

Hernande Pereira da Silva

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS SOB RISCO DE DESERTIFICAÇÃO
NO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO A PARTIR DE IMAGENS
DE SATÉLITES**

Recife, 2009

Hernande Pereira da Silva

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS SOB RISCO DE
DESERTIFICAÇÃO NO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO A
PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITES**

Trabalho de Tese apresentado ao programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências do Solo

Recife, 2009

Ficha catalográfica

S586m Silva, Hernande Pereira da
Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semiárido de Pernambuco a partir de imagens de satélites / Hernande Pereira da Silva. -- 2009.
153 f. : il.

Orientador: Mateus Rosas Ribeiro.
Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, Recife, 2009.
Referências.

1. Imagens de satélites 2. Resposta espectral 3. Atributos dos solos 4. Luvisolos 5. Planossolos 6. Neossolos 6. Vulnerabilidade 7. Mapa de risco de desertificação
I. Ribeiro, Mateus Rosas, orientador II. Título

CDD 631.4

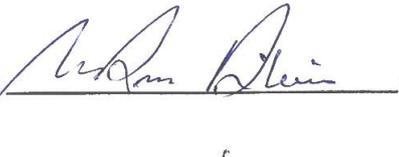
Hernande Pereira da Silva

**MAPEAMENTO DAS ÁRES SOB RISCO DE
DESERTIFICAÇÃO NO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO A
PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITES**

Trabalho de tese apresentado ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora em 05 de maio de 2009.

Orientador: Prof. PhD. Mateus Rosa Ribeiro (UFRPE)

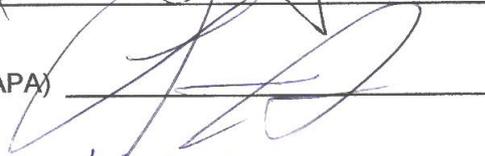


Examinadores:

PhD. Iêdo Bezerra Sá (EMBRAPA)



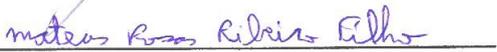
PhD. Luciano José de oliveira Accioly (EMBRAPA)



D. SC. Izabel Cristina de Galindo (UFRPE)



D. SC. Mateus Rosa Ribeiro Filho (UFRPE)



Recife, 2009

“Mas os que esperam no SENHOR renovarão as suas forças e subirão com asas como águias; correrão e não se cansarão; caminharão e não se fatigarão” (Isaías 40:31).

Dedico

In memoriam

A minha mãe Laurecy Ribeiro da Silva, a minha avó Matilde Ribeiro de Lira, meu irmão Hevandro Ribeiro da Silva, meu sogro José Oliveira Malafaia e meu tio Henrique Pereira da Silva.

E ofereço

À Jesus Cristo, autor e consumidor da minha fé,
aos meus pais, a minha querida esposa Ruth
Malafaia e aos meus preciosos filhos Heder
Matheus e Hadler Rodrigo.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, Senhor e criador de todas as coisas;

A JESUS CRISTO autor e consumidor da minha fé;

Aos meus pais, Hercílio Pereira da Silva e Maria da Conceição por me conduzirem ao melhor Caminho;

A minha esposa Ruth Malafaia Pereira, pelo imenso amor, solidariedade e companheirismo;

Aos meus filhos Heder Matheus e Hadler Rodrigo que compreenderam a ausência paterna em momentos importantes desses últimos quatro anos;

Ao meu irmão Hercílio Filho, inspiração e modelo para minha carreira profissional;

As minhas irmãs Hercilene e Hercileide, aos meus irmãos Cláudio Márcio e Carlos Henrique e respectivas famílias, que de várias maneiras e oportunidades contribuíram para que eu alcançasse este objetivo;

A minha querida tia Nuvenil Pereira, exímia professora de Português e Latim que me ensinou os primeiros passos do Saber;

Ao Pastor Jeconias e Iracema Lisboa e membros da Igreja Batista de Largo da Paz, por me apoiarem e orarem por mim;

A Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia de Pernambuco – IFPE, antigo CEFET-PE, pela oportunidade de realizar o Curso;

Ao Magnífico Reitor da UFRPE, professor Valmar Correia de Andrade, pela amizade e pelo apoio institucional;

Ao Vice-reitor da UFRPE, professor Reginaldo Barros, pela amizade e incentivo profissional;

Ao Programa de Pós-Graduação de Ciência do Solo do Departamento de Agronomia da UFRPE, pelo privilégio de cursar o Doutorado;

Ao GEOSERE, por possibilitar a realização da pesquisa, ajudando com toda sua infraestrutura;

Ao meu orientador Professor PhD Mateus Rosas Ribeiro, grande conhecedor da Ciência do Solo, pela orientação segura e firme, ensino e experiência como pesquisador, do qual adquiri marcantes conhecimentos nesta fase da minha vida profissional;

A professora Dra. Izabel Cristina de Luna Galindo pela amizade e pelas orientações e dados de campo que foram de grande relevância para a nossa pesquisa;

Ao professor Dr. Clístenes Willians Nascimento pela compreensão e orientação nos momentos difíceis;

Ao professor Dr. Emídio Cantídio de Oliveira Filho pela amizade e incentivo na pesquisa científica.

