propriedades físicas do solo, tal como porosidade, densidade aparente, estabilidade estrutural e permeabilidade) e degradação química (salinização, acidificação, contaminação e lixiviação); erosão por água (remoção das partículas do solo pela chuva, água de escoamento superficial ou gravidade); e erosão eólica (RUBIO e BOCHET, 1998).

Segundo RUBIO e BOCHET (1998), indicadores de problemas ambientais simplificam a compreensão de processos complexos (ex. desertificação).

Indicadores podem ser facilmente comunicados ao público ou à ação política. Eles podem ser usados como informações sintéticas em sistemas de informações geográficas (SIG) para determinar a extensão espacial e distribuição de áreas degradadas e para relacionar ações humanas (causas) com condições ambientais (efeitos).

Dados de sensoriamento remoto têm um papel importante como fonte de informação necessária para o manejo sustentável de recursos naturais e para proteção ambiental. Através de SIG, dados de sensoriamento remoto podem ser integrados com dados de outras fontes para facilitar aos planejadores, gerentes, políticos e tomadores de decisão a obterem informações relevantes que necessitam para tomada de decisão (ONU, General Assembly, 2001).

Neste capítulo tem-se a próxima seção apresentando os processos biofísicos como indicadores. Os índices de vegetação, temperatura e emissividade, albedo e fluxo de calor no solo são aqui destacados como parâmetros que devem ser observados. Autores como LIU *et al.* (2002), MOUAT *et al.* (1997) e KAZMIERCZAK (1998) mostram alguns modelos, em que alguns usam ponderações dos parâmetros analisados. Estes modelos são resumidos na seção 6.1.5.

## 6.1 Indicadores de Desertificação

Alguns processos biofísicos comumente mencionados, envolvidos na desertificação são (PRINCE, 2002):

- Perda da estrutura e coesão do solo;
- Crosta no solo, compactação do solo;
- Erosão do solo por desestruturação;
- Voçoroca;
- Erosão laminar;
- Acumulação do solo na base de plantas perenes;
- Aumento da complexidade da paisagem;
- Formação de dunas;
- Adição de sedimentos em corpos d'água;
- Perda de produtividade das plantas, pastagem, e vegetação;
- Tempestade de poeiras;
- Aumento de aerossóis atmosféricos;
- Redução na superfície de rugosidade;
- Aumento do albedo;
- Diminuição da convecção;
- Mudança na circulação atmosférica.

Duas principais manifestações da desertificação são a erosão da camada superficial do solo e a salinização. Solos de zonas áridas são geralmente menos férteis que solos de zonas não-áridas. Além do mais, a fertilidade em solos áridos é concentrada somente em uma camada fina do horizonte superficial. Quando o solo superficial é erodido, o solo subsuperficial é pobre em matéria orgânica, nutrientes e sementes. A cobertura vegetal protege o horizonte superficial da erosão por água e eólica. O solo superficial é erodido por (a) remoção da vegetação natural através de vários processos naturais e/ou induzidos pelo homem, e (b) transformação de terras áridas em agricultáveis no qual as propriedades da cobertura vegetal dos cultivos são inferiores aos da vegetação antecedente. Uma vez que a erosão tenha ocorrido, é difícil restaurar a vegetação natural (UN, Convention to Combat Desertification, 1998).

DREGNE (1983) relata indicadores biofísicos em escala global e regional. Os parâmetros albedo, tempestades de areia, precipitação pluvial, erosão do solo e sedimentação e, salinização dos solos, estão inseridos em escala Global. Em escala

Regional foram incluídos Produtividade, Biomassa, Clima, Fertilidade e Salinização dos solos.

Segundo MOUAT *et al.* (1997), os indicadores potenciais para avaliação do risco à desertificação são os seguintes:

1. Salinização do solo;
2. Albedo (reflectância da superfície) como indicador da condição da superfície do solo e/ou erosão;
3. Profundidade do lençol freático;
4. Mudanças na composição de espécies vegetais: ex. mudanças na relação ervas daninhas x espécies nativas;
5. Mudanças na produção primária líquida (NPP) medida pelo NDVI;
6. Riquezas em espécies/densidade: dados de composição de espécies;
7. Índices de erosão além do albedo;
8. Pressão de pastoreio definido como AUMs/capacidade de suporte;
9. PSDI, a longo prazo (em função de precipitação, temperatura, e umidade do solo);
10. Razão Carbono/Nitrogênio;
11. Índice de área foliar;
12. Matéria orgânica no solo;
13. Cobertura Morta (serrapilheira);
14. Razão de Bowen.

Na avaliação e no monitoramento da desertificação faz-se necessário o estabelecimento de valores de "referência" para os indicadores selecionados para permitir comparações entre áreas afetadas pelos processos de desertificação, em que valores destacados devem ser tomados considerando-se o local onde ele vai ser utilizado. Dessa forma, para um dado indicador, os valores de referência devem ser estabelecidos considerando fatores como: classe de solo, uso e ocupação do solo, localização da área na paisagem (encosta, topo, depressão, clima, etc.) (SECTMA, 2004).

O indicador 'terras afetadas pela desertificação' avalia a extensão total e a proporção das terras secas afetadas pelo processo de desertificação de um país. Este indicador serve para mostrar a severidade e a evolução temporal do problema e, também, para avaliar a resposta do processo de desertificação aos mecanismos de intervenção. O indicador pode ser usado, ainda, para comparar a extensão do problema entre diferentes nações (SECTMA, 2004).

A tabela 8 apresenta uma diversidade de indicadores estudados por vários autores no semi-árido nordestino. Já a tabela 9 expõe a área afetada pelos processos de desertificação, em que se observa divergência no total de área afetada, fruto da análise de parâmetros diferentes empregados na medição do fenômeno.

Tabela 8. Indicadores de desertificação utilizados por quatro autores.

<b>FERREIRA et al. (1994)</b>	<b>EMBRAPA (1994)</b>	<b>LEMOs (1995)</b>	<b>MMA (1998)</b>
Densidade demográfica	Precipitação	Evolução da cobertura vegetal	índice de aridez
Sistema fundiário	Classe de solo	Evolução da produtividade do feijão	Antropismo
Mineração	Relevo	Evolução da produtividade do milho	
Qualidade da água	Sensibilidade à erosão	Evolução da capacidade de suporte das pastagens	
Salinização	Tempo de ocupação	Cobertura vegetal 1985	
Tempo de ocupação			
Mecanização			
Estagnação econômica			
Pecuarização			
Erosão			
Perda de fertilidade			
Área de preservação			
Defensivos agrícolas			
Área agrícola			
Bovinocultura			
Caprinocultura			
Ovinocultura			
Evolução demográfica			
Susceptibilidade à desertificação			

Fonte: SECTMA, 2004.

Tabela 9. Área afetada pela desertificação segundo três autores.

Degradação	Ferreira et al. (1994)	EMBRAPA (1994)	MMA (1998)
Muito Grave	52.425	118.667	98.595
Grave	247.831	31.616	81.869
Moderada	365.285	21.841	393.897
Total	665.543	172.124	574.361

Fonte: SECTMA, 2004.

Segundo SECTMA (2004), uma relação de indicadores foi organizada recentemente pelo IICA (Tabela 10), na intenção de uniformizar os indicadores para os estudos de monitoramento dos processos de desertificação no Nordeste do Brasil, que tem sido uma das regiões prioritárias de estudos sobre o tema da desertificação.

Tabela 10. Indicadores de desertificação definidos durante a reunião coordenada pelo IICA, em fevereiro de 2003. Fonte: SECTMA (2004).

INDICADORES DE DESERTIFICAÇÃO CONSENSUADOS			
Indicador de Desertificação	Importância	Abrangência	Como Medir
Cobertura vegetal	1	N	% Área cobertura/área total
Biomassa da caatinga	2	N	Massa foliar tonelada/ha ou m <sup>3</sup> /ha
Biodiversidade vegetal	1	L	Inventário florístico (espécie/ha)
Desmatamento	1	N	Variação da cobertura
Presença de espécies indicadoras	1	L	Inventário florístico (espécie/ha)
Consumo produtos vegetais Lenha/consumo	1	N	Tonelada/ha/ano
Consumo produtos vegetais consumo/oferta	1	N	Tonelada/ha/ano
Fauna (diversidade, densidade, distribuição)	2	L	Inventário faunístico
Uso do solo	1	N	Área/classe de uso
Grau de erosão	1	N	Tipo de classe/ha
Grau de salinização	1	L	Classe
Área salinizada	1	N	Área salinizada/área total irrigada
Sobrepastoreio	1	N	(Carga animal/ha)/capacidade de suporte
Albedo de superfície	2	N	I/R classe/área
Uso das águas superficiais e subterrâneas			Oferta/demanda
Oferta/Demanda - Estresse hídrico - IPH	1	N	Vazão (m <sup>3</sup> /s)

Água armazenada a céu aberto	1	N	Estimativa volume (área/ha)
Qualidade da água (IQA 9 parâmetros)	1	L	Índice de qualidade da água
Assoreamento/Sedimentação	1	L	Descarga sólida/descarga líquida
Mananciais superficiais ( vazão - tempo)	1	L	m <sup>3</sup> /s - (vazão rios)
Poços (vazão - tempo)	2	L	Teste de bombeamento (m <sup>3</sup> /h) DNPM
Densidade demográfica (urbana, rural)	1	N	hab/km <sup>2</sup>
Taxa de migração líquida	2	N	$TM = (M / (((E+R)/2) * N)) * 1000$
Taxa média de crescimento populacional anual	2	N	$(Pt2 - Pt1) - 1$
Estrutura da idade			$P(0 - 19 \text{ anos}) / Pt * 100$
PEA/GÊNERO	1	N	$P(20 - 59 \text{ anos}) / Pt * 100$
% de mulheres chefes de famílias	1	N	$(\text{Mulheres chefes de família} / \text{total famílias}) * 100$
Renda agrícola das famílias/renda total por famílias	1	N	$(\$ \text{ agrícola família} / \$ \text{ família})$
Auto consumo%	1	L	$\$ \text{ auto consumo} / \$ \text{ produção}$
Incidência de pobreza	1	N	IDH índice de pobreza
Enfermidades maior incidência (veiculação hídrica)	1	N	nº de atendimento SUS
Saneamento (serviço sanitário)	1	N	% de residências rurais que possuem sanitários
Mortalidade infantil	1	L	Mortos até 5 anos/1000
Escolaridade	1	L	Média de anos na escola
Estrutura fundiária	1	L	Distribuição de classes das propriedades Quantos Proprietários Coeficiente de GINI

N = Escala nacional L = Escala local

De acordo com ARAÚJO (2002), para seleção de indicadores consistentes e confiáveis, faz-se necessária uma base científica que produza informações capazes de caracterizar, delimitar e contextualizar causas e efeitos da Desertificação no Nordeste do Brasil. Mais do que uma matriz de indicadores, a avaliação quali-quantitativa e o monitoramento dos fatores relacionados ao processo – Clima, Recursos Hídricos, Solo e Biocenose, são imprescindíveis.

Os indicadores selecionados para esta pesquisa são: Temperatura, Fluxo de Calor no Solo, Emissividade, Albedo, NDVI e Potencial Natural de Erosão, caracterizando os fatores Clima, Solo e Vegetação, sendo necessário associar valores de referência em relação ao estado do ecossistema com os valores encontrados no modelo aqui proposto. A partir destes indicadores gera-se um equacionamento destas variáveis para modelar o grau de desertificação. Isto será visto na seção 8.3.

### 6.1.1 Índices de vegetação

Os índices de vegetação (IV) são comumente desenvolvidos pela combinação de duas ou mais bandas espectrais (QI *et al.*, 1994), e visam uma melhor caracterização da vegetação quando comparada a uma única banda. Um dos IVs mais usados é o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), mostrado na equação 1.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

onde  $\rho_{NIR}$  é a reflectância no infravermelho e,  $\rho_{RED}$  é a reflectância no vermelho.

O índice de vegetação perpendicular (PVI) (RICHARDSON e WIEGAND 1977) é mostrado na equação 2.

$$PVI = \alpha \rho_{NIR} - \beta \rho_{RED} \quad (2)$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros do solo. PVI e NDVI são índices de vegetação primariamente relacionados com os parâmetros biofísicos da vegetação (WIEGAND *et al.*, 1991). Alguns problemas relacionados a estes índices existem devido ao efeito de fatores externos, tal como o efeito do solo (QI *et al.*, 1994).

O PVI é funcionalmente equivalente ao índice de vegetação da diferença ponderada (WDVI) (QI *et al.*, 1994), expresso pela equação 3.

$$WDVI = \rho_{NIR} - \gamma \rho_{RED} \quad (3)$$

onde  $\gamma$  é a declinação da linha do solo. A linha do solo é uma linha hipotética no espaço espectral que descreve a variação na reflectância do solo e foi inicialmente desenvolvido para o índice perpendicular da vegetação (BASTIAANSEN, 1998).

Para reduzir o efeito do solo, HUETE (1988) propôs o uso de um fator de ajustamento do solo, denominado  $L$ , para computar variações no solo e formulou o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI), conforme a equação 4.

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \times (1 + L) \quad (4)$$

onde L é o fator de ajustamento do solo.

Segundo ELVIDGE e CHEN (1995), tem sido observado que variações nas propriedades espectrais das rochas e dos materiais do solo podem ter efeitos adversos nos índices de vegetação, especialmente em baixos níveis de cobertura vegetal.

Com 40% de cobertura verde, o nível de ruído no NDVI (0,18) é aproximadamente 10 vezes mais que o SAVI (<0,02) e quatro vezes mais que o WdVI (0,04) (Tabela 11). Isto corresponde a uma incerteza na estimativa da vegetação de  $\pm 23\%$  de cobertura verde para o NDVI,  $\pm 7\%$  de cobertura para o WdVI, e  $\pm 2,5\%$  para o SAVI (QI, 1994).

Tabela 11. Variação nos índices de vegetação em relação ao ruído do solo.

Modelo	Ruído do solo	Incerteza
NDVI	0,18	$\pm 23$
SAVI	<0.02	$\pm 2,5$
WdVI	0,04	$\pm 7$

Fonte: QI *et al.* (1994).

Tanto o NDVI como o WdVI variam com a reflectância do solo, mas de maneira inversa, isto é, solo com características mais escuras (ou molhado) resultam em um valor do NDVI mais alto e valores de WdVI baixos, e para solos com características mais claras (ou secas) o NDVI teria valores mais baixos e o WdVI teria valores mais altos, para quantidades idênticas de vegetação. Para diminuir a sensibilidade do ruído do solo, uma aproximação para a função L é deixar que L seja o produto do NDVI e WdVI, para que cancele ou minimize o efeito do brilho do solo. Com isso QI *et al.* (1994) desenvolveram o SAVI modificado, segundo a equação 5.

$$L = 1 - 2\gamma \text{NDVI} \times \text{WdVI}, \quad \text{MSAVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}} + L} (1 + L) \quad (5)$$

onde  $\gamma$  é o parâmetro primário da linha do solo (igual a 1,06).

A função L tende a negativo quando o produto do NDVI e WdVI aproxima-se de 0,5, que requer um valor de 0,7 para o NDVI e WdVI. Para regiões áridas e semi-áridas, nenhum desses dois índices chega ao valor de 0,7, então, o valor empírico L varia entre 0 e 1.

O efeito da inclinação red-NIR pode ser observado nos valores dos índices de vegetação para o NDVI, SAVI e PVI, onde um dossel sobre um solo com características vermelhas produziu maiores valores de índices de vegetação que sobre um solo com características escuras (ELVIDGE e CHEN, 1995).

No estudo realizado por HUETE e WARRICK (1990) o índice de vegetação ajustado (SAVI) minimizou as variações temporal e espacial no comportamento espectral do solo e foi útil na análise da vegetação e em análise qualitativa da condição do solo.

Já que a perda de água no solo não é espacialmente uniforme, todos os três estágios de conteúdo de água no solo (úmido, transição entre úmido e seco, e seco) podem contribuir para uma resposta integrada da energia refletida/emitida em escala de pixel.

FRANKLIN *et al.* (1993) compararam o SAVI com o NDVI. Em locais com arbustos o SAVI para solo sombreado foi menor que o NDVI e mais similar com solo iluminado. O SAVI foi menor para componentes da vegetação verde tal como arbustos (valores de 0,2 a 0,3) que o NDVI (valores de 0,4 a 0,7) enquanto os valores para ambos os índices em solo descoberto é semelhante (valores de 0,1 a 0,2).

Um método padrão para monitoramento da vegetação é através do infravermelho. Os índices, nos quais se inclui o NDVI, têm mostrado bons resultados na detecção de biomassa em áreas áridas usando dados do Landsat e NOAA (RINGROSE e MATHESON, 1987).

COSTA, *et al.* (2002) realizaram mapeamento da fitomassa, encontrando as seguintes relações expressas nas equações 6 e 7.

$$DW_{total} = -980,47 + 11851,25 * PAI \quad (6)$$

$$PAI = 0,6401 \times \exp(2.6929 \times NDVI) \quad (7)$$

onde:  $DW_{total}$ : peso seco total;  
PAI: Índice de área de planta.

A fitomassa pode ser um dado para o zoneamento de áreas susceptíveis, quando associado com outros parâmetros como solo, topografia clima, uso da terra, etc. (COSTA *et al.*, 2002).

Em um trabalho realizado por PALMER e ROOYEN (1998), o NDVI mostrou áreas com alto verdor durante 1994. Altos valores de NDVI foram associados como quatro

características estruturais dominantes na paisagem: cavidades salinas naturais onde o crescimento de algas é responsável por sinal forte; dunas expostas com nenhuma árvore ou cobertura herbácea; dunas degradadas com alta biomassa arbórea e baixa cobertura herbácea, e dossel ativo de *Rhigozum trichotomum* e corpos d'água artificiais. A maior área de dunas de areias expostas também influencia a reflectância no vermelho e infravermelho em condições de degradação, com os maiores valores no infravermelho sendo registrado para dunas não-vegetadas.

### 6.1.2 Temperatura e Emissividade

Muitas experiências com processos de desertificação foram adquiridas durante experimentos de campo, tais com o EFEDA (BOLLE *et al.* 1993, citado por SCHÄDLICH *et al.* 2001), que focou na interligação entre superfície e atmosfera, e investigou a relação entre quantidades sensoriadas remotamente e características da superfície do solo.

Somente o sensoriamento remoto pode suprir em longo prazo e para grandes áreas observações necessárias para detectar desertificação. Tendências quanto à desertificação ou mudanças na superfície do solo podem ser detectadas antecipadamente por monitoramento de vários parâmetros de superfície. Um parâmetro chave é a mudança diurna da *land surface temperature* (LST), que pode ser derivada de dados de satélite. Pela falta de conhecimento, a emissividade da superfície é freqüentemente fixada como constante. Para áreas com pequena variação de emissividade esta aproximação é justificada (ex. para superfícies vegetadas com baixa variação de altura em relação à superfície é tipicamente  $\pm 0,01$ , e causa erro na LST de  $\pm 2K$ ) (SCHÄDLICH *et al.*, 2001).

KERR *et al.* (1992) modificaram o algoritmo *Split Window Technique* (SWT) para derivar temperatura da superfície com precisão melhor que 1,5K, para regiões áridas e semi-áridas. Alguns passos do algoritmo seguem aproximações empíricas. Para trabalhar sobre áreas com vegetação esparsa, o algoritmo leva em conta a fração do dossel derivado do NDVI.

FRENCH *et al.* (2000) discriminaram diferença entre vegetação senescente e solo exposto, utilizando o infravermelho termal (8 - 12 $\mu$ m). Esta discriminação foi realizada pela computação das emissividades da banda termal no algoritmo *temperature-emissivities separation*, e depois classificada as feições da superfície baseada no contraste espectral da emissividade. Quando o conhecimento da amplitude da emissividade é combinado com o índice de vegetação, tal como NDVI, a superfície pode ser classificada por um sistema

ternário: solo exposto, vegetação verde, e vegetação em senescência. O benefício desta técnica é que predições do fluxo de calor podem ser baseadas em uma representação mais acurada da superfície que outros realizados por esquemas de classificação da superfície no visível e infravermelho.

Segundo BASTIAANSEN e BAKKER (2000) uma expressão comum usada para determinar a temperatura da superfície a partir de medidas de radiância não-corrigidas direto da banda 6 do Thematic Mapper é a equação 8.

$$T^{\text{rad}} = \frac{1260}{\ln\left(\frac{61,6}{B_{\text{TM6}}} + 1\right)} / \varepsilon^{0,25} \quad (\text{K}) \quad (8)$$

$T^{\text{rad}}$  = Temperatura em radiância (K);

$B_{\text{TM6}}$  = Radiância termal;

$\varepsilon$  = Emissividade da superfície;

A emissividade de um objeto depende das propriedades físicas do material e da forma, rugosidade e geometria da superfície emissora e suas condições. A emissividade varia de 0 a 1. Um corpo negro tem a emissividade igual a 1, enquanto uma emissividade 0 significa que o objeto é um perfeito refletor. A emitância pode ser matematicamente igual ao processo de absorção, assumindo que toda radiação absorvida é re-emitida, conforme a equação 9.

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - r(\lambda) \quad (9)$$

onde:  $r(\lambda)$  = reflectância espectral na região do infravermelho termal.

Segundo GOÏTA *et al.* (1997) geralmente a emissividade da superfície aumenta com a densidade de cobertura vegetal.

GOÏTA *et al.* (1997), formularam equação 10 para derivar a emissividade da superfície com imagens AVHRR:

$$\epsilon_3 = 1 - \frac{L_3(T_3) - TISL_{3j}L_3(T_j)}{\frac{1}{\pi} E_{sun_3} dt_{d3} \cos(\theta_s) + L_{ad3}} \quad (10)$$

onde:  $L_3(T_3)$  = radiância termal;  
 $TISL_{3j}$  = temperatura espectral;  
 $E_{sun}$  = irradiância solar;  
 $d$  = distância sol-terra;  
 $t_{d3}$  = transmitância espectral;  
 $\theta$  = ângulo zenital solar;  
 $L_{ad3}$  = radiância atmosférica.

Uma aproximação simples para estimar a emissividade, é pelo cálculo do índice de vegetação da diferença normalizada, NDVI (BASTIAANSEN e BAKKER, 2000), conforme a equação 11.

$$\epsilon_{(8-14)} = 1,009 + 0,047 \text{LnNDVI} \quad (11)$$

onde NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada.

### 6.1.3 Albedo

Segundo ROBINOVE *et al.* (1981), imagens albedo podem ser derivadas diretamente de imagens digitais do Landsat. Uma seqüência de imagens albedo pode ser diferenciada para mostrar mudanças. Mudanças podem ser mapeadas em um nível de percentagem selecionada, para mostrar a localização, o padrão, quantidade, e direção (aumento ou diminuição) na mudança do albedo.

Áreas analisadas por ROBINOVE *et al.* (1981) mostraram que um aumento no albedo é primeiramente devido ao solo exposto e por desmatamento, e que uma diminuição no albedo era primeiramente devida ao aumento da umidade do solo e aumento na densidade da vegetação.

ACCIOLY *et al.* (2001) estudaram as mudanças no albedo no núcleo de desertificação do Seridó por meio de imagens Landsat 5 TM e verificaram que o albedo aumentou em áreas ocupadas principalmente por solos Bruno Não-Cálcicos, Litólicos e em áreas onde há predominância de afloramentos de rochas. Os solos Bruno Não-Cálcicos e Litólicos são, também, reconhecidamente mais suscetíveis à erosão. No caso dos solos litólicos a hipótese mais provável é a de que esse aumento esteja associado à exploração de lenha em áreas que no passado eram mantidas preservadas.

Estudos apresentados na Assembléia Geral da ONU relatam a utilidade do uso de dados de satélite para estimar albedo da superfície, emissividade da superfície, temperatura da superfície e parâmetros físicos relacionados. Algoritmos têm sido usados para estimar o albedo da superfície por utilização eficaz de dados de informações de satélite (ONU, 2001).

A redução da cobertura vegetal também aumenta o albedo, que é a reflectância da superfície na faixa de 0,3 a 3,0 $\mu$ m. Sob circunstâncias específicas, um aumento no albedo reduz a precipitação local, intensificando o processo de desertificação. Logo, a vegetação é um fator principal na desertificação. Sua perda promove a desertificação, e a desertificação impede sua regeneração (Convention to Combat Desertification, UN, 1998).

A fórmula 12 expressa o cálculo do albedo da superfície:

$$r_o = \frac{r_p - r_a}{\tau_{sw}^2} \quad (12)$$

onde:

$r_o$ : albedo da superfície;

$r_p$ : reflectância planetária (soma da multiplicação da reflectância de cada banda pelo seu peso);

$r_a$ : reflectância da atmosfera (0,03);

$\tau_{sw}$ : transmitância atmosférica, determinada pela iteração com o pixel mais escuro (água).

#### 6.1.4 Fluxo de calor no solo

CARVALHO (2001) relata que medida indireta de parâmetros como evapotranspiração, radiação líquida e fluxo de calor no solo, vem sendo avaliada de forma sistemática por aplicação de sensoriamento remoto para estudos de desertificação.

A radiação global,  $R_n$ , aquece a superfície durante o dia, o que induz um gradiente de temperatura entre a superfície e a subsuperfície. Devido à diferença de temperatura, o fluxo de calor do solo será estabelecido, e que pode ser calculado segundo a equação 13 (BASTIAANSEN e BAKKER, 2000).

$$G_o = \lambda_{soil} \frac{\delta T_{soil}}{\delta z} \quad (Wm^{-2}) \quad (13)$$

onde  $G_o$  ( $W/m^2$ ) é o fluxo de calor no solo,  $\lambda_{soil}$  ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ) é a condutividade térmica do solo,  $T_{soil}$  (K) é a temperatura e  $z$  (m) é a profundidade. Nenhum desses parâmetros pode ser estimado por sensoriamento remoto; então uma solução empírica foi formulada. Essa

solução é baseada na radiação global, sendo ela o mecanismo para o fluxo de calor no solo, a temperatura da superfície  $T_o$ , representa  $\delta T_{soil}$  e o albedo da superfície  $r_o$  representa a  $\lambda_{soil}$ .

A equação 14 expressa o cálculo do fluxo do calor no solo

$$\frac{G_o}{R_n} = \frac{T_o}{r_o} (0,0032r_o + 0,0062r_o^2) (1 - 0,978NDVI^4) \quad (14)$$

onde, a temperatura da superfície é em graus centígrados e o albedo da superfície, adimensional. O  $R_n$  foi determinado pela equação 27.

### 6.1.5 Modelos Propostos

Na literatura tem-se modelos propostos para modelar a desertificação usando mais de um indicador. A seguir são mostrados.

LIU *et al.* (2002) determinaram a fórmula 15 para identificar riscos à desertificação:

$$D_j = \sum_{i=1}^n P_{ij} C_i^{-q} \quad (15)$$

onde  $D_j(0 \leq D_j \leq 1)$  representa o risco da degradação da terra em uma região  $j$ ;  $C_i$  é o estágio ou grau de degradação do solo em uma dada unidade;  $P_{ij}$  refere-se à percentagem de área da região ( $j$ ) tendo o grau  $i$  de degradação;  $n$  é o número de graus  $i$ ; e  $q$  é o expoente do grau, tendo valor empírico de 1,5. Para a determinação da degradação do solo foram avaliados 4 indicadores: cobertura vegetal, deslocamentos de areias, razão anual de desertificação e pressão populacional, sendo o peso maior dado à cobertura vegetal (LIU *et al.*, 2002).

No trabalho de LIU *et al.* (2003), foram utilizados quatro parâmetros para determinar níveis de degradação. Antes da junção dos parâmetros, foi realizada uma conversão numérica através de uma função linear.

MOUAT *et al.* (1997) usaram a combinação de 5 indicadores, com pesos iguais, conforme a equação 16.

$$\text{Avaliação da desertificação} = (E + PSDI + GP + WI + NDVI) \quad (16)$$

onde  $E$  é o risco de erosão;  $PSDI$  é o índice de severidade de seca de Palmer;  $GP$  pressão de pastoreio;  $WI$  representa espécies de plantas invasoras em relação à percentagem total

de cobertura vegetal; e NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada. Para o cálculo do risco de erosão foi utilizada a erodibilidade, o comprimento da encosta e a morfologia do solo. O PSDI foi derivado da média mensal da temperatura e precipitação, junto com a umidade do solo. O PSDI representa a disponibilidade de umidade. A pressão de Pastoreio foi determinada pela quantidade de animais que a pastagem suporta por mês – AUMs, que foi simulado usando a combinação da distribuição das terras em termos propriedades, clima e verdor da vegetação. Para o cálculo de espécies invasoras foram realizadas amostragens em campo em diferentes comunidades vegetais. Os valores locais de WI foram, posteriormente, extrapolados para a escala regional. O NDVI foi determinado pelas reflectâncias do infravermelho próximo e vermelho do AVHRR.

No trabalho de MOUAT *et al.* (1997) foram utilizados cinco parâmetros. No seu trabalho não foram associados pesos aos parâmetros, uma vez que para isso seria necessário ter um entendimento completo sobre as variáveis que estão sendo aplicadas para o estudo de um determinado ambiente. Para unificar os valores, os indicadores estudados foram escalados de um a cinco, onde o valor um representa baixo risco e o valor cinco representa alto risco de desertificação. Os valores de cada indicador foram somados para criar uma única camada, que resultou em uma amplitude teórica de valores de susceptibilidade de cinco a vinte e cinco. Estes valores foram reescalados de um a cinco para determinar o acesso à desertificação.

KAZMIERCZARK (1998) elaborou um algoritmo (equação 17) envolvendo seis variáveis.

$$[ISD_{NEB}] = Ppt + Ppe + IR + NDVI + Uso + Ero \quad (17)$$

onde Ppt é a precipitação, Ppe e a pressão exercida pela pecuária, IR e o Índice de Rapelli, NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada, Uso é o uso da terra e Ero é o potencial de erodibilidade. Cada variável foi dividida em 5 classes ( de 1 até 5, sendo 5 para a susceptibilidade mais alta). O  $ISD_{NEB}$  varia de 6 a 30. Segundo KAZMIERCZAK (1998) todos os resultados apresentados são hipotéticos, sendo necessário uma validação.

## 6.2 Tecnologias da Geoinformação Aplicada aos Indicadores da Desertificação

Em ONU (2001), destaca-se a importância do sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica e fotogrametria na aplicação de manejo dos recursos naturais, em

particular no manejo de recursos hídricos, desertificação, uso do solo, poluição ambiental e mudanças no ecossistema de regiões áridas.

Segundo COLLADO *et al.* (2002), informações geradas de análises espectrais de imagens Landsat são significantes para monitorar sinais de processo de desertificação conectado com o mau uso da terra em relação a padrões de pluviosidade. Neste trabalho foram analisadas duas épocas: 1982 (período árido) e 1992 (maior pluviosidade). Em 1992 não é observada uma recuperação na vegetação com respeito ao período árido de 1982.

Durante as últimas décadas, o papel das técnicas espaciais no monitoramento e mapeamento da desertificação tem sido investigado por muitos pesquisadores. Para obter uma análise mais geral do problema utiliza-se sensoriamento remoto. É necessário associar este estudo ao trabalho de campo (verdade terrestre) para gerar resultados mais confiáveis. Neste contexto o sensoriamento remoto tem um papel importante como uma ferramenta suplementar devido os sensores do satélite proverem uma perspectiva rápida e econômica até mesmo em áreas mais difíceis. Dentro desta perspectiva, o sensoriamento combina todas as vias de investigações para acessar problemas de desertificação com maior eficácia (ALI e MIRZA, 1993).

A figura 25 mostra um diagrama dos parâmetros envolvidos no processo de desertificação e suas respostas. Neste diagrama temos inicialmente distúrbios gerados pela ação antrópica (ação humana) que levam a um desequilíbrio no ecossistema (dossel vegetal e solo). Conseqüentemente diminui-se a Biomassa e aumenta-se da erosão hídrica e eólica. Tem-se com isto a geração de tempestade de poeira provocando a perda do solo. Por conseqüência diminui-se a fertilidade do solo e produtividade dos cultivos. Essa diminuição na cobertura vegetal instiga o aumento no albedo, por conseqüência tem-se a diminuição na superfície de rugosidade e o aumento dos aerossóis. Um ciclo de degradação antrópica sobre a vegetação pode ser identificado na figura 8. Portanto nesta figura tem-se a ação degradadora humana sobre a vegetação que aumenta o albedo e que diminui a rugosidade da superfície provocando a seca que gera pressão sobre a vegetação. Alguns desses parâmetros podem ser determinados por sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto por satélite pode prover dados estatísticos sinópticos sobre feições do meio ambiente. O uso de sistema de informações geográficas (SIG) ajuda a determinar o mecanismo da degradação, promovendo informações valiosas em locais com vários graus de desertificação (GHOSH, 1992).

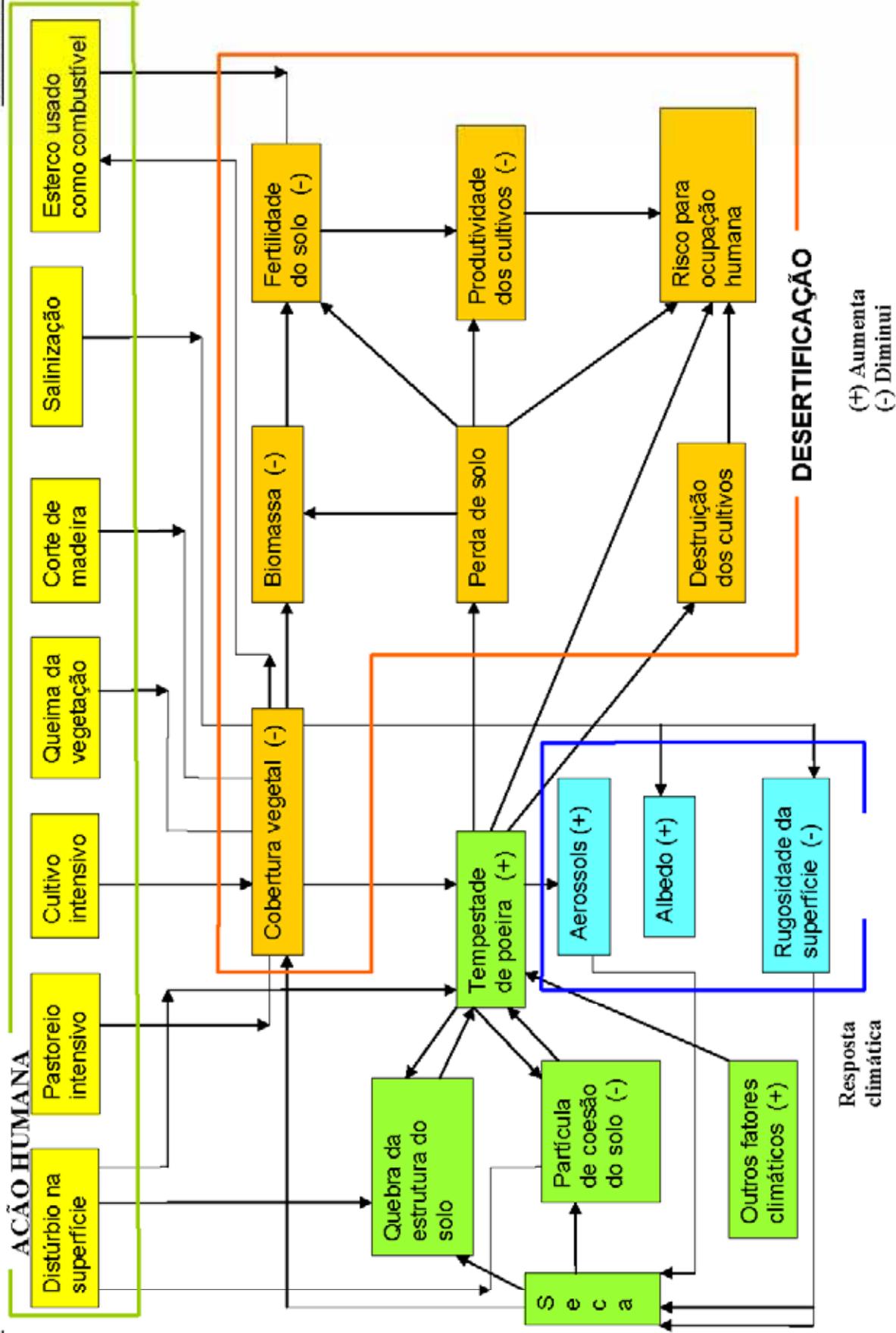


Figura 25. Fluxograma dos processos da desertificação. Fonte: UNEP, 1999.