Ao professor Dr. Fernando José Freire por acreditar em nosso objetivo profissional;

A professora Dra Maria Betânia Freire pelos grandes ensinamentos da química e mineralogia do solo;

Aos professores Ramón Cantalice, Maria de Jesus Rodal e Mateus Rosas Ribeiro Filho, pelas corretas contribuições na minha qualificação;

A todos os professores que fazem o programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da UFRPE pela dedicação e profissionalismo;

A Maria do Socorro, querida secretária da Pós-graduação, pelas lembranças e cobranças;

Aos colegas professores do Departamento de Tecnologia Rural da UFRPE que me apoiaram para que eu completasse essa jornada em minha vida;

Aos colegas professores do Curso Superior em Gestão Ambiental do IFPE que colaboraram no decorrer do Doutorado;

Ao professor Dr. Mário Monteiro Rolim, pelo contínuo incentivo para que eu realizasse o Doutorado;

Ao Dr. Luciano Accioly por repassar a sua experiência como pesquisador na área de sensoriamento remoto;

Ao Dr. Iêdo Bezerra de Sá, um amigo que contribuiu bastante na construção desta Tese;

Ao Dr. José Coelho de Araújo Filho, da Embrapa, pelos enriquecedores conhecimentos sobre classificação de solos;

Ao amigo Luiz Carlos Lins, por sempre está presente nos momentos trabalhosos no GEOSERE durante a elaboração da Tese;

A Marco Aurélio que contribuiu bastante para as nossas apresentações;

A Gustavo Sobral pela ajuda na edição final dos mapas;

A Sandro Barbosa Figueira pelas discussões sobre o tema;

Aos bolsistas, estagiários e voluntários, que contribuíram, com maior ou menor envolvimento, para a execução dos trabalhos no Laboratório. Agradeço particularmente a Odilon José Araújo da Silva, Arthur Lourenço de Melo, Hilo Douglas Bezerra da Silva, Bruno Cavalcante da Rocha, Clériston Silva dos Anjos, Ana Cláudia Villar e Luna Gusmão, Annelise da Silva Lopes, Bruna Patrícia Barbosa de Alencar, Ivaldo Rodrigues de Araujo;

Aos colegas da Pós-graduação, companheiros de provas e trabalhos, que participaram ativamente nos primeiros anos do Curso;

Aos alunos do curso superior de Tecnologia em Gestão Ambiental do IFPE, meus “cobaias” em técnicas de processamento digital de imagens;

Aos meus alunos de Agronomia, Engenharia Florestal e Engenharia de Pesca, que compreenderam a dificuldade de ministrar aulas e desenvolver uma Tese simultaneamente;

Finalmente, agradeço àqueles que me ajudaram a exercitar a paciência, a humildade e a perseverança, fundamentais para a conclusão deste Trabalho;

SUMÁRIO

	Página
Lista de Figuras	xv
Resumo	xviii
Abstract	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Desertificação	3
2.1.1 Indicadores de Processos de Desertificação sugeridos pela ONU (Escala Regional e Global)	5
<i>a) População vivendo abaixo da linha de pobreza nas áreas secas;</i>	5
<i>b) Índice nacional de precipitação mensal;</i>	5
<i>c) Índice de vegetação derivado de imagens de satélites;</i>	6
<i>d) Terras afetadas pela desertificação.</i>	6
2.1.2 Indicadores de processos de desertificação	7
<i>Características e atributos do solo que podem ser alterados com os processos de desertificação</i>	8
<i>Matéria Orgânica</i>	9
<i>Textura</i>	9
<i>Frações granulométricas grossas (areia)</i>	10
<i>Frações granulométricas finas (silte e argila)</i>	10
<i>Relação silte/argila</i>	10
<i>Estrutura</i>	11
<i>Porosidade</i>	12
2.1.3 O Processo de desertificação no Nordeste	13
2.1.4. O Processo de desertificação em Pernambuco	16
2.2 Solos das áreas em processo de desertificação em Pernambuco	17
2.3. Características de solos susceptíveis a desertificação em Pernambuco	18
2.3.1 Luvisolos	18
2.3.2 Planossolos	19
2.3.3 Neossolos Litólicos	21