## 7. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (EUPS)

O uso e o manejo inadequado dos solos são apontados como as principais causas de origem antrópicas relacionadas com o processo de desertificação. O extrativismo vegetal e mineral, como também o superpastoreio das pastagens nativas ou cultivadas e o uso agrícola por culturas que expõem os solos aos agentes da erosão são as principais causas dos processos de desertificação (ACCIOLY, 2000). Um indicador de processos de desertificação apontado por RODRIGUES (1997), que tem sido usado com frequência, são as perdas de solo por erosão.

Segundo ACCIOLY *et al.* (2004) o modelo da Equação Universal de Perdas de Solo expresso na equação 18, definido por WISCHMEIER & SMITH (1978), tem sido o mais utilizado para avaliação do potencial de perdas de solo por erosão, e foi desenvolvido para o uso do serviço de conservação do solo e outras agências do governo dos EUA:

$$P_u = R.K.L.S.C.P_c \quad (18)$$

onde  $P_u$  = perda de solo por unidade de área,  $t.ha^{-1}$ ;  $R$  = erosividade da chuva,  $Mj.ha^{-1}mm.h^{-1}$ ;  $K$  = erodibilidade do solo,  $(t.ha^{-1})/(Mj.ha^{-1}mm.h^{-1})$ ;  $L$  = comprimento de rampa, adimensional;  $S$  = declividade do terreno, adimensional;  $C$  = fator que considera o uso e manejo do solo, adimensional;  $P_c$  = fator que considera as práticas conservacionistas, adimensional.

### 7.1 Erodibilidade dos solos

A erodibilidade de um solo é função de sua estabilidade estrutural. No caso de erosão laminar, há destruição dos agregados pela energia cinética das gotas de chuva, dissociação dos componentes granulométricos e separação das partículas de argila, silte e areia (LEPRUN, 1986). Quanto maior for a estabilidade dos agregados, maior será a resistência à erosão e, conseqüentemente, menor será o fator de erodibilidade do solo (LEPRUN, 1986; VIEHA 2002).

Em estudos realizados no Nordeste (LEPRUN, 1986), foi possível estabelecer uma classificação relativa, em três categorias de erodibilidade:

- Erodibilidade fraca: Latossolos Amarelos, Vermelhos Amarelos, Vermelhos Amarelos Distróficos, Solonchak e solos Salinos Costeiros, solos Litólicos, solos Aluviais, Areias Quartzosas Continentais e Marinhas, solos Hidromórficos, Podzols;

- Erodibilidade moderada: Latossolos Vermelhos Escuros, Podzólicos Vermelhos Amarelos, solos Brunos Não-Cálcicos, Cambissolos, Brunizens, Vertissolos, Rendizinas, solos Calcimórficos indiscriminados, Regossolos, solos indiscriminados concrecionários e Lateritas;
- Erodibilidade forte: Podzólicos Vermelhos Amarelos Equivalentes Eutróficos, Terras Roxas, Planossolos, Solonetz Solodizados.

COHEN *et al.*, (2005) realizaram estudo de perda de solos baseado em cinco classes de erodibilidade de acordo com o tipo de solo. Baseado nessas classes e nos dados de textura e conteúdo de matéria orgânica, valores numéricos de K foram estimados usando a primeira aproximação de nomógrafo convencional.

O valor K representa a perda de solo por unidade de área determinada em função de  $EI_{30}$  (E é a energia em  $Mj/m^2$  e I é a intensidade da chuva em  $mm/h$ ) medido no campo numa área padrão com comprimento de 22,1 m e 9% de declividade (VEIHE, 2002).

Muitas tentativas têm sido feitas para obter o índice de erodibilidade baseadas em propriedades do solo determinadas em laboratório ou no campo (VEIHE, 2002).

GEDDES e DUNKERLEY (1999) realizaram um experimento sobre a influência da serrapilheira no efeito erosivo das gotas de chuvas e das gotas provenientes dos arbustos. Os resultados do experimento mostraram que há uma redução significativa no desprendimento de areia numa quantidade relativamente pequena de serrapilheira. A presença de serrapilheira resulta numa diminuição da desestruturação de partículas minerais abaixo da vegetação semi-árida, contribuindo para a microtopografia que é comum em vegetações de deserto, e que por sua vez tem efeitos significativos no caminho e comportamento do escoamento superficial.

VEIHE (2002) realizou mapeamento da erodibilidade, tendo como parâmetros os teores de ferro, alumínio, matéria orgânica, textura, estabilidade dos agregados, entre outros, e relata que um parâmetro importante de erodibilidade que não pode ser relacionado com o tipo de solo é a estabilidade dos agregados. No entanto, o conteúdo de areia e silte, ferro, alumínio, pareceram estar associados com o tipo de solo.

MITRA *et al.* (1998) derivaram o fator K pela reclassificação do mapa de solo para o fator de erodibilidade correspondente, em que o fator K foi espacializado em células de 30m, tendo cada uma o peso correspondente ao valor da erodibilidade do solo.

ACCIOLY *et al.* (2004), em estudo para avaliação de perdas de solos no Seridó-RN, espacializou a erodibilidade com base nas unidades de mapeamento. A erodibilidade variou entre 0,013(t.ha<sup>-1</sup>)/(Mj.ha<sup>-1</sup>mm.h<sup>-1</sup>) para os Neossolos Regolíticos e 0,058 (t.ha<sup>-1</sup>)/(Mj.ha<sup>-1</sup>mm.h<sup>-1</sup>) para os Neossolos Litólicos.

LEPRUN (1986) determinou valores médios de fator K para o Nordeste e os agrupou do seguinte modo:

Tabela 12. Classes de valores de erodibilidade do solo. Fonte: LEPRUN (1986).

Classe	Valor de K	Classe de Solo
Fraca	< 0,1	AQ, LA
Fraca a Média	0,1 < K < 0,3	R, Re, V, NC, PV
Média a Forte	0,3 < K < 0,5	TR, PL
Forte	K > 0,5	SS

AQ=Areias Quartzosas; LA=Latossolo Amarelo; R=Solos Litólicos; Re=Regossolos; V=Vertissolos; NC=Brunos Não-Cálcicos; PV=Podizólicos Vermelhos; TR=Terra Roxa; PL=Planossolos; SS=Solonetz Solodizados.

## 7.2 Erosividade das Chuvas

A erosividade da chuva é definida como o total de energia da chuva ( $E - \text{Mj/m}^2$ ) multiplicada por 30 minutos de intensidade ( $I_{30} - \text{mm/h}$ ) (COHEN *et al.* 2005).

LEPRUN (1986) estabeleceu correlações estreitas entre o fator de erosividade media anual (R) e pluviometria anual (Pa). Na zona do sertão foram analisados 25 postos meteorológicos, e a erosividade foi definida segundo as equações 19 e 20.

$$R = 106,76 * e^{0,002Pa} \quad \text{com } r = 0,94 \quad (19)$$

$$R = 0,13 * Pa^{1,24} \quad \text{com } r = 0,93 \quad (20)$$

No estudo realizado por LEPRUN (1986), foram delimitadas seis zonas de erosividade descritas na tabela 13.

Tabela 13. Erosividade para o Nordeste do Brasil. Fonte: LEPRUN (1986).

Erosividade	Região
R < 230	Sertão mais seco
230 < R < 340	Sertão seco
340 < R < 500	Sertão úmido, Agreste, e Brejo
500 < R < 730	Agreste úmido, Zona pré-amazônica e Mata interior
730 < R < 1000	Mata litoral úmida
R > 1000	Mata litoral muito úmida.

Geralmente o fator R é fixado. MITRA *et al.* (1998) em seu estudo em uma bacia hidrográfica do Arkansas calculou R = 275 para toda bacia. ACCIOLY *et al.* (2004) calcularam o R pela interpolação usando o método de polígonos de Thiessen ou Voronoi, utilizando a fórmula de LEPRUN (1986). Para o cálculo da erosividade COHEN *et al.* (2005) utilizou métodos aproximados (regressão quadrática), devido à disponibilidade de dados.

SILVA (2001) formulou a erosividade através do índice de Fournier, que é expressa na equação 21.

$$R_x = 42,307 * \left( \frac{M_x^2}{P} \right) + 69,763 \quad (21)$$

onde,  $R_x$  é o fator R ( $Mj \text{ mm ha}^{-1}h^{-1}ano^{-1}$ ) para o mês x,  $M_x$  é a precipitação média mensal (mm), e P é a precipitação média anual.

Estudos realizados por SILVA (2004), sobre a erosividade no Brasil mostraram que a região nordeste obteve valores menores em relação às demais regiões do País. Mapa de erosividade representa uma importante fonte de informação sobre o potencial de erosão de uma região, sendo útil para conservação do solo e agrônomos, para implementar medidas necessárias à minimização de perdas de solo.

### 7.3 Fator Topográfico (LS)

O parâmetro L representa o comprimento da encosta e S a declividade.

Para determinação do fator topográfico (LS), COHEN *et al.* (2005) utilizaram o modelo digital do terreno, e extraíram a declividade (S) e o comprimento de rampa (L) separadamente.

COHEN *et al.* (2005) calcularam o fator S através do modelo de Nearing:

$$S_i = -1,5 + \frac{17}{(1 + e^{(2,3-6,1\text{sen}\theta)})} \quad (22)$$

onde S é o fator de declividade, e  $\theta$  é a declividade da célula i, em graus; e para o fator rampa, utilizaram o algoritmo de DESMET e GROVERS (1996):

$$L_{i,j} = \frac{A_{i,j\_out}^{m+1} - A_{i,j\_in}^{m+1}}{(A_{i,j\_out} - A_{i,j\_in})(22,33)^m} \quad (23)$$

onde  $L_{i,j}$  é o fator comprimento de rampa na célula i,j;  $A_{i,j\_in}$  é a contribuição da área da grade de entrada;  $A_{i,j\_out}$  é a contribuição da área da célula de saída; e m é o expoente padrão do comprimento de rampa.

MITRA *et al.* (1998) usaram o comando *r.slop.aspect* do programa GRASS 4.0 para calcular o fator de declividade. ACCIOLY *et al.* (2004) também utilizaram o GRASS com o comando *r.watershed* para determinar o fator topográfico (LS).

KUNSTSCHIK (1996) implementou um modelo para estimativas de perdas do solo em que determinou o fator LS conforme a equação 24.

$$LS = 0,00984 * L^{0,63} * S^{1,18} \quad (24)$$

No trabalho de KUNSTSCHIK (1996), foram utilizadas as técnicas de geoprocessamento, visando identificar dentro da bacia, regiões com maior susceptibilidade à perda de solos por erosão hídrica.

#### 7.4 Práticas de Controle de Erosão

As práticas conservacionistas são utilizadas para evitar perda de solo por erosão utilizando estruturas como: terraço, cobertura morta, plantio em curvas de nível, etc.

No estudo realizado por COHEN *et al.* (2005) para a determinação de perda de solo, o fator Pc foi ignorado, uma vez que estruturas de controle de erosão não são usadas na região de estudo.

ACCIOLY *et al.* (2004), na aplicação da equação de perda de solo no Seridó, não utilizaram o fator Pc, uma vez que as práticas conservacionistas não são utilizadas na região estudada; o mesmo aconteceu no trabalho de MITRA *et al.* (1998).

## 7.5 Uso do Solo

Este fator representa as classes de uso do solo (efeitos da cobertura vegetal e dos restos vegetais).

No trabalho de MITRA *et al.* (1998), as classes do fator C (cobertura vegetal) foram escolhidas baseadas no manual de publicação da EUPS, de acordo com as características vegetais encontradas no local de estudo.

ACCIOLY *et al.* (2004) estimaram o fator C de acordo com dados provenientes da classificação digital e técnicas de realce de imagens do LANDSAT 5 TM, utilizando classificação supervisionada para avaliar o uso atual. Na área de estudo foram identificadas as seguintes classes: caatinga densa, caatinga semidensa, caatinga aberta, pastagem, culturas de vazante e vegetação ribeirinha, solo exposto, zona urbana e açudes. Numa segunda etapa utilizou a relação entre biomassa e NDVI para estratificar a caatinga.

COHEN *et al.* (2005) determinaram o fator de uso do solo pela interpolação de observações de campo utilizando dado de reflectância. Foi utilizada a classificação da imagem pelo método CART (classificação e análise de regressão) para o mapeamento de cultivos e outros tipos de cobertura vegetal. O resultado foi a classificação em cinco categorias.

O Potencial de erosão foi determinado utilizando os planos de informação erodibilidade, erosividade e fator topográfico, conforme descrito por KUNSTSCHIK (1996).

## 8. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em 5 fases. Na primeira, realizou-se a coleta de dados temáticos (solos), numéricos (altimetria e dados pluviométricos) e análise dos modelos; os dados de altimetria foram digitalizados (12 cartas na escala 1:100000) e solos editados no SPRING, para a caracterização pedológica e altimétrica da bacia do rio Brígida, para a formação dos Planos de Informações (PIs) e para a definição do esquema conceitual. Na segunda etapa foram realizados: o registro, mosaicagem e recorte da imagem no formato da Bacia. Na terceira fase foram elaborados programas em LEGAL dos modelos estudos (biofísicos), que estão no Apêndice 10. A quarta etapa foi desenvolvida com a inserção dos dados para o cálculo do Potencial Natural de Erosão – PNE, determinado na programação LEGAL. Na quinta fase, foram realizados os cruzamentos entre planos de informações através da LEGAL com o modelo proposto. E, por fim, foram gerados histogramas e cruzamentos entre as classes de risco, para percepção do avanço da degradação na Bacia do rio Brígida.

### 8.1 Materiais

#### 8.1.1 Dados Orbitais

Os dados orbitais utilizados consistem em imagens TM/Landsat em formato digital, órbita/ponto 217/65 e 217/66. As imagens correspondem ao período de seca e chuva de dois anos diferentes. As imagens foram georreferenciadas em UTM/SAD-69. As especificações dos dados orbitais estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14. Dados orbitais.

Imagem	Data	Formato	Bandas	Projeção/Datum	Local
217/65	24/10/1985	Digital	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM/SAD 69	Norte da Bacia
217/65	15/01/1987	Digital	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM/SAD 69	Norte da Bacia
217/65	04/10/2001	Digital	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM/SAD 69	Norte da Bacia
217/65	03/01/2003	Digital	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM/SAD 69	Norte da Bacia
217/66	24/10/1985	Digital	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM/SAD 69	Sul da Bacia
217/66	15/01/1987	Digital	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM/SAD 69	Sul da Bacia
217/66	04/10/2001	Digital	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM/SAD 69	Sul da Bacia
217/66	03/01/2003	Digital	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM/SAD 69	Sul da Bacia

### 8.1.2 Dados Topográficos

Os dados de curvas de nível foram digitalizados no Maxcad referentes às cartas topográficas descritas na tabela 6. A altimetria foi utilizada para o cálculo de perdas de solo na Bacia. As cartas topográficas também foram utilizadas para o georreferenciamento das imagens.

### 8.1.3 Modelos Biofísicos

Os algoritmos utilizados na Bacia do Brígida para caracterização da degradação ambiental foram: emissividade, albedo, ndvi, fluxo de calor e temperatura, que estão descritos no Capítulo 6.

### 8.1.4 O modelo EUPS

Para o cálculo do Potencial de Perdas de Solo, utilizaram-se os três primeiros termos da EUPS, ou seja, erodibilidade, erosividade e o fator LS. Para isso adquiriram-se dados pluviométricos, mapa de solo e altimétrico. O PNE foi utilizado no modelo proposto.

### 8.1.5 Dados Temáticos

Os Mapas temáticos utilizados foram de solos, adquirido no ZAPE (2001) e editado no SPRING (formação matricial e numérica), para geração do mapa temático erodibilidade. Outro mapa temático utilizado foi o de pluviosidade média anual, gerado no SPRING a partir de dados de precipitação média anual (Figura 26).



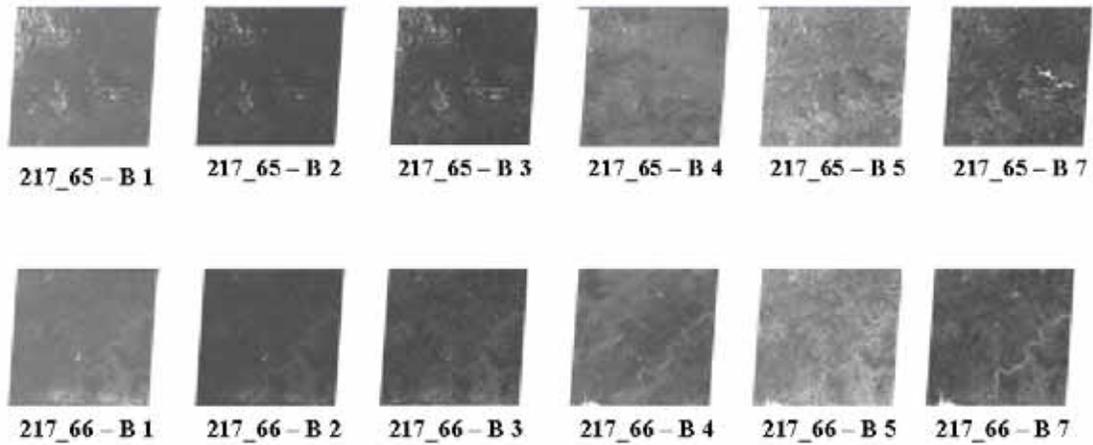


Figura 27. Dados orbitais para registro e mosaicagem.

Após o registro das imagens foi realizado o processo de mosaicagem das imagens (figura 28); para isso é necessário que estejam georreferenciadas.

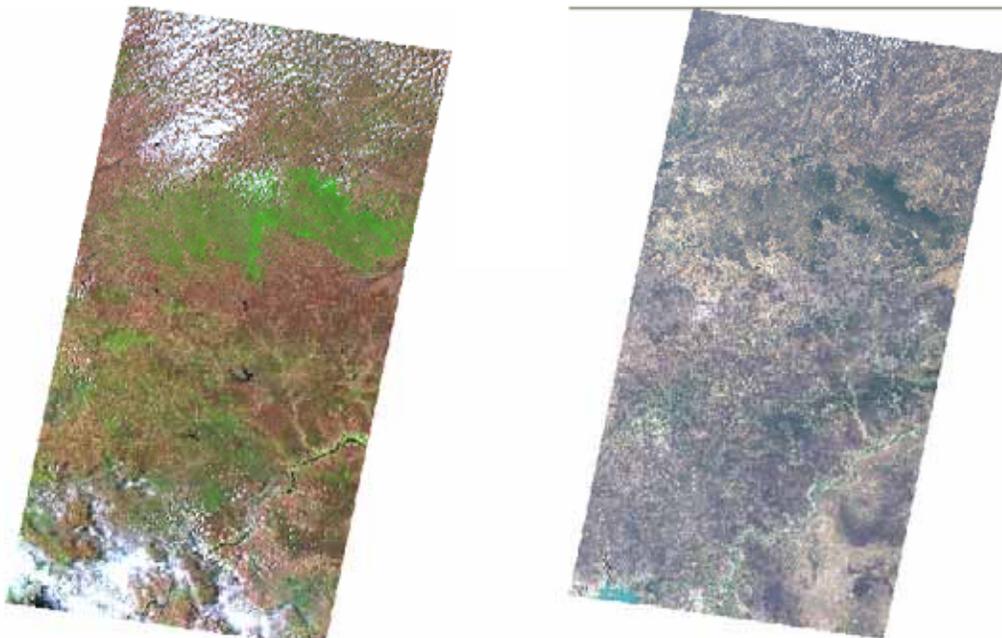


Figura 28. Mosaico das duas cenas 217/65 e 217/66 de 1987 e 2001.

Depois de registradas as imagens, foi realizado o recorte das mesmas (Figura 29) no formato da Bacia, realizado no SPRING através de um programa desenvolvido em LEGAL (ver Apêndice 10).

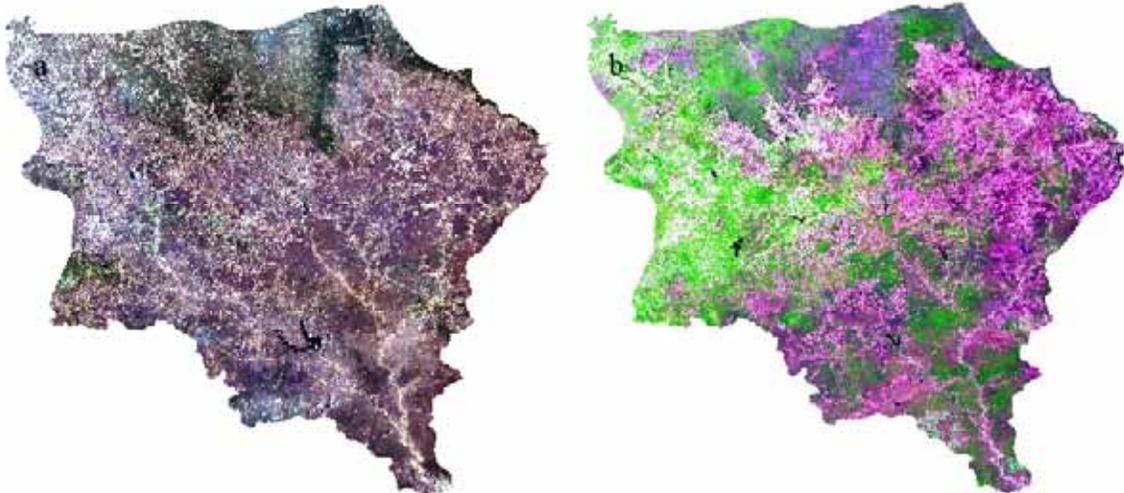


Figura 29. Recorte da imagem no formato da bacia (a)1985 e (b)2003.

### 8.2.2 Cruzamento dos Planos de Informação

Neste trabalho foi definido o banco de dados Brígida e em seguida dois projetos. Um *brigm* (que contém dados referente às imagens e parâmetros biofísicos) e outro *brigmP* (referente a dados temáticos de solo, erosividade, erodibilidade, altimetria, drenagem e bacia). Vale ressaltar que para o cruzamento e desenvolvimento de algoritmos em LEGAL. A execução de um programa em LEGAL não é possível, sendo indispensável importar o PI necessário, para um dos projetos, no formato *grib*, para a execução do programa e/ou cruzamento dos planos.

Segundo ANDRADE (1998), um projeto é usualmente composto por um conjunto de níveis, camadas ou planos de informação (PIs), que variam em número, tipos de formatos e de temas, conforme as necessidades de cada tarefa ou estudo. Por exemplo, para um estudo de uso atual do solo e de seus impactos sobre o ambiente de uma região, definida em um projeto, é necessário que tal projeto seja composto de PIs necessários ao objetivo proposto.

A digitalização e programação dos dados para a criação dos diferentes planos de informações culminam com a formação do esquema conceitual. Ele representa o desenvolvimento do algoritmo de interpolação e de cruzamento de dados, para a aplicação em um modelo, que permitirá uma resposta baseada em simulação matemática das interações entre as variáveis ambientais que nesta pesquisa procura-se resposta quanto ao grau de degradação e risco à desertificação.

Os dados pertencentes a cada plano de informação formarão o conjunto dos valores para cada variável ambiental, fisiográfica ou climática.

A tabela 15 apresenta o banco de dados georreferenciados da Bacia do Rio Brígida, que contém os planos de informação desenvolvidos no SPRING.

Tabela 15. Banco de dados georreferenciados da bacia do rio Brígida.

<b>Categorias</b>	<b>Planos de Informação</b>	<b>Dados de entrada</b>	<b>Modelo e Descrição</b>
IMAGEM	tm_1, tm_2, tm_3, tm_4, tm_5, tm_6, tm_7	Imagens formato Geotiff	Imagem – Bacia do rio Brígida.
Reflectâncias	Reflec1, Reflec2, Reflec3, Reflec4, Reflec5, Reflec7.	Radiância, distancia sol-terra, grade do angulo zenital solar.	Númérico – reflectâncias para cada banda
IVs	NDVI	Reflectâncias	Imagem e Numérico – espacialização do ndvi na bacia.
Albedo	Asup	Reflectância planetária, transmitância e reflectância no topo da atmosfera	Imagem e Numérico – determinação da energia refletida pixel a pixel.
Emissividade	Emissividade	NDVI	Numérico e imagem
Temperatura	Temp_rad, Temp_thm	Radiância, emissividade, ângulo zenital solar	Imagem e Numérico
Radiação Global	Rn	Radiação onda longa incidente, albedo, temperatura, emissividade, radiação de onda curta incidente	Numérico e Imagem
Fluxo de calor no solo	Go	Rn, albedo, NDVI, temperatura.	Imagem e Numérico
Bacia	Bacia_brig	Vetor	Temático
Drenagem	Fluxo_dren	Vetor	Temático
Grade	Grade_dist	Fluxo_dren	Numérico
Curvas	Curvas_brig	Curvas de nível, pontos cotados	Numérico
TIN	tin_brig	Curvas de nível, pontos	Numérico

		cotados	
Altimetria	Grade_alt	tin_brig	Numérico
Declividade	Decliv_perc, Decliv_ang	Grade_alt	Numérico
Solo	Solos_brig	Polígonos	Temáticos
Erodibilidade	Erod_brig	Solos, tabela ponderação	Numérico, Temático
Pluviometria	Precipitação	Dados anuais precipitação	Numérico, Temático
Erosividade	Eros_brig	Pluviometria	Numérico, Temático
Rampa	Rampa	Grade_dist, Decliv_ang	Numérico
FatorLS	LS	Rampa, Decliv_perc	Numérico
PNE	PNE	Erod_brig, Eros_brig, LS	Numérico, Temático
Modelo	Risco	Albedo, NDVI, temperatura, emissividade, fluxo de calor no solo, PNE	Imagem, Temático e Numérico

Dentro desse esquema tem-se a seguir no item 8.3 o desenvolvimento dos planos de informação no SPRING 4.0.

A figura 30 representa o fluxograma de todos os processos desenvolvido em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico – LEGAL – para aplicação do modelo proposto. Esta figura mostra a entrada de dados, o processamento e a saída que é o resultado do modelo e representa todas as etapas descritas na tabela 15.

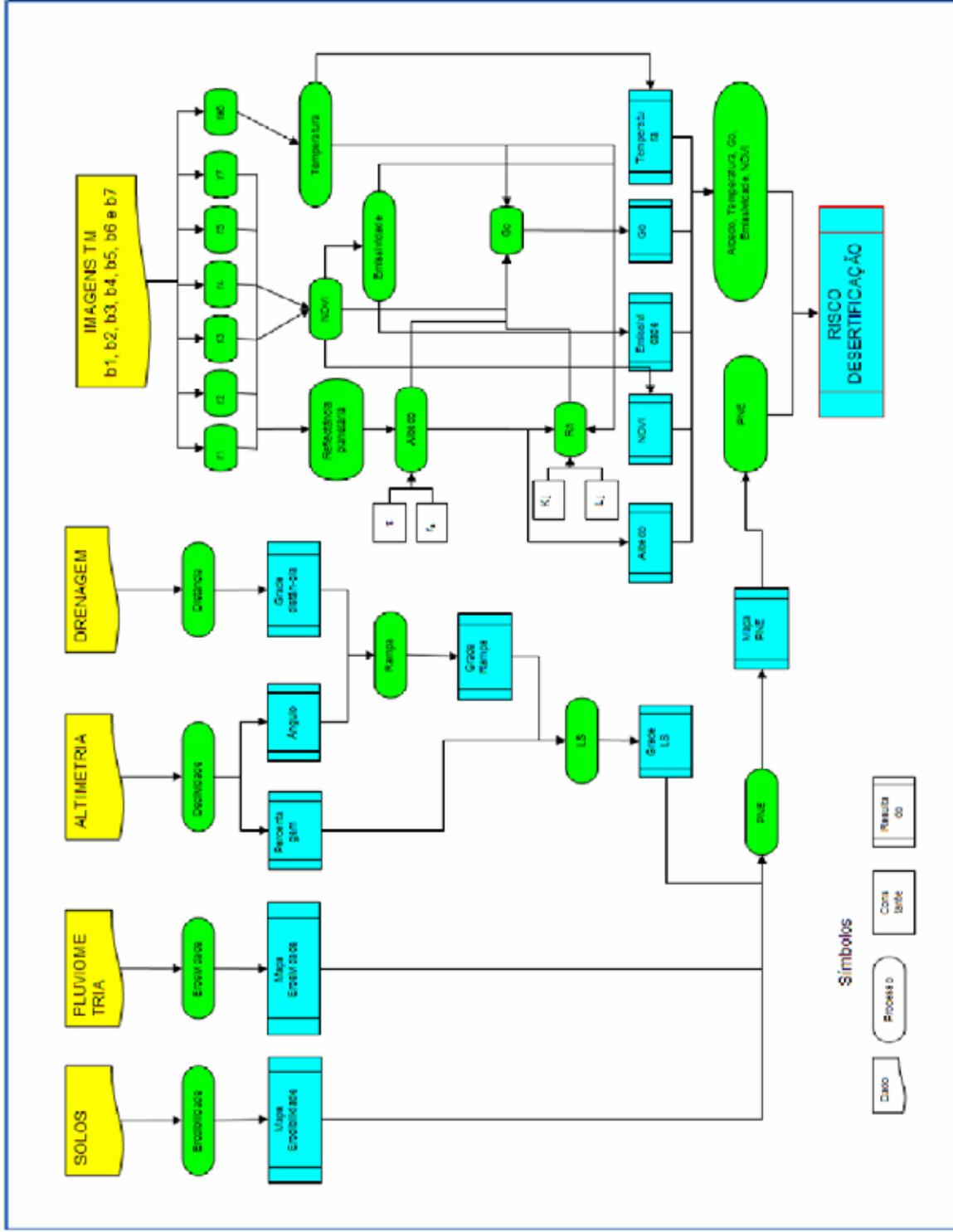


Figura 30. Fluxograma metodológico

### **8.3 Modelagem e Inserção de dados de caracterização fisiográfica e biofísica da Bacia do Rio Brígida em planos de informação.**

#### **I – Para os dados biofísicos**

##### **a) O Plano de Informação Albedo**

Com os dados espectrais das bandas 1 a 5 e 7 foi calculada a reflectância para cada banda e depois a reflectância aparente que é a soma das reflectâncias de cada banda multiplicada pelo seu peso. Todos esses cálculos foram realizados através da programação LEGAL (Apêndice 10). O peso para cada banda foi de 0,29 (banda 1), 0,27 (banda 2), 0,23 (banda 3), 0,16 (banda 4), 0,03 (banda 5) e 0,01 (banda 7) conforme descrito por BASTIAANSEN & BAKKER (2000).

Com a reflectância aparente calculada para cada passagem, realizou-se o processo do cálculo do albedo da superfície através do processo de iteração entre a transmitância e a energia que é refletida pela atmosfera que atinge diretamente o sensor (Equação 12). Assim, foi determinado o albedo da superfície para cada data estudada.

##### **b) O plano de informação NDVI**

Com as reflectâncias das bandas 4 (0.76 – 0.90 $\mu$ m) e 3 (0.63 -0.69  $\mu$ m) calculadas, determinou-se o NDVI pela equação 1 em LEGAL (Apêndice 10).

##### **c) O plano de informação Emissividade**

Uma relação empírica foi definida por GRIEND e OWE (1993) que utilizaram radiômetros para medir simultaneamente o NDVI e a emissividade.

Calculado o NDVI, aplicou-se a função empírica desenvolvendo um programa em LEGAL (Apêndice 10) para determinação da emissividade, descrita na equação 11.

##### **d) O plano de informação Temperatura da superfície**

A partir da emissividade, realizou-se o cálculo da radiância no termal, para o cálculo da temperatura da superfície de acordo com a fórmula 8, que é uma inversão da fórmula de Plank.

##### **e) O Plano de Informação fluxo de calor no solo**

Para determinação do fluxo de calor no solo faz-se necessário calcular primeiro a radiação global. Na sua determinação são necessários os seguintes parâmetros: (1) albedo, (2) radiação de ondas longas incidente, (3) radiação de ondas curtas incidente, (4) emissividade da superfície no infravermelho termal e (5) temperatura da superfície. Para o cálculo do segundo parâmetro foram necessários os dados: temperatura do ar e umidade relativa que foram adquiridas no DISME/Recife. Estes dois dados foram necessários para o cálculo da pressão de vapor saturado, pressão de vapor atual, emissividade da atmosfera e por fim a radiação de ondas longas incidente conforme equação 25, que é considerada espacialmente constante, com o valor de  $352,8743 \text{ Wm}^{-2}$  para o ano de 1985.

$$L^{\downarrow} = \epsilon_{\text{atm}} \times \sigma \times T_{\text{ar}}^4 \quad (25)$$

onde  $\epsilon_{\text{atm}}$  é a emissividade atmosférica,  $\sigma$  é a constante de Boltzmann e  $T_{\text{ar}}$  é a temperatura do ar.

Para o cálculo do terceiro parâmetro, foi primeiro calculada a radiação solar instantânea que é função do ângulo solar zenital, constante solar e distância sol-terra, depois foi determinada a densidade do fluxo de radiação perpendicular ao topo da atmosfera, e finalmente a radiação de onda curta recebida na superfície que é expressa na equação 26.

$$K^{\downarrow}(x, y) = K^{\downarrow}_{\text{TOA}}(x, y) \times \tau_{\text{sw}} \quad (26)$$

onde  $K^{\downarrow}_{\text{TOA}}(x, y)$  é a radiação de ondas curtas incidente no topo da atmosfera  $\tau_{\text{sw}}$  é a transmitância atmosférica.

O dado ângulo zenital solar foi determinado para cada pixel através de uma operação no SPRING, e programação no MATLAB (Apêndice 10), em que foi gerado um arquivo dat e importado para o SPRING no formato spr. O quinto parâmetro foi determinado através da radiação termal e emissividade de acordo com a equação 8.

Diante dos cinco parâmetros calculados, foi realizado o cálculo da Radiação global, como expresso na equação 27. Todos os parâmetros foram programados em LEGAL.

$$R_n = (1 - r_0) K^{\downarrow} + L^{\downarrow} - \epsilon_0 \sigma T_0^4 - (1 - \epsilon_0) L^{\downarrow} \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (27)$$

onde  $r_0$  é o albedo;  $K^l$  é a radiação de ondas curtas incidente;  $L^l$  é a radiação de ondas longas incidente;  $\varepsilon_0$  é a emissividade da superfície;  $\sigma$  é a constante de Boltzmann e  $T_0$  é a temperatura da superfície.

Para a programação do modelo do fluxo de calor no solo foram necessários os parâmetros: Albedo, NDVI, Temperatura e Radiação Global.

## **II – PNE**

Para se gerar o PNE é necessário obter os planos de informação: solos, erodibilidade, erosividade, curvas de nível, declividade, drenagem e fator topográfico. A seguir eles são detalhados.

### **a) Plano de informação solos**

Adquirido na forma vetorial digital no ZAPE, o mapa de solo foi importado para o SPRING, no qual foi recortado no formato da Bacia, editadas as classes e transformado para matriz para aplicação do programa de ponderação das classes.

### **b) Plano de informação erodibilidade dos solos**

Com o plano de informação solo editado, desenvolveu-se um programa de ponderação das classes. As classes foram ponderadas de acordo com a classificação de solos da bacia, para a espacialização da erodibilidade.