2.4 Características do clima do Estado de Pernambuco	22
2.5 Sensoriamento Remoto	24
<i>Energia eletromagnética</i>	24
<i>Espectro eletromagnético</i>	26
<i>Comportamento espectral de alvos naturais</i>	26
<i>Vegetação</i>	26
<i>Solos</i>	27
<i>Água</i>	27
2.5.1 Albedo	28
2.5.2 O Albedo da cobertura vegetal e do solo	29
2.5.3 Características dos Principais Sensores	31
<i>Sistema Sensor</i>	31
<i>Satélites LANDSAT</i>	31
2.5.4 Interação da Radiação Eletromagnética com o Solo	33
2.5.5 Parâmetros do solo que influenciam a REM	34
<i>Materia Orgânica</i>	34
<i>Textura</i>	36
<i>Temperatura</i>	38
<i>Umidade</i>	39
<i>Óxidos de Ferro</i>	41
<i>Cor</i>	42
2.5.6 Relação solo e cobertura vegetal	43
2.5.7 Comportamento espectral dos solos	43
2.5.8 Processamento Digital de Dados	44
2.5.9 Normalized Difference Vegetation Index - NDVI	44
2.5.10 Temperatura da Superfície (Ts)	48
2.5.11 Sistema de informações geográficas (SIG)	48
3. MATERIAL E MÉTODOS	50
3.1 Localização da Área de Estudo	50
3.1.1 Localização das áreas piloto de estudo	50
3.1.1.1 Município de Floresta	51
<i>Aspectos Fisiográficos</i>	51
<i>Clima</i>	52

<i>Vegetação</i>	52
<i>Geologia</i>	53
3.1.1.2 Município de Jataúba	53
<i>Aspectos Fisiográficos</i>	53
<i>Clima</i>	54
<i>Vegetação</i>	54
3.2 Materiais utilizados	56
3.3 Metodologia	60
3.3.1 Aquisição e seleção das imagens LANDSAT	62
3.3.2 Composição colorida	62
<i>Leitura de pixels</i>	64
3.3.3 Georreferenciamento e mosaicagem das imagens	65
3.3.4 Operações de contraste de imagem	66
<i>Operação Linear</i>	66
<i>Operação Máximo e Mínimo</i>	67
<i>Operação Negativo</i>	68
3.3.5 Cálculo do NDVI	70
3.3.6 Imagens Negativo	72
3.3.7 Análise espacial das áreas extraídas da imagem Negativo e NDVI	73
3.3.8 Indicação e Vetorização de áreas dos solos susceptíveis à desertificação	74
3.3.9. Vulnerabilidade das unidades de mapeamento dos solos	74
3.3.10. Geração do SIGSOLODESERT	74
3.3.11. Quantificação das áreas sob processos de desertificação	75
3.3.12. Mapas Temáticos	75
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1. Áreas suscetíveis à desertificação das áreas piloto	77
4.1.1 Carta-Imagem NEGATIVO do município de Floresta	77
4.1.2 Carta-Imagem NEGATIVO do município de Jataúba	81
4.1.3 Cartas de solos do município de Floresta com indicação de áreas degradadas	84
4.1.4 Carta de solos do município de Jataúba com indicação de áreas	

sob processos de desertificação	88
4.1.5 Carta imagem NEGATIVO da evolução das áreas degradadas do município de Floresta (período de 1987 a 1999)	91
4.1.6 Cartas de solos com a evolução da degradação no município de Jataúba (período de 1975 – 2000)	91
4.1.7 Carta de NDVI do município de Floresta	96
4.1.8 Carta de NDVI do município de Jataúba	99
4.2 Áreas suscetíveis à desertificação do semi-árido de Pernambuco	101
4.2.1. Áreas degradadas a partir das imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco	101
4.2.2 Mapa de solos do semi-árido de Pernambuco	108
4.2.3. Mapa de vulnerabilidade dos solos à degradação	110
4.2.4. Mapa de pluviosidade com as áreas degradadas extraídas do mosaico de NEGATIVO/LANDSAT	119
4.2.5. Mapa de NDVI do semi-árido de Pernambuco a partir de imagens LANDSAT	121
4.2.6 Áreas degradadas a partir de imagens NEGATIVO/LANDSAT com NDVI do semi-árido de Pernambuco	124
4.2.7 Mapa de risco de desertificação do estado de Pernambuco	125
5. CONCLUSÕES	133
BIBLIOGRAFIA	135