### **c) Plano de informação Erosividade**

Para o cálculo da erosividade adquiriram-se amostras da precipitação anual de postos localizados na Bacia e próximos a Bacia, que perfazem o total de 39 postos e são de uma média histórica que variam de 9 a 66 anos. Esses dados foram interpolados em grade regular de 30 x 30m (tamanho do pixel da imagem), para que com a equação de erosividade (equação 19) experimentada por LEPRUN (1986), ela fosse determinada em toda Bacia.

### **d) Plano de informação curvas de nível**

Os dados de curvas de nível foram digitalizados em mesa digitalizadora na escala de 1:100000 com distância equivalente a 40m. Essas cartas foram geradas a partir de aerolevantamento pelo Serviço Geográfico do Exército – 1968.

Os dados altimétricos foram digitalizados em UTM/Córrego Alegre e importados para o SPRING em UTM/SAD-69.

Com o plano de informação curva de nível gerado, procedeu-se o desenvolvimento da rede triangular. A partir dela foi produzida a grade retangular regular da altimetria com resolução espacial de 30 x 30m.

#### **e) Plano de informação declividade**

O plano de informação declividade foi gerado da grade regular da altimetria. Foram criadas as declividades em percentagem e em ângulo. A declividade em ângulo foi necessária para o cálculo do comprimento de rampa. As declividades foram calculadas através de uma função no SPRING.

#### **f) Plano de informação Drenagem**

A drenagem foi importada para o SPRING no formato shape que estava em coordenadas geográficas sendo necessária a transformação para UTM no SPRING. A rede de fluxo serviu para o cálculo do comprimento de rampa para a determinação do fator LS.

#### **g) Plano de informação LS**

O cálculo desse fator depende do comprimento de rampa e da declividade. O comprimento de rampa foi determinado a partir da drenagem e declividade angular no qual procedeu-se o desenvolvimento de um programa em LEGAL. Para o cálculo do LS desenvolveu-se um programa em LEGAL aplicando a equação 24.

#### **h) O Plano de informação PNE**

Desenvolvido em LEGAL através da soma dos fatores erosividade, erodibilidade e LS.

### **III – O Modelo proposto nesta dissertação**

Para acesso ao grau de degradação e risco à desertificação foi proposto um modelo envolvendo o Potencial Natural de Erosão dos solos da bacia, mais os parâmetros: albedo, temperatura, emissividade, NDVI e fluxo de calor no solo.

O PNE foi ponderado de acordo com perda de solo e a área de cada classe de perda de solo (Tabela 16). Desta forma a classe com maior perda de solo e maior área obteve maior peso.

Para a ponderação do mapa de potencial natural de erosão foi desenvolvido um programa em LEGAL através da variável Pondere. Esse programa definiu um plano de informação de grade numérica para as classes de potencial.

Tabela 16. Ponderação do Potencial Natural de Erosão.

Potencial Natural de Erosão (ton/ha.ano <sup>-1</sup> )	Ponderação
0 – 10	1,001
10 – 30	1,02
30 – 70	1,09
70 – 150	1,15
150 – 310	1,17
310 – 630	1,10
> 630	1,11

O modelo proposto para determinar o avanço e risco à desertificação na Bacia do Brigida está expresso na equação 28.

$$R = (A + E + T + N + G) \times PNE \quad (28)$$

onde: A = é o albedo da superfície; E = é a emissividade; T = é a temperatura; N = é o NDVI e G é o fluxo de calor no solo.

Para a soma dos parâmetros do modelo proposto nesta pesquisa realizou-se uma transformação exponencial de cada parâmetro. Esta modelagem foi desenvolvida, uma vez que não se tem conhecimento sobre o comportamento dos valores dos parâmetros e o estado de degradação do ambiente analisado.

Para a transformação exponencial, os parâmetros foram escalados entre 2 e 3, e em seguida somados e diminuído de 9 para expressar um risco entre 0 e 5, onde 5 é o valor que representa alto risco de desertificação.

Além da transformação exponencial, par um estudo mais aprofundado pode ser, também, modelado o estado de degradação a partir de uma transformação linear. Uma

pesquisa de campo com os níveis de degradação do ambiente e sua relação com os parâmetros e o modelo, definiria qual transformação a ser aplicada: linear, exponencial ou outra.

Após a transformação exponencial aplicada, os resultados foram multiplicados pelo Potencial Natural de Erosão. Os valores entre zero e um representam risco mínimo, entre 1 e 2 significam baixo risco, entre 2 e 3 risco moderado, entre 3 e 4 risco alto e entre 4 e 5 risco extremo.

Todas estas transformações foram determinadas em LEGAL para análise e discussão.

## 9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é mostrado o comportamento dos parâmetros nos períodos analisados. São analisados histogramas e valores máximo, mínimo, média e desvio padrão dos parâmetros avaliados, bem como do modelo proposto para avaliação de risco à desertificação. Para a geração dos histogramas as imagens foram interpoladas para uma resolução de 120m (essa resolução foi determinada para poder processar os dados em arquivo ascii). São apresentados também os resultados referentes ao potencial natural de erosão para a Bacia do Brígida. Os mapas dos parâmetros e do risco à desertificação para a Bacia são apresentados em apêndices no formato A3.

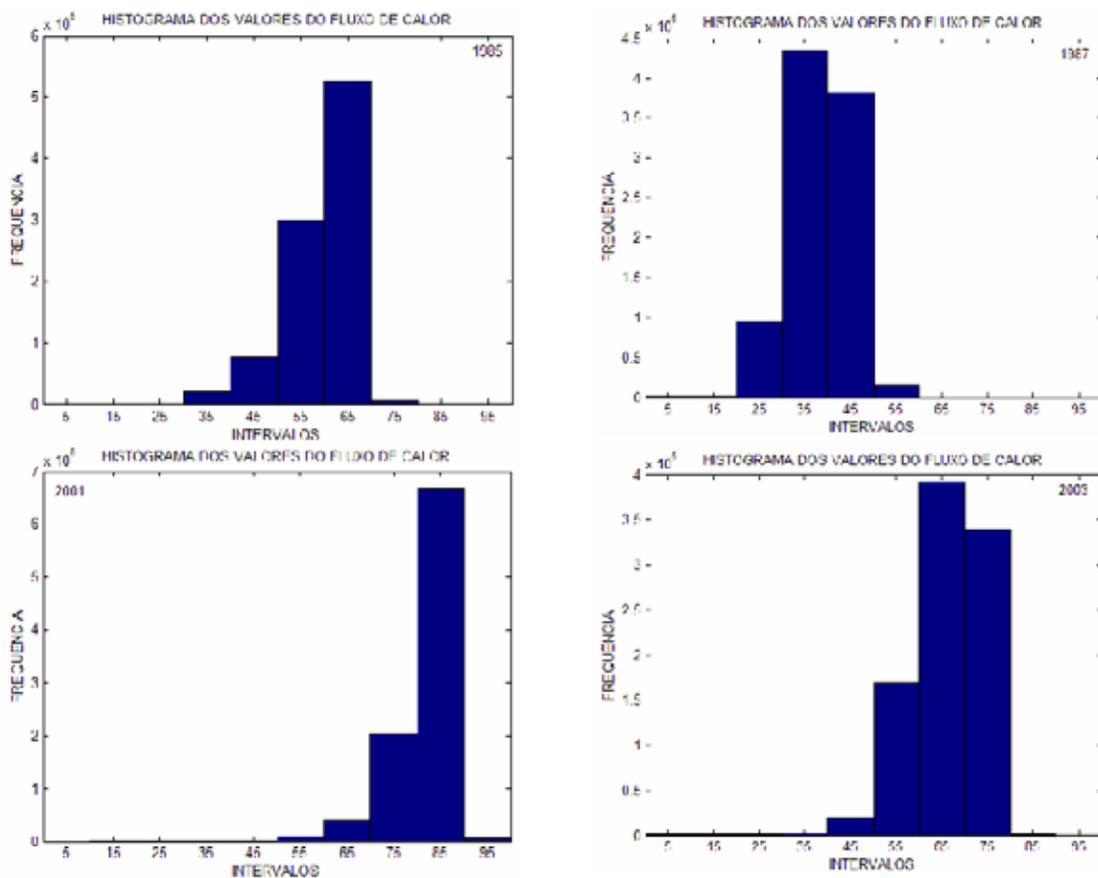


Figura 31. Histograma da distribuição do fluxo de calor no solo para os anos de 1985, 1987, 2001 e 2003.

Na figura 31, tem-se a distribuição dos valores do fluxo de calor no solo em histogramas para as quatro datas avaliadas. Em 1985 os valores ficaram em torno de  $65\text{Wm}^{-2}$  e em 2001 os valores estão por volta de  $85\text{Wm}^{-2}$ , em que essas duas datas são para o período seco. Para o período de 1987 a maioria dos pixels margeia o valor de  $35\text{Wm}^{-2}$ .

<sup>2</sup> e em 2003 estão em torno de  $65\text{Wm}^{-2}$  na sua maioria. Nota-se que para a comparação entre as mesmas épocas (seca e chuvosa) os valores aumentaram. Tem-se na figura 32, 33 e 34 o gráfico da soma da precipitação para os quatro meses antes da aquisição da imagem.

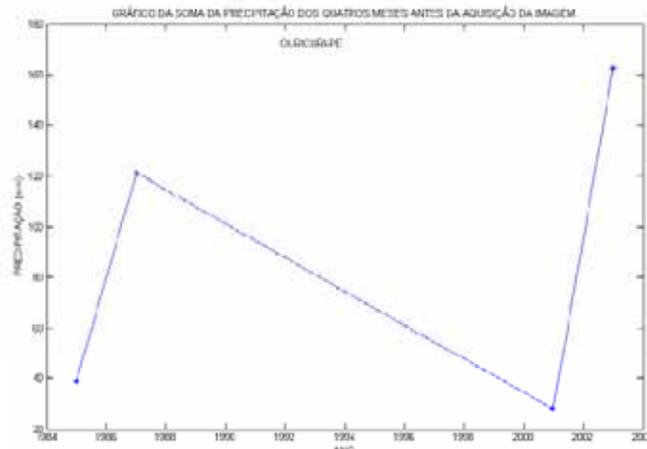


Figura 32. Soma da precipitação para os quatro meses antes da tomada da imagem para o município de Ouricuri. Dados: DISME/Recife.

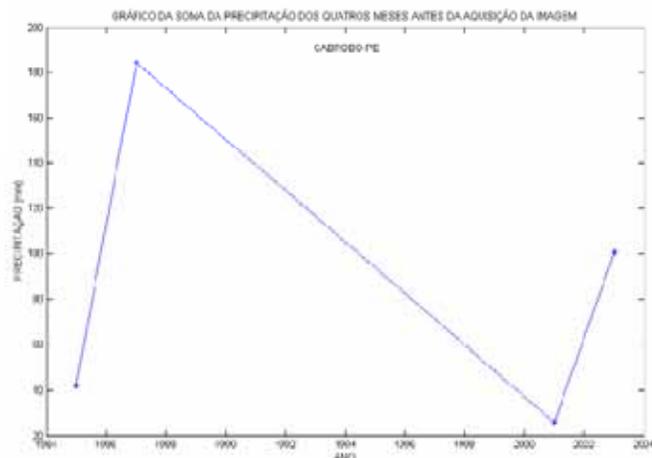


Figura 33. Soma da precipitação para os quatro meses antes da tomada da imagem para o município de Cabrobó. Dados: DISME/Recife

Em 1985, para o município de Ouricuri, a soma da precipitação para os quatro meses anteriores a aquisição da imagem foi de 38,9mm e para o ano de 1987 a soma foi de 121,5mm e em 2001 os valores da precipitação para os quatro meses anteriores a aquisição da imagem somam 29,7mm e em 2003 os valores perfazem uma soma de 162,7mm. Para o município de Cabrobó, em 1985, a soma dos quatro meses perfaz um total de 42,0mm; em

1987 a soma dos valores é de 184,6mm; para o ano de 2001 o total é de 25,7mm; e no ano de 2003 a soma foi de 100,6mm.

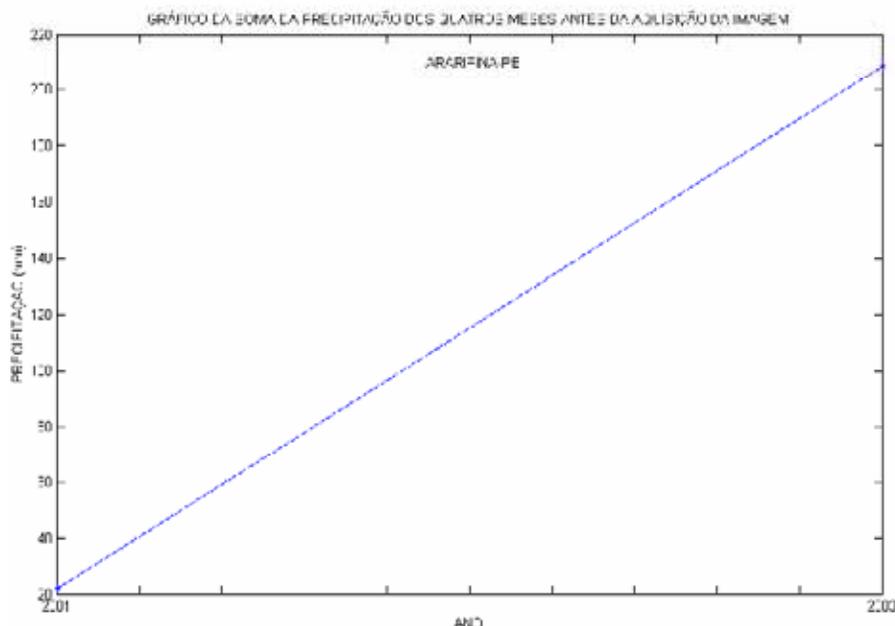


Figura 34. Soma da precipitação para os quatro meses antes da tomada da imagem para o município de Araripina. Dados: CPTEC/INPE.

Para o município de Araripina no ano de 2001, a soma da precipitação dos quatro meses antes da aquisição da imagem foi de 22,0mm, e em 2003 total foi de 208,75mm.

Veja na tabela 17 para o fluxo de calor no solo os valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão. Esses valores foram obtidos através de um arquivo ascii, que foi importado para o MATLAB e através dos comandos min, max, std e mean, foram determinado os respectivos valores.

Tabela 17. Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para o fluxo de calor no solo.

FLUXO DE CALOR NO SOLO ( $Wm^{-2}$ )				
	1985 (seca)	1987 (chuva)	2001 (seca)	2003 (chuva)
mín	7,5036	0,5849	11,2313	0,0329
máx	81,8700	57,4494	99,0616	83,0933
desvio padrão	7,1022	6,3302	6,2777	7,7704
média	59,3332	38,3830	81,6473	66,1562

Na tabela 17 os valores mínimos de fluxo de calor no solo são para bordas de nuvens que na classificação para geração de uma máscara, não foi possível classificá-las. Para os valores máximos, veja que comparando os mesmos para a época seca (1985 e 2001) houve um aumento de  $81,87 \text{ Wm}^{-2}$  para  $99,06 \text{ Wm}^{-2}$ ; o mesmo acontece para a época chuvosa (1987 e 2003) em que houve um aumento do valor máximo de  $57,44 \text{ Wm}^{-2}$  para  $83,09 \text{ Wm}^{-2}$ . No apêndice 1 são mostrados quatro mapas com a espacialização do fluxo de calor para a Bacia do Rio Brígida nas quatro datas analisadas. Obtidos pela equação 14.

Na figura 35 são apresentados os valores da temperatura da superfície para as quatro datas analisadas distribuídos em histogramas.

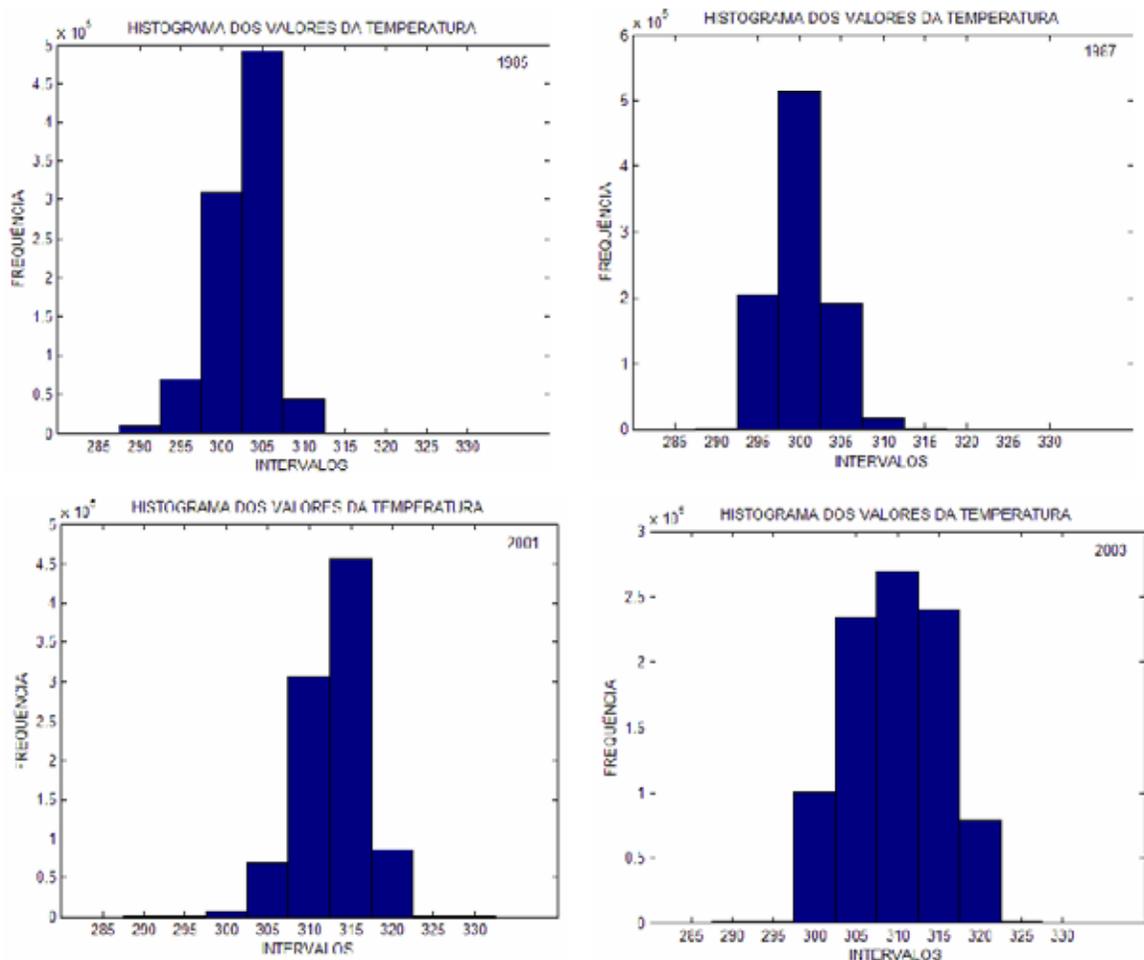


Figura 35. Histograma da distribuição da temperatura da superfície para os anos de 1985, 1987, 2001 e 2003 na bacia do rio Brígida.

Para o ano de 1985 a maior parte dos pixels apresentou temperaturas em torno de 305 °K como é visto na figura 35, somando quase 500000 pixels, ou uma área de  $7200 \text{ Km}^2$ . No ano de 2001 que também é seca a maioria dos pixels apresentou temperaturas por volta

de 315 °K agrupando 460000 pixels (6624Km<sup>2</sup>), perfazendo um aumento de 10 °K. Quanto ao período chuvoso, para o ano de 1987 mais de 500000 pixels estiveram em torno de 300 °K, como é visto na figura 35. No ano de 2003 a maioria dos pixels margeou as temperaturas de 310 °K e 315 °K. Veja melhor a distribuição na figura 35. No apêndice 2 tem-se o mapa da espacialização da temperatura da superfície para as quatro datas analisadas.

Na tabela 18 a seguir são mostrados os valores de temperatura máxima, mínima, o desvio padrão e a média para toda a bacia.

Tabela 18. Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para a temperatura da superfície.

<b>ANÁLISE DA TEMPERATURA (°K) NA BACIA DO BRÍGIDA</b>				
	1985 (seca)	1987 (chuva)	2001 (seca)	2003 (chuva)
min	286,1955	287,9877	290,0995	291,7270
máx	319,03450	315,2898	331,7209	327,2372
desvio padrão	3,5392	3,1827	3,7329	5,5113
média	302,6333	300,1073	312,9959	309,7981

Conforme tabela 18, para a imagem de 2003, o valor mínimo da temperatura foi de 291,72 °K. Este valor está localizado na chapada do Araripe, a oeste da bacia do rio Brígida. O valor máximo da temperatura que foi de 327,23 °K se encontra na região nordeste da bacia, no município de Exu. Para o ano de 2003 a temperatura da superfície na Bacia apresentou desvio de 5,51 °K e temperatura média de 309 °K. No ano de 1985 a temperatura da superfície mínima foi de 286,23 °K, num pixel localizado na chapara do Araripe no município de Exu. O valor da temperatura máxima foi de 319,03 °K, para um pixel localizado no município de Bodocó. O desvio padrão da temperatura para o ano de 1985 foi de 3,53 °K e a média da temperatura em toda Bacia foi de 302,63 °K. Para o ano de 1987 o valor mínimo da temperatura foi de 287,98 °K, localizado na chapada, no município de Moreilândia, na parte nordeste da Bacia. Esse pixel é próximo a nuvens. Próximo a esse pixel existe valores de 293 °K, sem influencia de nuvens. O maior valor de temperatura para este ano foi de 315,28 °K no município de Bodocó. Neste ano de 1987 a temperatura na bacia apresentou desvio de 3,18 °K e média de 300,10 °K. Na imagem de 2001 a temperatura mínima foi de 290,09 °K. O pixel com esta temperatura está localizado próximo à borda de nuvem. Pixels próximo ao pixel com este valor e sem influência de nuvens tem temperatura em torno de 301 °K. A maior temperatura na imagem de 2001 foi de 331,72 °K e este pixel está localizado no município de Parnamirim. O desvio padrão da temperatura

para este ano foi de 3,73 °K e a temperatura média foi de 312,99 °K. A média da temperatura da superfície para os anos de seca e chuva aumentou em torno de 10 °K. Isso influencia na comunidade microbiana do solo, havendo perda de biodiversidade de organismos adaptados a uma certa temperatura da superfície.

A seguir, na figura 36 são apresentados os histogramas da distribuição dos valores do NDVI para as quatro imagens analisadas.

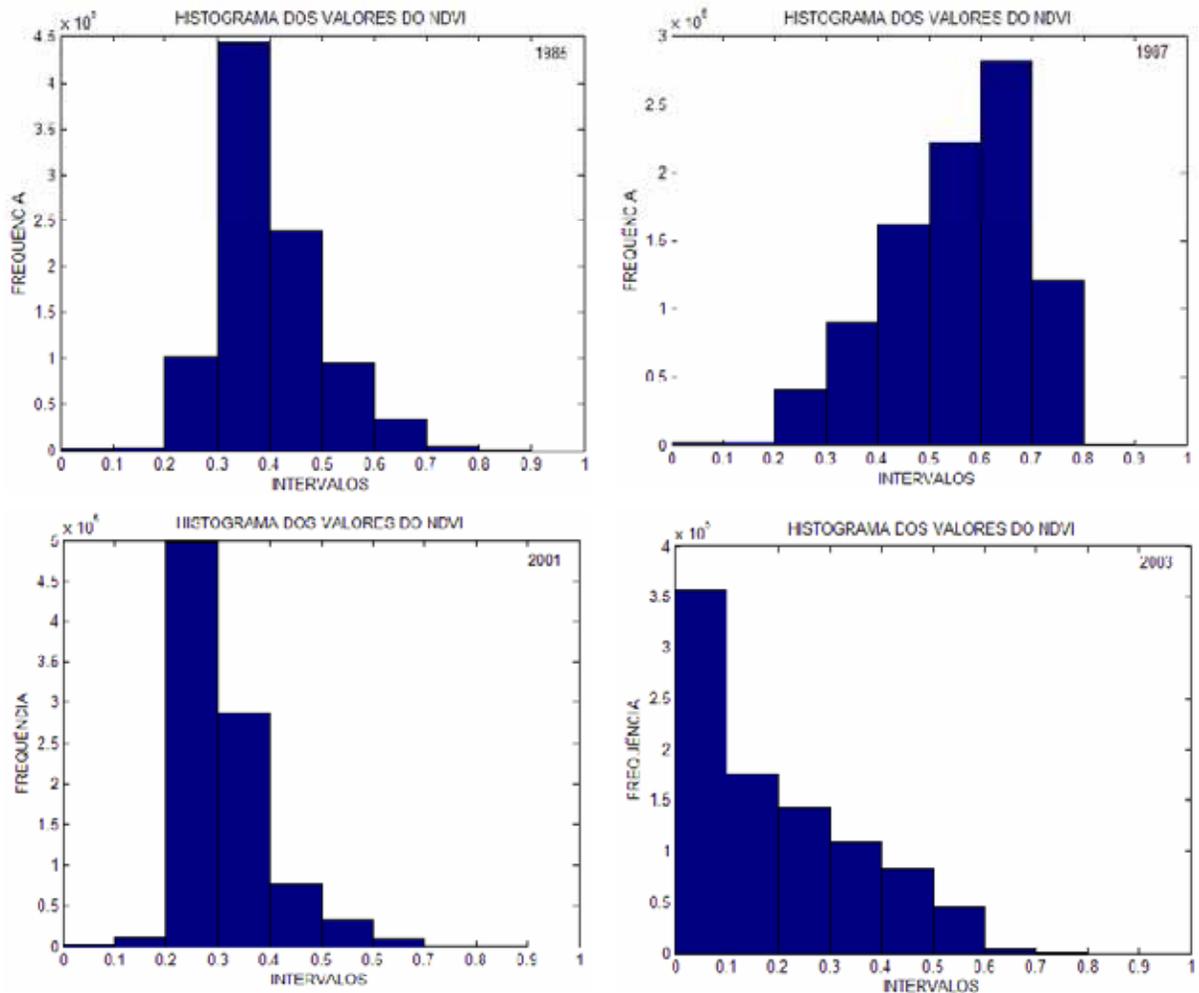


Figura 36. Histogramas para a distribuição dos valores do NDVI para as quatro imagens analisadas.

Conforme o histograma da figura 36, maior parte dos pixels tiveram valores entre 0,30 a 0,40 (quase 450000 pixels que perfazem uma área de 6480 Km<sup>2</sup>) isso para o ano de 1985 em que a imagem é da época seca. Para o ano de 2001 (seca), grande quantidade de pixels apresentou valores de NDVI entre 0,20 e 0,30 (um total de 500000 pixels que juntos

somam uma área de 7200 Km<sup>2</sup>). Para o ano de 1987 (imagem analisada do período chuvoso) a maior quantidade de pixels estiveram no intervalo de NDVI de 0.60 a 0.70 com um total de 275000 pixels, totalizando uma área de 3960 Km<sup>2</sup>. Na imagem de 2003, 350000 pixels (5040 Km<sup>2</sup>) tiveram NDVI entre 0,0 e 0,10, isso devido ao desmatamento e as chuvas não terem ocorrido na parte leste da Bacia. Os mapas do NDVI são apresentados no apêndice 3.

Na tabela 19 a seguir, é mostrado os valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média relativos ao NDVI para as quatro imagens estudadas.

Tabela 19. Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para o NDVI.

NDVI				
	1985 (seca)	1987 (chuva)	2001 (seca)	2003 (chuva)
mín	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
máx	0,81798800	0,85799900	0,89303500	0,74282100
desvio padrão	0,09640955	0,13301754	0,08422472	0,16303410
média	0,39677017	0,55513250	0,31353537	0,19320293

De acordo com a tabela 19 o valor mínimo de NDVI para o ano de 1985 foi 0,0. O pixel com este valor está localizado no município de Araripina, próximo a uma lagoa. O maior valor de NDVI ocorreu próximo a um riacho no município de Parnamirim. O desvio padrão para a imagem do NDVI de 1985 foi de 0,09 e a média foi de 0,39. Para o ano de 1987 o NDVI de menor valor foi encontrado no município de Exu próximo a uma lagoa. O maior valor para a imagem de 1987 foi de 0,85. O pixel com este valor fica localizado próximo a um riacho entre os municípios de Parnamirim e Ouricuri. Para a imagem de 1987 o desvio foi de 0,13 e a média do NDVI foi de 0,55. Na análise dos valores para a imagem de 2001 o pixel com menor valor está localizado próximo a uma lagoa no município de Araripina. O maior valor para esta imagem foi de 0,89 e o pixel com este valor fica em plantações no município de Orocó. O desvio padrão para esta imagem foi de 0,08 e a média foi de 0,31. Na imagem do NDVI de 2003 os pixels com valor mínimo se localizam à margem do rio da Brígida no município de Parnamirim. O Valor máximo do NDVI para a imagem de 2003 foi de 0,74. Esse pixel está localizado em plantações no município de Santa Maria da Boa Vista. Para esta imagem o desvio padrão foi de 0,16 e a média dos valores do NDVI foi de 0,19. Para a variação encontrada na média dos valores do NDVI, percebe-se que houve uma diminuição nos valores, em que a média da época seca passou de 0,39 na imagem de 1985 para 0,31 na imagem de 2001, e para o período chuvoso a média passou de 0,55 na imagem de 1987 para 0,19 na imagem de 2003, isso devido ao desmatamento e as chuvas

concentradas que ocorreu neste ano. Os valores negativos do NDVI foram para nuvens e água. Para essas áreas foi determinado uma máscara. Os outros valores negativos foram aproximados para 0 para aplicação da fórmula da emissividade.

Com relação ao albedo são apresentados a seguir (Figura 37) os histogramas da distribuição dos valores do albedo calculados para a bacia para as datas avaliadas.

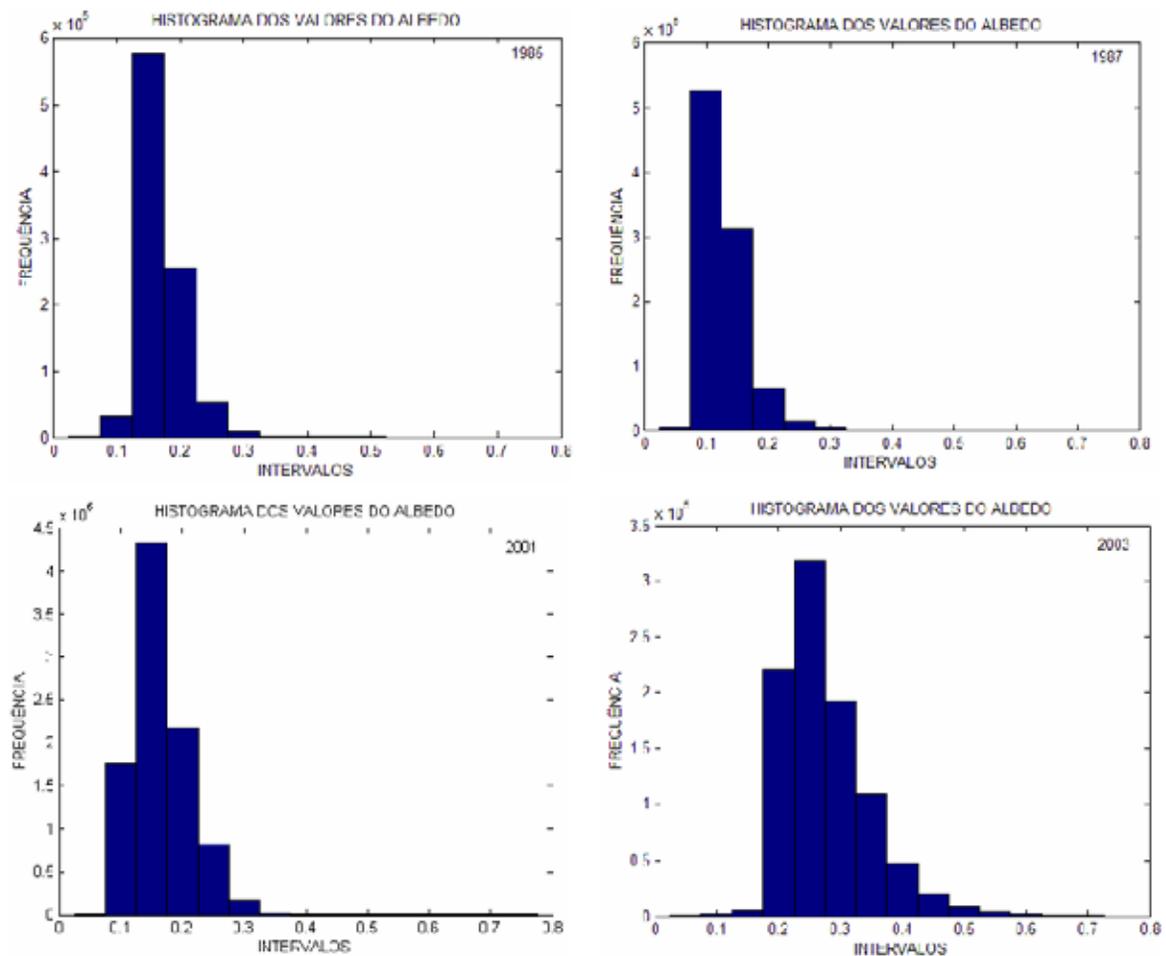


Figura 37. Histogramas para a distribuição dos valores do albedo para as quatro imagens analisadas.

De acordo com a figura 37, em 1985 a maioria dos pixels obtiveram valores de albedo em torno de 0,15, na estação seca, sendo um total de 577054 pixels perfazendo uma área de 8309,57Km<sup>2</sup>, e 51488 pixels ficaram entre 0,225 e 0,275, totalizando uma área de 741,42 Km<sup>2</sup>. Para a imagem albedo de 2001 cerca de 432175 pixels ficaram em torno de 0,15, totalizando uma área de 6223,32 Km<sup>2</sup>, e 80504 pixels estiveram entre 0,225 e 0,275, totalizando uma área de 1159,25 Km<sup>2</sup>. Para o período de chuva, no ano de 1987, a maior

parte dos pixels obtiveram valores entre 0,10 e 0,15, havendo uma redução em relação ao ano de 1985. Para a imagem de 2003 a maior parte dos pixel tiveram valores de albedo de 0,25, sendo um total de 318458 pixel, que totaliza uma área de 4585,79Km<sup>2</sup>.

A tabela 20 a seguir mostra os valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média, para o albedo nos períodos analisados.

Tabela 20. Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e media do albedo.

<b>ALBEDO</b>				
	1985 (seca)	1987 (chuva)	2001 (seca)	2003 (chuva)
min	0,0490	0,0500	0,0501	0,0512
máx	0,4900	0,4990	0,6800	0,6900
desvio padrão	0,0340	0,0356	0,0484	0,0693
média	0,1684	0,1300	0,1612	0,2763

Conforme tabela 20 o valor de albedo máximo foi de 0,49 para o ano de 1985. Este valor foi localizado próximo a nuvens. Um valor de 0,42 foi encontrado na região de Araripina para a imagem albedo de 1985. Para o ano de 1985 o albedo apresentou desvio de 0,03 e média de 0,16. No ano de 1987 o valor máximo do albedo foi de 0,49. Esse valor encontra-se próximo à borda de nuvem. Os valores maiores para esta imagem do albedo ficaram em torno de 0,45, localizados entre os municípios de Araripina e Ouricuri. No ano de 1987 o albedo apresentou desvio de 0,03 e média de 0,13. Em 2001 os valores mais altos do albedo ficaram em torno de 0,55, localizados entre os municípios de Araripina e Ouricuri. Neste ano a imagem albedo teve desvio padrão de 0,04 e média de 0,16. No ano de 2003 os maiores valores de albedo foram encontrados entre os municípios de Araripina e Ouricuri. Estes valores ficaram em torno de 0,57, e o desvio para a imagem albedo deste ano foi de 0,06 e a média ficou em 0,27. O mapa do albedo é apresentado no apêndice 4.

A seguir, na figura 38, são mostrados os histogramas da distribuição dos valores da emissividade para as quatro datas analisadas.