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. Mapa das áreas abrangidas pelo trópico semi-árido	04
2.2. Áreas Suscetíveis à Desertificação – ASD	15
2.3. Perfil MF-1 Luvissole Crômico Órtico planossólico solódico em ambiente moderadamente degradado de Floresta-PE	19
2.4. Perfil DJ-2 Planossolo Nátrico Órtico salino em ambiente degradado de Jataúba-PE	21
2.5. Radiação Eletromagnética (REM).	25
2.6. Padrão de resposta espectral dos principais alvos da superfície terrestre	28
2.7. Comportamento espectral de solos com materiais orgânicos sápricos, hêmicos e fíbricos.	35
2.8. Assinaturas espectrais de solos com quantidades de água diferentes	40
2.9. Imagem de NDVI gerada a partir de imagens do NOAA 16	46
2.10. Escala de cores associadas aos valores de NDVI e respectivas feições nas imagens de satélites	47
3.1. Localização da área de estudo	50
3.2. Localização dos municípios de Floresta e Jataúba, Pernambuco	51
3.3. Imagem LANDSAT composição colorida falsa cor 432RGB do município de Floresta. A aquisição da imagem foi em 30 de setembro de 1999	55
3.4. Imagem LANDSAT composição colorida falsa cor 432RGB do município de Jataúba. A aquisição da imagem foi em 12 de novembro de 2001	55
3.5. Fluxograma da metodologia para geração do mapa de risco de desertificação do semi-árido de Pernambuco	61
3.6. Composição colorida em R4G3B2 – Imagens do sensor TM/LANDSAT 5 de outubro de 1987 e do sensor ETM ⁺ /LANDSAT 7 de setembro de 1999 respectivamente sem correção radiométrica	63
3.7. Composição colorida em R4G3B2 – Imagens do sensor TM/LANDSAT 5 de outubro de 1987 e do sensor ETM ⁺ /LANDSAT 7 de setembro de 1999 respectivamente com correção radiométrica	64
3.8. Escala de níveis de cinza com os valores em RGB	65
3.9. Histograma Linear	67
3.10. Histograma Máximo/Mínimo	68
3.11. Histograma Negativo	68
3.12. Imagem NEGATIVO de parte do município de Jataúba-PE a partir das	

imagens CCD/CBERS 2B adquirida em 20 de julho de 2006	69
3.13. Grade de valores numéricos de NDVI para o município de Floresta-PE a partir das imagens TM/LANDSAT 5 (outubro 1987) e ETM ⁺ /LANDSAT 7 (setembro 1999).	71
3.14. Imagem de NDVI do município de Floresta a partir das imagens TM/LANDSAT 5 (outubro 1987) e ETM ⁺ /LANDSAT 7 (setembro 1999).	72
3.15. imagem NEGATIVO da parte norte do município de Jataúba a partir de imagens ETM ⁺ /LANDSAT, composição 432 em RGB (12 de novembro de 2001).	73
4.1a. Carta imagem NEGATIVO do município de Floresta com indicação de áreas degradadas, a partir de imagens do sensor MSS/LANDSAT 2 adquiridas em 05 de novembro de 1976	79
4.1b. Carta imagem NEGATIVO do município de Floresta com indicação de áreas degradadas, a partir de imagens do sensor ETM ⁺ /LANDSAT 7 adquiridas em 30 de setembro de 1999	80
4.2a. Carta imagem NEGATIVO do município de Jataúba com indicação de áreas degradadas a partir de imagens do sensor MSS/LANDSAT 2, adquiridas em 12 de novembro de 1975	82
4.2b. Carta imagem NEGATIVO com indicação de áreas degradadas do município de Jataúba, sensor ETM ⁺ /LANDSAT 7, adquiridas em 12 de novembro de 2000.	83
4.3a. Carta de solos de Floresta com indicação de áreas sob processos de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/LANDSAT de 23 de outubro de 1987	85
4.3b Ambiente degradado em Floresta na área do perfil DF2	86
4.3c. Carta de solos de Floresta com indicação de áreas sob processos de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/LANDSAT adquiridas em 30 de setembro de 1999	87
4.4a. Carta de solos do município de Jataúba com indicação de áreas sob processo de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/TM/LANDSAT adquiridas em 12 de novembro de 2000	89
4.4b. Ambiente degradado em Jataúba, na área do perfil DJ-2	90
4.5. Carta Imagem NEGATIVO do município de Floresta com indicação de áreas sob processos de desertificação em 23 de outubro de 1987 e em 30 de setembro de 1999	92
4.6a. Carta de solos de Jataúba com áreas degradadas extraídas das	