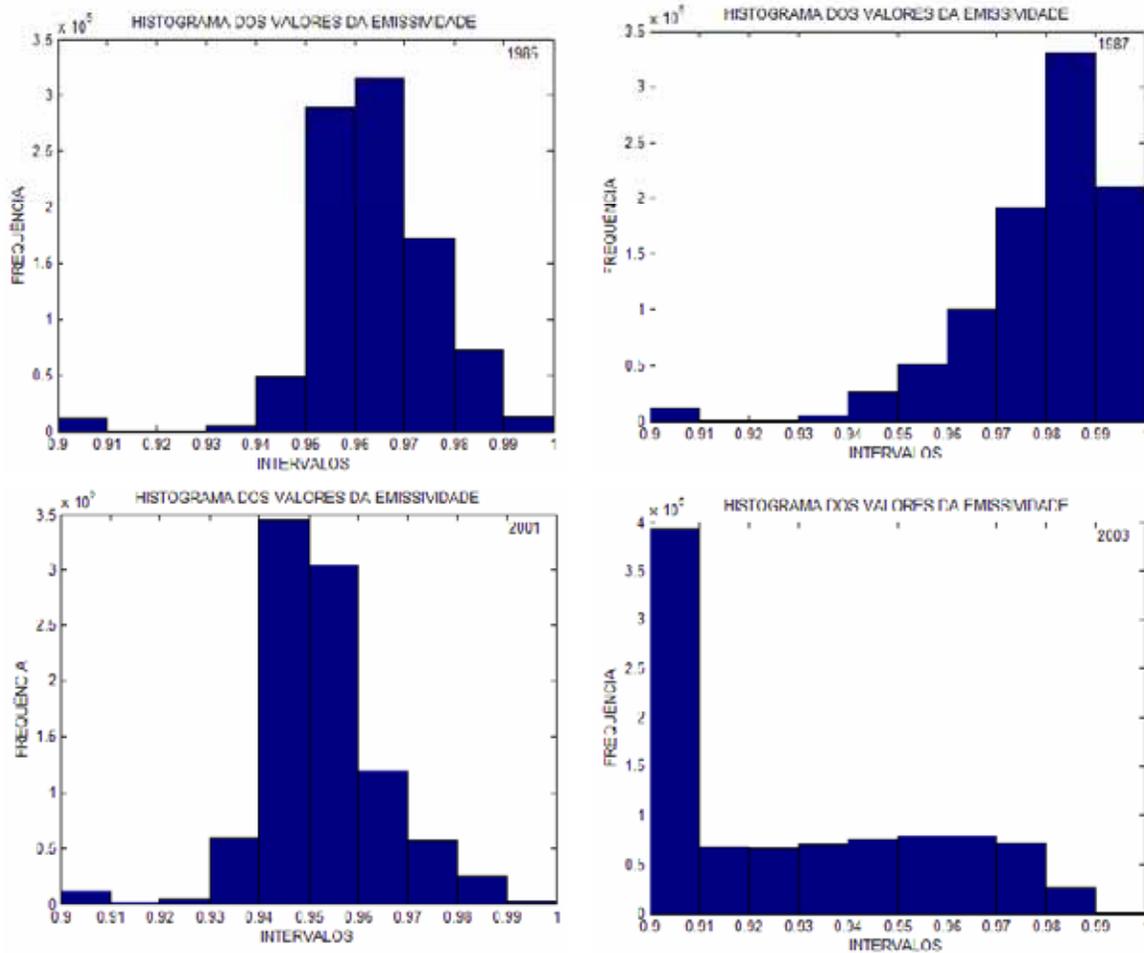


Figura 38. Histogramas para a distribuição dos valores da emissividade para as quatro imagens analisadas.

Conforme figura 38, em 1985 a maioria dos pixels apresentou valor de emissividade entre 0,96 e 0,97, totalizando uma área de 4542,37Km<sup>2</sup>. Em 1987 a grande parte dos pixels (331080) ficou entre 0,98 e 0,99, somando uma área de 4767,55Km<sup>2</sup>. Para o ano de 2001 a maior quantidade de pixels (345188) ficou entre 0,94 e 0,95, totalizando uma área de 4970,70Km<sup>2</sup>. No ano de 2003 houve uma concentração de pixels entre 0,9 e 0,91, perfazendo uma área de 5506,34Km<sup>2</sup>.

Na tabela 21 é mostrado os valores de máximo, mínimo, médio e desvio padrão para a emissividade para as épocas analisadas.

Tabela 21. Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para a emissividade.

EMISSIVIDADE				
	1985 (seca)	1987 (chuva)	2001 (seca)	2003(chuva)
mín	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000
máx	0,9900	0,9900	0,9900	0,9800
desvio padrão	0,0107	0,0127	0,0112	0,0280
média	0,9643	0,9797	0,9531	0,9282

De acordo com a tabela 21 o valor mínimo da emissividade para o ano de 1985 foi de 0,9 localizado no município de Exu. Para este ano o maior valor foi de 0,99 que está localizado na Chapada no município de Exu. Para o ano de 1985 o desvio padrão da emissividade foi de 0,01 e a média foi de 0,96. Com relação ao ano de 1987 o menor valor de emissividade ocorreu ao norte do município de Trindade, e o maior valor foi registrado na Chapada no município de Exu. No ano de 1987 o desvio padrão foi de 0,01 e a média foi de 0,97. Para o ano de 2001 o valor mínimo de emissividade ocorreu ao sul do município de Araripina e o valor máximo da emissividade para a imagem de 2001 foi registrado ao norte do município de Orocó. A média foi de 0,95 e o desvio padrão foi de 0,01. No ano de 2003 o menor valor da emissividade foi calculado no município de Ipubi e entre os municípios de Araripina e Ouricuri, e o maior valor da emissividade ocorreu no município de Araripina. Neste ano o desvio padrão foi de 0,02 e a média foi 0,92. O mapa da emissividade é apresentado no apêndice 5.

Serão mostrados agora os resultados referentes ao potencial natural de erosão. O cálculo do PNE se fez através da erodibilidade, erosividade e o fator topográfico (LS), com os seguintes resultados para esses fatores:

A erodibilidade foi calculada através do mapa de solos e os resultados obtidos por LEPRUN (1986) para as classes de solo de Pernambuco.

A erodibilidade foi classificada em fraca, moderada e forte conforme descrito no item 7.1. A Chapada do Araripe foi classificada com erodibilidade fraca, e algumas partes na região central da bacia foram classificadas como fraca. A maior parte da bacia foi classificada como tendo erodibilidade moderada, sendo essa na depressão do São Francisco. Pequenas áreas nessa região foram mapeadas como tendo erodibilidade forte. Um esboço das medidas das classes de erodibilidade é mostrado na tabela 22. O mapa de erodibilidade da bacia do Brígida é apresentado no Apêndice 9.

Tabela 22. Medidas de classes para a erodibilidade.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )
Fraca	4233,14
Moderada	8206,95
Forte	1087,05

A erosividade para a bacia do Rio Brígida foi dividida em 3 classes: 250 a 360, 360 a 500 e de 500 a 860. Parte da chapada apresentou alta erosividade das chuvas (500 a 860 MJ mm ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>), a região central que vai de leste a oeste tem erosividade entre 360 a 500 MJ mm ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, e a região sul da bacia foi classificada com erosividade entre 250 a 360 MJ mm ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, conforme mapa no Apêndice 9.

O potencial natural de erosão (Mapa no Apêndice 9) foi dividido em 7 classes (Tabela 23). As áreas com maior potencial de erosão estão localizadas próximas à chapada. A maior parte da bacia teve potencial natural de erosão entre 30 e 150 t/ha ano<sup>-1</sup>, que ficou em torno de 8800 Km<sup>2</sup>.

Tabela 23. Intervalos do potencial natural de erosão e áreas.

Intervalos (ton/ha ano <sup>-1</sup> )	Área (Km <sup>2</sup> )
0-10	337,176900
10-30	1664,361900
30-70	4680,294300
70-150	4167,711000
150-310	1231,605900
310-630	499,532400
> 630	991,497600

Os intervalos acima de 310 são localizados ao pé da Chapada, pois nesta região o relevo é escarpado e possui declividade acima de 30%.

O mapa do da distribuição do fator topográfico é apresentado no Apêndice 9.

A seguir, na figura 39, são apresentados os histogramas dos valores do risco à desertificação determinado pelo modelo para as quatro datas analisadas.

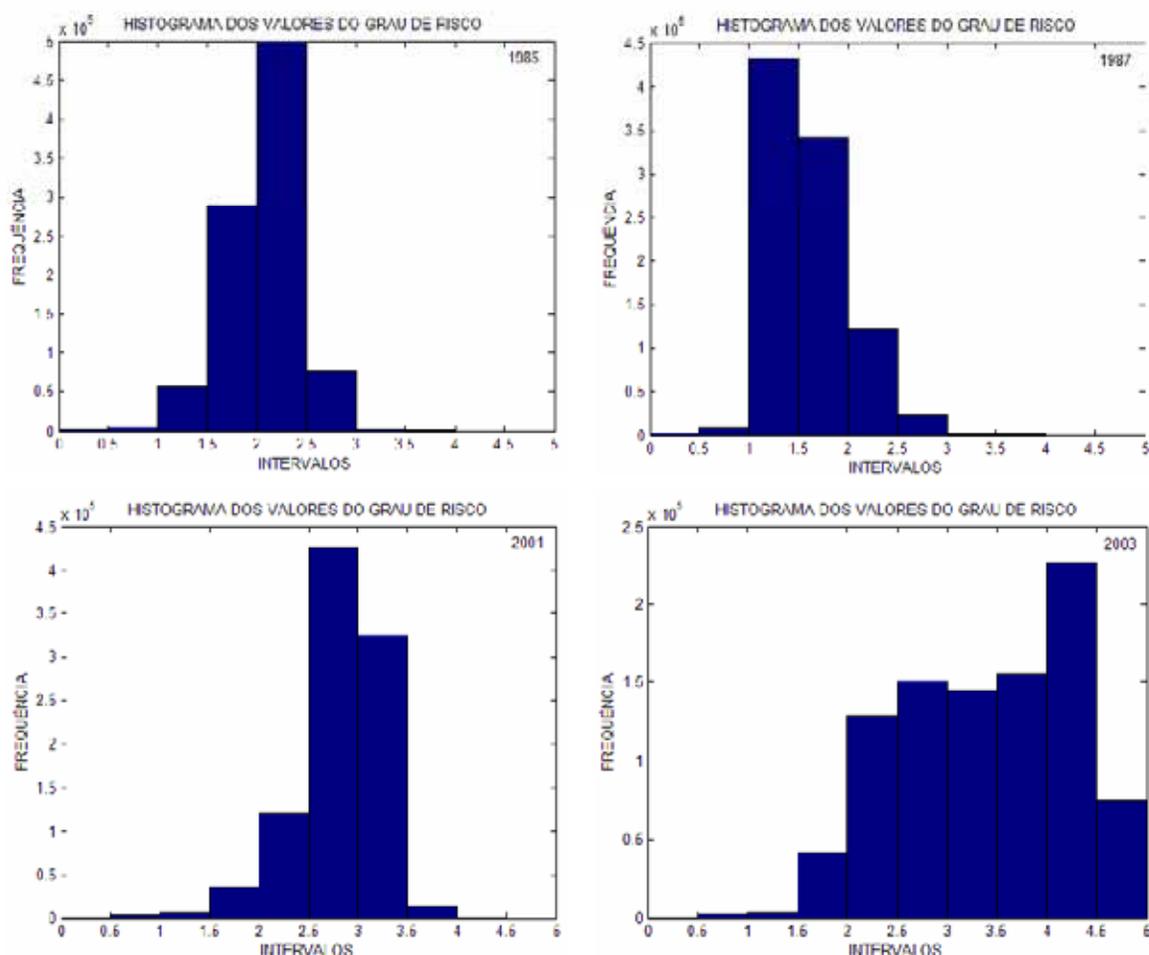


Figura 39. Histogramas para a distribuição dos valores do risco à desertificação para as quatro imagens analisadas.

Conforme figura 39, para o ano de 1985 a maior parte dos pixels ficou entre 2,0 e 2,5 sendo um total de 498822 pixels perfazendo uma área de 7183,03Km<sup>2</sup>. No ano de 1987 a maioria dos pixels ficou no intervalo de 1,0 a 1,5 perfazendo um total de 432705 pixels totalizando uma área de 6230,95Km<sup>2</sup>. Com relação ao ano de 2001 o intervalo em que houve maior concentração de pixels foi de 2,5 a 3,0, sendo um total de 425516 pixels e somam uma área de 6127,43Km<sup>2</sup>. No ano de 2003 o intervalo em que houve maior quantidade de pixels foi de 4,0 a 4,5 totalizando 227139 pixels representando uma área de 3270,80Km<sup>2</sup>.

A seguir são apresentados os valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para as imagens do risco à desertificação nos quatro períodos analisados.

Tabela 24. Valores de mínimo, máximo, desvio padrão e média para o risco à desertificação.

RISCO				
	1985 (seca)	1987 (chuva)	2001 (seca)	2003 (chuva)
mín	1,008	0,9400	0,9600	1,6810
máx	3,8924	3,1850	4,4659	4,9493
desvio padrão	0,3621	0,3876	0,4297	0,8572
média	2,0649	1,5932	2,8190	3,3965

mín = valor mínimo; máx = valor máximo; desvio = desvio padrão.

Segundo o apresentado na tabela 24, o menor valor do risco para o ano de 1985 foi de 1,008, encontrado na chapada do Araripe no município de Exu. Este valor é para caatinga densa com característica de cerrado. A classificação para este tipo de caatinga é SE4 (caatinga arbustiva arbórea fechada). A foto 7 é representativa desta área e é apresentada no apêndice 7. O maior valor do risco à desertificação para o ano de 1985 foi de 3,89. Este valor está localizado no município de Bodocó. Neste ano o desvio foi de 0,36 e a média foi de 2,06. Na análise da imagem do risco para o ano de 1987, o valor mínimo foi de 0,94 localizado no município de Parnamirim. O valor máximo apresentado na imagem do risco no ano de 1987 foi de 3,18 localizado na chapada no município de Bodocó. Valores por volta de 2,96 foram encontrados entre os municípios de Araripina e Ouricuri. Os valores do desvio padrão e média para o ano de 1987 foram 0,38 e 1,59, respectivamente. O menor valor do risco para o ano de 2001 foi de 0,96 localizado em áreas cultivadas no município de Orocó, para uma área vegetada na chapada no município de Exu o valor ficou em torno de 1,60. O maior valor do risco foi encontrado no município de Ouricuri, com 4,46. Áreas entre o município de Araripina e Ouricuri apresentaram risco por volta de 3,80. Para a imagem do risco à desertificação do ano de 2001, o desvio padrão foi de 0,42 e a média 2,81. Com relação ao ano de 2003 o menor valor do pixel foi de 1,68 no município de Ouricuri e 2,15 na chapada no município de Exu. O maior valor do risco para o ano de 2003 foi 4,94 localizado no município de Exu. O desvio padrão para este ano foi de 0,85 e a média de 3,39.

Nas tabelas 25 (época seca) e 26 (período chuvoso) são apresentadas as comparações entre as classes de diferentes períodos apresentando as mudanças ocorridas. Essas tabelas foram geradas no SPRING através da tabulação cruzada e os valores são apresentados em hectares. Os mapas do risco à desertificação para a Bacia do Brígida são apresentados no apêndice 6.

Tabela 25. Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1985 e 2001 (seca).

1985 \ 2001	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
0-1	664,20	14,76	0,63	0,00	0,00
1-2	33,39	28120,50	26930,79	101,07	0,00
2-3	13,59	370016,55	431479,71	1798,56	2,61
3-4	0,54	117223,92	377416,62	3579,84	7,83
4-5	0,00	119,88	638,46	30,42	0,18

Na tabela 25 as linhas são as classes de risco para a imagem de risco à desertificação para o ano de 2001 e as colunas para o ano de 1985. Conforme esta tabela 370016,55ha que representavam risco à desertificação entre 1 e 2 em 1985, em 2001 passaram a ter risco entre 2 e 3. Para 117223,92ha que em 1985 representavam risco entre 1 e 2, passaram a ter risco entre 3 e 4 no ano de 2001. Poucas áreas tiveram redução de risco. Um exemplo é 1798,56ha que em 1985 possuíam risco entre 3 e 4, e em 2001 passaram a representar um risco entre 2 e 3. Pela tabela 25 percebe-se que não houve mudanças drásticas, como por exemplo, passar de 0-1 para o intervalo de 4-5. Um exemplo é uma pequena área de 119,88ha que em 1985 possuía risco à desertificação entre 1 e 2, e passou a representar risco entre 4 e 5 em 2001. Esta análise foi para o período de seca onde há maior uniformidade na paisagem.

A seguir é apresentada a tabela do cruzamento das classes de risco à desertificação para os anos de 1987 e 2003 (chuvoso).

Tabela 26. Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1987 e 2003.

1987 \ 2003	0-1	1-2	2-3	3-4
0-1	664,02	0,18	0,00	0,00
1-2	1488,51	58253,67	4429,89	17,55
2-3	2312,01	354076,10	47595,24	183,87
3-4	1739,16	339775,70	62657,37	246,96
4-5	620,73	354928,10	100267,00	514,08

Na tabela 26 as colunas representam as classes de risco à desertificação para o ano de 1987 e as linhas o ano de 2003. De acordo com esta tabela houve um aumento no risco

à desertificação na bacia do Brigida. No ano de 1987 uma área de 354076,10ha que estava no intervalo de risco entre 1 e 2, passou a representar um risco de 2 a 3 em 2003. Outras áreas de 339775,70ha e 354928,10ha que possuíam risco no intervalo de 1 a 2, passaram a representar risco à desertificação entre 3 e 4, e entre 4 e 5, respectivamente.

A seguir são apresentadas as tabelas 27, 28, 29 e 30, que mostram a comparação entre as classes dos anos 1985-1987, 1987-2001, 1985-2003 e 2001-2003. Os valores são apresentados em hectares.

Tabela 27. Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1985 e 1987.

1985 \ 1987	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
0-1	669,87	5422,32	731,61	0,63	0,00
1-2	32,85	451496,88	654028,83	1472,31	2,88
2-3	4,86	42065,01	170169,12	2704,68	5,85
3-4	0,00	285,12	529,47	146,52	1,35

Tabela 28. Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1987 e 2001.

1987 \ 2001	0-1	1-2	2-3	3-4
0-1	664,02	15,21	0,18	0,00
1-2	642,42	52484,67	914,22	5,85
2-3	5235,93	708559,83	69192,99	363,60
3-4	281,70	345570,48	144527,67	576,81
4-5	0,36	403,65	314,46	16,20

Tabela 29. Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 1987 e 2001.

1985 \ 2003	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
0-1	664,38	0,00	0,18	0,00	0,00
1-2	2,25	36877,50	27223,38	86,31	0,18
2-3	32,40	185485,32	217833,21	815,58	0,72
3-4	3,06	154189,35	249108,75	1116,27	1,98
4-5	5,85	122717,16	331293,69	2306,07	7,20

Os números altos que indicam a passagem de uma classe para um nível mais alto na tabela 28, determinam um aumento no grau de risco à desertificação na bacia do Brígida. No ano de 2003 houve chuvas concentradas na bacia. Para a análise do risco à desertificação seria necessário ter uma boa espacialização da precipitação para com o modelo avaliar a resiliência do ecossistema. Para se ter uma análise equivalente em datas diferentes seria melhor avaliar entre períodos secos pois há uma igualdade de paisagem e variáveis climáticas com o mesmo peso no ambiente.

Tabela 30. Comparação entre classes de risco à desertificação para os anos de 2001 e 2003.

2001 \ 2003	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
0-1	664,20	0,00	0,18	0,18	0,00
1-2	2,07	2522,34	53591,58	8070,75	2,88
2-3	8,01	33540,30	279850,23	90683,10	85,59
3-4	4,59	13308,12	268661,79	122210,19	234,72
4-5	0,72	4676,40	181248,75	269992,71	411,48

Segue no apêndice 7 fotos retiradas em duas visitas realizadas a área de estudo em agosto e novembro de 2004. Nos mapas de risco à desertificação, segue indicados os locais onde foram retiradas as fotografias.

## 10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A quantificação da desertificação é um problema que vários autores na literatura modelaram. Para se desenvolver políticas sociais e econômicas nesta área é necessário espacializar o problema mostrando os locais de baixo, médio e alto risco à desertificação.

O Estado de Pernambuco uma área de 63% é sertão. Foi visto que a susceptibilidade à desertificação no Estado é grande. O mapeamento em geral está em escala muito pequena. Uma análise por bacia seria muito interessante para definir as áreas mais susceptíveis.

Este trabalho realizou uma modelagem baseado em parâmetros biofísicos e potencial natural de erosão para acesso ao risco à desertificação na bacia do rio Brígida – PE. Foram utilizadas análises multitemporais com 4 imagens, duas para a seca (imagens dos anos 1985 e 2001) e duas para o inverno (imagens dos anos 1987 e 2003). Gerou-se vários mapas temáticos (em Apêndices) para caracterizar melhor o problema espacialmente.

Observa-se que o sensoriamento remoto pode auxiliar no acompanhamento destas áreas, além do conhecimento de topografia, solos, vegetação entre outros.

Diante dos resultados adquiridos se expressam as seguintes conclusões: 1) Em termos de paisagem o modelo tem congruência; 2) Os parâmetros analisados aumentaram de valores; 3) O grau de risco na bacia aumentou, determinando, o que condiz com um aumento na degradação do ecossistema; 4) A inserção do potencial natural de erosão faz-se importante, devido inserir no modelo a variável solo, relevo e chuva. 5) O aumento do grau de risco representa uma pressão sobre recursos ambientais, que com o tempo poderá levar a um estado de degradação avançado na Bacia; 6) A resposta do modelo para o período chuvoso não determina uma avaliação adequada, uma vez que não há uniformidade da paisagem, devido não haver uniformidade de precipitação. A avaliação entre épocas seca e chuvosa seria determinante para analisar a resiliência do ecossistema e ganho de biomassa, que para isso seria necessário ter uma boa espacialização da precipitação; e 7) Do período de 1985 para o período de 1987, houve uma recuperação do ecossistema, o que condiz com um estado de resiliência na Bacia, enquanto para o período de 2001 para o período de 2003 houve uma resposta mínima do ambiente, apesar de ter havido uma precipitação maior na região oeste da Bacia. Esta tendência condiz com uma degradação dos recursos ambientais dando aos recursos ambientais um estado de não-equilíbrio e diminuindo a resiliência do ecossistema.

As recomendações são as seguintes: 1) Ajustar o modelo através de graus intrínsecos de degradação do solo, como: estrutura, matéria orgânica, presença de ervas designativas de solo degradado, elementos químicos, microorganismos, isto é, envolvendo fatores químicos, físicos e biológicos, para o estabelecimento de valores de referência; 2) Avaliar a inserção de outros parâmetros como: fluxo de calor latente, rugosidade da superfície, fração evaporativa, entre outros; 3) Acessar a emissividade através de um modelo direto; 4) Determinar qual tipo de correlação existe entre o modelo e as variáveis do solo; 5) Utilizar as entidades numéricas encontrada pelo modelo e determinar sua relação com o grau de degradação; 6) Realizar análises de solo em vários tipos de paisagem e determinar sua ponderação em relação ao seu estado de resiliência; 7) Observar em campo através de equipamentos (espectro radiômetros, câmeras infravermelho, piranômetros) que tipo de variação ocorre entre os parâmetros e o estado de equilíbrio e degradação do ecossistema e em relação as diferentes paisagens. 8) Relacionar o valor encontrado no modelo e seus parâmetros com o lençol freático, ou seja, identificar qual relação existe entre o modelo e o rebaixamento do lençol freático, já que o desmatamento e a erosão influenciam na recarga de aquíferos. 9) Em alguns desses estudos seria melhor trabalhar com estratigrafia da área de acordo com classes de solos, já que características do solo influenciam na reflectância.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L.J.O. **Degradação do solo e desertificação no Nordeste do Brasil**. Boletim Informático da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.25, p.23-25, 2000.

ACCIOLY, L.J.O.; DA SILVA, F.H.B.B.; DA COSTA, T.C.C.; DE OLIVEIRA M.A.J.; ARRAES, C.L. **Geoprocessamento aplicado à gestão ambiental para o combate à desertificação com base no potencial de perdas de solo por erosão**. Reunião anual da sociedade brasileira de ciência do solo. 2004.

ACCIOLY, L. J. DE O.; OLIVEIRA, M. A.; SILVA, F. H. B. B.; BURGOS, M. **Avaliação de Mudanças no Albedo do Núcleo de Desertificação do Seridó através de Imagens Landsat TM**. Anais X SBRS, Foz do Iguaçu, p. 549-556, 2001.

ALI, J.; MIRZA M. I. **Space Technology In The Mapping Of Desertification In Pakistan**. Adv. Space Res. Vol. 13, No. 11, pp. (11)103-(11)106, 1993.

ANDRADE, S.N.V. **Análise simulada na recuperação de solos afetados por sais e na resposta produtiva dos cultivos**. Piracicaba, 1998. 159p. il. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1998.

ARAÚJO, A.J.R.P. **Desertificação e seca: contribuição da ciência e da tecnologia para a sustentabilidade do semi-árido do Nordeste do Brasil**. Recife: Nordeste, 2002. 63p.: il.

BAKKER, H.W.; JANSSEN, L.L.F.; WEIR, M.J.C.; GORTE, B.G.H.; POHL, C.; WOLDAI, T.; HORN, J.A.; REEVES, C.V. **Principles of Remote Sensing – An introductory textbook**. ITC Educational Textbook Series. Enschede, The Netherlands. 2001. 170p.: il.

BASTIAANSEN, W. **Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art**. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 118p. 1998.

BASTIAANSEN, W. & BAKKER, M. **Use of satellite data in agricultural water management**. EMBRAPA semi-árido. 2000.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen The Netherlands. 1995. 273p.

BRASIL. Ministério da Agricultura (MA). **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado de Pernambuco**. Recife: MA/DNPEA-SUDENE/DRN, 1973. v.1,359 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Planejamento Agrícola. **Aptidão agrícola das terras de Pernambuco**. Brasília: BINAGRE, 1979. 96 p.

CARVALHO, V. C. **Abordagem Multiescala para o Monitoramento de Indicadores do Processo de Desertificação**. Anais X SBSR, Foz do Iguaçu, p. 1539-1551, 2001.

COHEN, M. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. **Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed**. *Geoderma* 124 (2005) 235–252.

COLLADO, A. D.; CHUVIECOW, E.; CAMARASAW, A. **Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina**. *Remote Sensing of Environment*, 65: 255–266. 2002.

COSTA, T.C.C.; ACCIOLY, L.J.O.; OLIVEIRA, M.A.J.; BURGOS, N.; SILVA, F.H.B.B; **Phytomass Mapping of the “Seridó Caatinga” Vegetation by the Plant Area and the Normalized Difference Vegetation Indices**. *Scientia Agricola*, 59,707-715, 2002.

DESMET, P.J., GOVERS, G., 1996. **A GIS-procedure for the automated calculation of the USLE LS-factor on topographically complex landscape units**. *Journal of Soil and Water Conservation* 51, 427– 433.

DREGNE, H.E. **Desertification of arid lands**. London: Harwood Academic publishers, 1983.

ELVIDGE, C. D. AND CHEN, Z. **Comparison of Broad-Band and Narrow-Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices**. *Remote Sensing of Environment* 54:38-48. 1995.

FRANKLIN, J.; DUNCAN, J.; TURNER D. L. **Reflectance of Vegetation and Soil in Chihuahuan Desert Plant Communities from Ground Radiometry Using SPOT Wavebands**. *Remote Sensing Environment*. 46:291-304. 1993.

FRENCH, A. N.; SCHMUGGE, T. J.; KUSTAS, W. P. **Discrimination of Senescent Vegetation Using Thermal Emissivity Contrast**. *Remote Sensing of Environment*. 74:249–254. 2000.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. **Spectral properties of plants**. *Applied Optics*, 4: 11 - 20, 1965.

GEDDES, N.; DUNKERLEY, D. **The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and of gravity drops released from desert shrubs.** *Catena*, 36:303-313, 1999.

GHOSH, T. K. **Environmental impacts Analysis of desertification through remote sensing and land based information system.** *Journal of Arid environments*, 25:141-150. 1993.

GOÏTA, K.; ROYER, A.; BUSSIÈRES, N. **Characterization of Land Surface Thermal Structure from NOAA-AVHRR Data over a Northern Ecosystem.** *Remote Sensing of Environment*. 60:282-298. 1997.

GRIEND, A.A. VAN DE; OWE, M. **On the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for natural surfaces.** *International Journal of Remote Sensing*, 14:1119-1131. 1993.

HUETE, A. R. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI).** *Remote Sensing Environment*. 25:295-309. 1988.

HUETE, A. R. AND WARRICK, A. W. **Assessment of Vegetation and Soil Water Regimes in Partial Canopies with Optical Remotely Sensed Data.** *Remote Sensing Environment*. 32:155-167. 1990.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Recursos naturais e meio ambiente: uma visão do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 1997. 208 p.

KARZMIERCZAK, M.L. **Desenvolvimento de um Algoritmo para Modelar a Susceptibilidade de Desertificação no Nordeste do Brasil: Algoritmo ISD<sub>NEB</sub>.** In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1998. Anais INPE, 11-18 Setembro, 1998.

KERR, Y. H.; LAGOUARDE, J. P.; IMBERNON, J. **Accurate Land Surface Temperature Retrieval from AVHRR Data with Use of an Improved Split Window Algorithm.** *Remote Sensing of Environment*. 41:197-209. 1992.

KUNTSCHIK, G. **Implementação de um modelo de perda de solo por erosão hídrica utilizando técnicas de geoprocessamento.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE. São José dos Campos, SP. 1996.

LEPRUN, JEAN-CLAUDE. **Manejo e conservação de solos do Nordeste.** Recife: SUDENE-DRN, 1986. 271p.: il.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: J. Willey, 1994. 750 p.

LIU, Y.; GAO, J.; YANG Y. **A holistic approach towards assessment of severity of land degradation along the great wall in northern shaanxi province, China**. *Environmental Monitoring and Assessment*, 82: 187-202, 2003.

MADEIRA NETO, J. da S.; MENEZES, P.R. **Sensoriamento Remoto: refletância dos alvos naturais**. Ed. Universidade de Brasília – UNB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262p.

MAIA, T.C. **Estudo e Análise de Poligonais segundo a NBR 13.133 e o Sistema de Posicionamento Global**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1999. 127p.

MITRA, B.; SCOTT, H.D.; DIXON, J.C.; MCKIMMEY, J.M. **Applications of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed**. *Geoderma* 86:183–209. 1998.

MMA. **Diretrizes para a Política Nacional de Controle da Desertificação**. 1998. 40p.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 250 p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

MOUAT, D.; LANCASTER, J.; WADE, T.; WICKHAM, J.; FOX, C.; KEPNER, W.; BALL, T. **Desertification evaluated using integrated environmental assessment model**. *Environmental Monitoring and Assessment* 48: 139-156, 1997.

NOVO, E.M. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: E. Blucher, 1989. 308p.

OKIN, G. S.; MURRAY, B.; SCHLESINGER W. H. **Degradation of sandy arid shrubland environments: observations, process modelling, and management implications**. *Journal of Arid Environments* 47: 123–144. 2001.

PALMER, A. R. and ROOYEN, A. F. van . **Detecting vegetation change in the southern Kalahari using Landsat TM data** *Journal of Arid Environments* 39: 143–153. 1998.

PERNAMBUCO/SECTMA. **The State Policy to Control Desertification.** 1999. 31p.: il.

PRINCE, S.D. **2 Spatial and Temporal Scales for Detection of Desertification.** Geography Department, University of Maryland, 2002. <http://www.geog.umd.edu/news/dahlem.pdf>

QI J., CHEHBOUNI A., HUETE A. R., KERR Y. H., SOROOSHIAN S. A. **Modified Soil Adjusted Vegetation Index.** Remote Sensing Environment. 48:119-126. 1994.

RHODES, S. L. **Rethinking Desertification: What Do We Know and What Have We Learned?** World Development, Vol. 19, No. 9, pp. 1137-1143, 1991.

RINGROSE, S. AND MATHESON, W. **Spectral Assessment of Indicators Botswana Hardveld Environment of Range Degradation in the Botswana Hardveld Environment.** Remote Sensing of Environment. 23:379-396. 1987.

ROBINOVE, C. J.; CHAVEZ, P. S.; GEHRING, D.; HOLMGREN, R. **Arid Land Monitoring Using Landsat Albedo Difference Images.** Remote Sensing of Environment, 11:133-156. 1981.

RODRIGUES, V. **Pesquisa dos estudos e dados existentes sobre desertificação no Brasil.** Brasília: Projeto BRA93/036, 1997. 65p.

RUBIO, J. L. AND BOCHET, E. **Desertification indicators as diagnosis criteria for desertification risk assessment in Europe.** Journal of Arid Environments 39: 113–120. 1998.

SAADI, A. **Os sertões que viram desertos.** Boletim Informativo da Sociedade de Ciência do Solo, v. 25, n. 1, p. 10-17, jan/mar. 2000.

SAHAI, B. Review. **Remote sensing of deserts: the Indian experience.** Journal of Arid Environments. 25:173-185. 1993.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SAMPAIO, Y.; VITAL, T.; ARAÚJO, S.B.; SAMPAIO, G.R. **Desertificação no Brasil: conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência.** Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003. 202p.: il.

SANTOS, A. A. **Geodésia: geodésia elementar e princípio de posicionamento global (GPS).** Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001. 229p.: il, fig., tab.

SCHÄDLICH, S.; GÖTTSCHE, F. M.; OLESEN, F.S. **Influence of Land Surface Parameters and Atmosphere on METEOSAT Brightness Temperatures and Generation of Land Surface Temperature Maps by Temporally and Spatially Interpolating Atmospheric Correction.** *Remote Sensing of environment*, 75:39-46. 2001.

SECTMA/Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Caatinga. **Cenários para o Bioma Caatinga.** Recife: SECTMA,2004. 283p.: il.

SILVA, A.M. **Índice de erosividade e sua relação com a pluviometria e coeficiente de chuva em Juazeiro (BA).** Piracicaba, São Paulo, Brasil. 2001.

SILVA, A.M. **Rainfall erosivity map for Brazil.** *Catena*. 57:251–259. 2004.

UNEP; GLAVGIDROMET **National Action Programme To Combat Desertification In Republic Of Uzbekistan.** Tashkent 1999r.

<http://www.unccd.int/actionprogrammes/asia/national/2000/uzbekistan-eng.pdf> Acesso em 10/2003.

UN **General Assembly Report on the United Nations/European Space Agency/Committee on Space Research Workshop on Data Analysis and Image-Processing Techniques** Distr.: General 14 August 2001 Original: English. Damascus, 25-29 March 2001. [http://www.osa.unvienna.org/Reports/AC105\\_765E.pdf](http://www.osa.unvienna.org/Reports/AC105_765E.pdf)

UNITED NATIONS **Convention to Combat Desertification.** CONFERENCE OF THE PARTIES Second session. Dakar, 17 November 1998. <http://www.geic.or.jp/interlinkages/docs/ccd.PDF> Acesso em 10/2003.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Processos de desertificação ocorrentes no Nordeste do Brasil: sua gênese e sua contenção.** Recife: convênio SEMA/SUDENE. 1982. 101p.

VEIHE, A. **The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana.** *Geoderma* 106:101–120. 2002.

WIEGAND, C. L., RICHARDSON, A. J., ESCOBAR, D. E., AND GERBERMANN, A. H. **Vegetation indices in crop assessments,** *Remote Sensing Environment*. 35:105-119. 1991.

ZAPE – **ZONEAMENTO AGROECOLÓGICO DO ESTADO DE PERNAMBUCO**/Fernando Barreto Rodrigues e Silva [et al.]. Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de

Pesquisa e Desenvolvimento – UEP. Governo do Estado de Pernambuco (Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária), 2001. CD-ROM.