imagens MSS/LANDSAT adquiridas em 1975	93
4.6b. Carta de solos de Jataúba com áreas degradadas extraídas das imagens TM/LANDSAT adquiridas em 1990	94
4.6c. Carta de solos do município de Jataúba com áreas degradadas extraídas das imagens ETM ⁺ /LANDSAT adquiridas em 2000.	95
4.6d. Carta de solos do município de Jataúba com indicação da evolução histórica das áreas sob processo de desertificação extraídas das imagens NEGATIVO/LANDSAT dos anos de 1975, 1999 e 2000	97
4.7. Carta de NDVI do município de Floresta a partir das imagens TM/LANDSAT 5 (outubro 1987).	98
4.8. Carta de NDVI de Jataúba com indicação de áreas sob processos de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/TM/LANDSAT 7 adquiridas em 23 de novembro de 2000.	100
4.9. Áreas degradadas a partir das imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco.	102
4.10. Área moderadamente degradada no município de Cabrobó delimitada no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco.	105
4.11. Áreas moderadamente degradadas e áreas degradadas no município de Santa Maria da Boa Vista delimitadas no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco	106
4.12. Áreas gravemente degradada no município de Santa Maria da Boa Vista delimitadas no mosaico NEGATIVO/LANDSAT do sertão de Pernambuco.	107
4.13. Mapa de solos do semi-árido de Pernambuco EMBRAPA Solos (2001)	109
4.14. Mapa de vulnerabilidade de solos do semi-árido de Pernambuco	111
4.15: Mapa de pluviosidade com as áreas degradadas extraídas do mosaico de NEGATIVO/LANDSAT	120
4.16. Mapa do NDVI a partir do mosaico de imagens LANDSAT 5 do semi-árido de Pernambuco - 1990.	123
4.17. Áreas degradadas a partir de imagens NEGATIVO/LANDSAT com NDVI do semi-árido de Pernambuco.	125
4.18. Mapa de NDVI do semi-árido de Pernambuco – NDVI a partir das imagens LANDSAT 5 - 2008.	127
4.19. Mapa de risco de desertificação de Pernambuco	130

SILVA, Hernande Pereira da; Doutor em Ciência do solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco, maio de 29009. **Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélite.** Orientador: Mateus Rosas Ribeiro. Conselheira: Izabel Cristina de Luna Galindo.

RESUMO

O rápido desenvolvimento do sensoriamento remoto e do geoprocessamento, nas últimas décadas do século XX, resultou do surgimento de diversos problemas de ordem mundial, tais como a poluição e a exaustão dos recursos naturais, a escassez de alimentos e a desertificação, cuja indicação de soluções depende de meios rápidos e eficientes de coleta e análise de dados. O sensoriamento remoto e o geoprocessamento são importantes tecnologias para a obtenção e análise de informações de objetos e/ou fenômenos que ocorrem na superfície da terra. A utilização de imagens de satélites nos estudos de solos tem sido crescente nos últimos anos, em virtude dos resultados satisfatórios que esta ferramenta tem trazido na redução dos custos dos levantamentos. Considerando estes aspectos, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de metodologias eficientes nos estudos sobre desertificação. A indicação de áreas suscetíveis aos processos de desertificação utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento é um estudo de grande relevância para a comunidade científica brasileira, considerando a necessidade de medidas preventivas de controle deste processo. Neste estudo, imagens de satélites e técnicas de processamento digital de imagens foram utilizadas na obtenção de informações espaciais correlacionadas às características do solo e da cobertura vegetal a ele associada, com o objetivo de gerar um modelo digital de análise espacial de solos em áreas sob risco de processos de desertificação no Estado de Pernambuco. Para isso foi feita a análise espacial de uma série histórica de imagens de satélites do Sertão de Pernambuco. Foram utilizadas imagens do período de 1975 a 2008 dos satélites LANDSAT. As imagens foram georreferenciadas e processadas digitalmente. Através da metodologia aplicada na análise espacial das imagens processadas foi possível delimitar áreas degradadas por processos erosivos. Foi gerado um Sistema de Informações Geográficas para solos sob risco de processos de desertificação no Estado de

SILVA, H.P.

Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites

Pernambuco (SIGSOLODESERT). Utilizando o SIG, as áreas degradadas extraídas das imagens foram plotadas sobre o mapa de solos de Pernambuco (EMBRAPA Solos, 2001). Na análise verificou-se que LUVISSOLOS, PLANOSSOLOS e NEOSSOLOS LITÓLICOS são os solos mais suscetíveis aos processos de desertificação nas regiões estudadas. A partir desses resultados foi elaborado o mapa de risco de desertificação do Estado de Pernambuco.

SILVA, H.P.

Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites

SILVA, Hernande Pereira da; Doutor em Ciência do solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco, maio de 29009. **Mapping areas under risk of desertificatiom in semi-árid of Pernambuco state, Brazil since satellite images.** Advisers: Mateus Rosas Ribeiro, Izabel Cristina de Luna Galindo.

ABSTRACT

The quick development of remote sensing and of geoprocessing in the last decades of the 20th century came up with the appearance of several problems of world-wide order, such as pollution and exhaustion of the natural resources, shortage of food and desertification, whose indication of solutions depends on quick and efficient ways of data collection and analysis. Remote sensing and geoprocessing are important technologies to obtain and analyze information of objects and / or phenomena which take place in the land surface. The use of satellite images in the study of soils has increased in the last years, due to the satisfactory results of this tool in reducing the costs of soil surveys. The objective of this study is to contribute with scientific knowledge for the development of efficient methodologies to be used in the desertification studies. The indication of lands suitable to the processes of desertification using remote sensing and geoprocessing is a study of great relevance for the Brazilian scientific community, allowing the implementation of actions towards the prevention of the desertification processes. Space analysis of a historical series of satellite images of the semi-arid region of Pernambuco State was carried out using LANDSAT and CBERS images of the period from 1975 to 2008. The images were georeferencing and processed digitally. The applied methodology allowed the identification of degraded areas by erosive processes. The Geographical Information System (GIS) was applied for the lands under risk of desertification in Pernambuco State (SIGSOLODESERT). Using the GIS, the selected areas were plotted on the soil map of Pernambuco State (EMBRAPA Solos, 2001). The results showed that LUVISOLS, PLANOSOLS and LITHIC NEOSOLS were the most suitable soils to the processes of desertification in the studied region. A map of risk of desertification was produced.

1. INTRODUÇÃO

Estudos vêm sendo realizados no sentido de identificar, mais precocemente, áreas suscetíveis aos processos de desertificação, a fim de que sejam criados e implantados programas de manejo adequados, que atuem de forma preventiva frente a estes processos.

Historicamente os meios mais utilizados para realização de inventários, são essencialmente abióticos, com algumas exceções, em que foram observadas “in situ” a vegetação e fauna, particularmente em levantamentos de pequena escala.

Embora o sensoriamento remoto através de sensores orbitais tenha frustrado as expectativas daqueles que dele esperavam um produto relativamente acabado, e que, rapidamente, pudesse informar sobre as condições dos processos de desertificação em nível regional (Thornes, 2001), a literatura sobre o uso desta ferramenta no monitoramento da cobertura vegetal em diferentes escalas e para diferentes ambientes, tem mostrado a relevância da sua aplicação.

A importância do sensoriamento remoto como ferramenta para avaliar os processos de desertificação fica ainda mais evidente, quando se verifica que um dos quatro indicadores recomendados pela ONU para avaliar o problema é o índice de vegetação derivado de imagens de satélites.

Não se pode desprezar a importância de programas como o NOAA, o LANDSAT e o SPOT que, há décadas, estão imageando a superfície da Terra, oferecendo a oportunidade para se estudar os processos resultantes da intervenção humana ou da natureza, em longo prazo, como é o caso da desertificação.

No Brasil, os relatos sobre desertificação se intensificaram a partir das décadas de 70 e 80 (Rodrigues, 1997). No Nordeste, um dos primeiros trabalhos de identificação de áreas em processo avançado de desertificação com base em imagens de satélite foi realizado por Vasconcelos Sobrinho (1982). Com base na interpretação visual de imagens do MSS/LANDSAT de 1976 e 1978, esse autor mapeou, na escala de 1:500.000, oito possíveis núcleos de desertificação na região semi-árida Brasil.

Apesar da importância do levantamento de campo, o alto custo para percorrer extensas áreas dificulta sua execução em um contexto estadual ou regional. Isto se

evidencia na região Nordeste, onde a logística e extensão territorial são fatores que oneram os trabalhos de campo nesses estudos.

Para superar esta dificuldade, o Sensoriamento Remoto aparece como uma tecnologia que permite a realização desses levantamentos a custos relativamente baixos, minimizando a quantidade de trabalho de campo e fornecendo dados com maior rapidez.

Com base em imagens do sensor MSS do satélite LANDSAT, Aouad & Condori (1986) identificaram várias áreas vulneráveis aos processos de desertificação no estado da Bahia e Carvalho (1986) usou imagens do mesmo sensor para estudar a cobertura vegetal como indicadora dos processos de desertificação em Quixaba, Pernambuco.

O sensoriamento remoto tem sido utilizado para o acompanhamento das secas (Nobre *et al.*, 1992) e para delimitar áreas degradadas susceptíveis aos processos de desertificação no estado do Ceará (Soares *et al.*, 1992).

Partindo da premissa de que existe forte relação entre a cobertura vegetal e os tipos de solos pretende-se, neste estudo, aplicar as tecnologias do sensoriamento remoto e do geoprocessamento na indicação de áreas degradadas, suscetíveis aos processos de desertificação no estado de Pernambuco e estabelecer relações entre essas áreas e as classes de solos, com vistas a elaborar um mapa de risco de desertificação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Desertificação

A Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (*United Nations*, 2006a) conceitua a desertificação como 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”.

Segundo Vasconcelos Sobrinho (1978), desertificação pode ser definida como “O processo de degradação progressiva da vegetação, do solo e dos recursos hídricos, resultado de condições climáticas e condições do solo ou ações humanas, ou ambas, levando a destruição do ecossistema primário, redução da produtividade e perda da capacidade de auto-recuperação do solo”.

De acordo com o capítulo 12 da Agenda 21, define-se desertificação como sendo a degradação da terra nas regiões áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas, resultantes de vários fatores, entre eles as variações climáticas e as atividades humanas, sendo que por “degradação da terra” se estende a degradação dos solos, dos recursos hídricos, da vegetação e a redução da qualidade de vida das populações afetadas (MMA, 2000).

Vasconcelos Sobrinho (1982) concluiu que as áreas submetidas aos processos de desertificação no semi-árido brasileiro “apresentam-se com uma fisionomia típica denunciadora, facilmente percebida para quem as sobrevoa em voo baixo, de 50 a 150 metros sobre o solo, e, logo em seguida, realiza investigações por terra para melhor detalhamento”. Nas áreas afetadas, a vegetação se apresenta de porte reduzido, com algumas espécies com sintomatologia de nanismo (Pereiro, *Aspidosperma* sp), e concentração diluída, ou seja, com maior permeabilidade do que nas demais áreas, geralmente coincidindo com a presença da caatinga hiperxerófila. Nesse tipo de caatinga e de solo, a desertificação pode surgir espontaneamente, havendo, pois, a possibilidade de sua preexistência no Nordeste, antes do aparecimento do colonizador.

O mesmo autor ainda afirmou que toda caatinga hiperxerófila é uma área presumivelmente suscetível ao processo de desertificação, o qual se acentua a cada estiagem anual e, principalmente, após cada seca. Quando o período chuvoso volta,

verifica-se um esforço de recuperação que nem sempre é recompensado integralmente. E assim, nesse balanço incerto entre recuperação e degradação, é difícil descobrir qual a condição que prevalecerá. “Mas se o homem interfere negativamente, então é certo que a desertificação prevalece”.

No Brasil, as áreas que se enquadram na abrangência do conceito de desertificação aceito pelas Nações Unidas são aquelas abrangidas pelo trópico semi-árido (Figura 2.1). O trópico semi-árido, conforme definição da extinta SUDENE (PANBRASIL, 2004) compreende uma área de 980.711 km², distribuídos em oito estados do Nordeste e municípios no norte de Minas Gerais.

A ação humana, por meio de atividades agropecuárias e mineradoras predatórias e do desmatamento, tem contribuído para a evolução dos processos de desertificação de grandes áreas em algumas regiões do trópico semi-árido brasileiro.

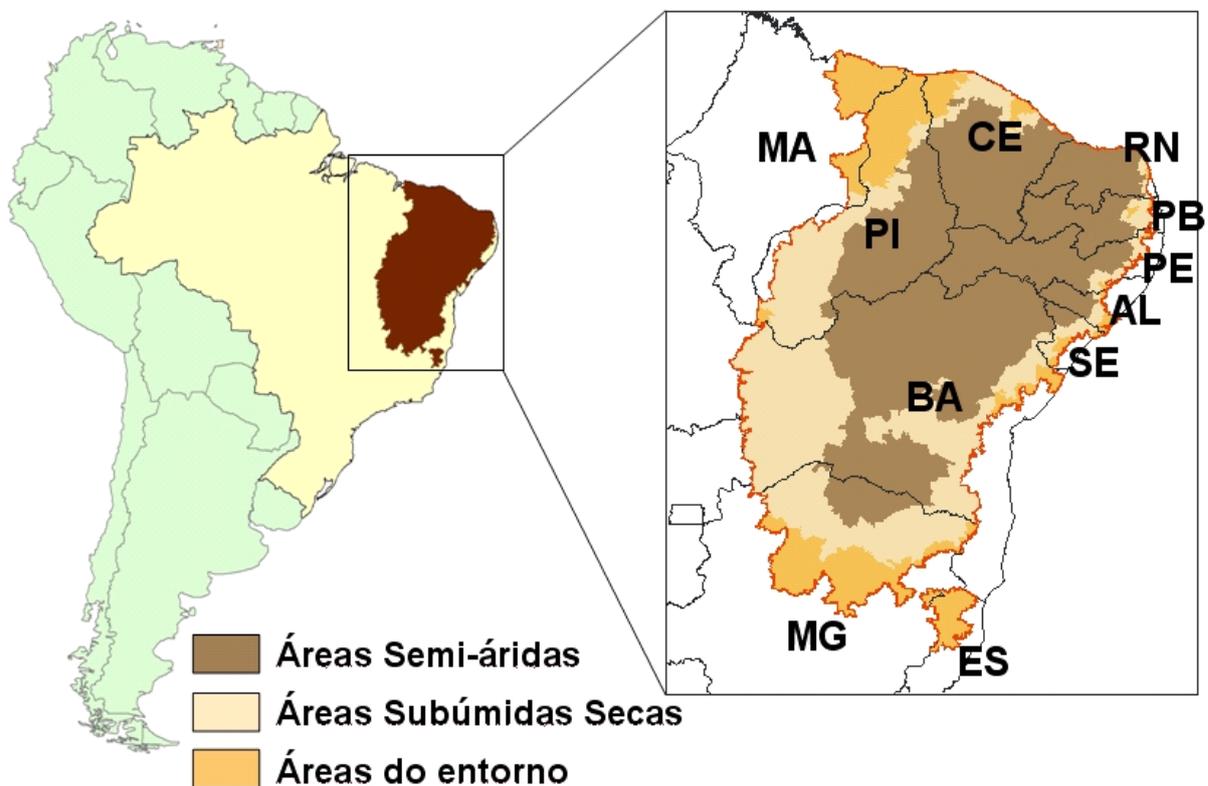


Figura 2.1. Mapa das áreas abrangidas pelo trópico semi-árido.
Fonte: PANBRASIL (2004)

2.1.1. Indicadores de processos de desertificação sugeridos pela ONU (Escala Regional e Global)

A Agenda 21, em seu capítulo 12 - Manejando Ecossistemas Frágeis: Combatendo a Desertificação e a Seca (*United Nations*, 2006b), recomenda que as nações com problemas de desertificação utilizem os seguintes indicadores:

a) População vivendo abaixo da linha de pobreza nas áreas secas;

O primeiro indicador mede o número de habitantes vivendo abaixo da linha de pobreza nas áreas secas de uma dada nação. Esta linha de pobreza é estabelecida para cada nação e o indicador expresso em termos de percentagem da população total do país vivendo nestas condições nestas áreas. A finalidade deste indicador é mostrar como a pobreza limita os investimentos e aumenta a degradação pelo manejo inadequado dos recursos naturais, trazendo, como consequência, problemas para a economia das terras secas.

Este indicador fornece informações para o estabelecimento de projetos alternativos de geração de renda e de sistemas de segurança alimentar nas áreas propensas à seca. A relevância deste indicador está ligada à tomada de decisões em áreas como educação, saúde, arrendamento das terras e descentralização da aplicação dos recursos (*United Nations*, 2006b).

b) Índice nacional de precipitação mensal;

O Índice Nacional de Precipitação Mensal (**INPM**) representa a média mensal de precipitação expressa em termos de desvios em relação à média histórica de precipitação do posto meteorológico considerado. Este é um indicador direto, quantitativo, que mede a disponibilidade de águas pluviais nos países sujeitos à desertificação e à seca, fornecendo informações valiosas para o manejo dos recursos hídricos, planejamento agrícola e análises de riscos. Sua avaliação em longo prazo é valiosa, também, para os estudos de mudanças climáticas e elaboração de estratégias de adaptação a estas mudanças (*United Nations*, 2006b).

c) Índice de vegetação derivado de imagens de satélites;

O Índice de vegetação derivado de imagens de satélites se fundamenta na existência de uma relação direta entre biomassa verde das plantas e o índice de vegetação da diferença normalizada, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Variações espaciais e temporais de grande intensidade na densidade e na biomassa vegetal das terras secas, em resposta a flutuações estacionais e anuais na precipitação pluvial, têm sido constatadas através do uso do NDVI a partir de imagens de satélite (Tucker et al., 1985; Tucker et al., 1991; Nicholson *et al.*, 1990).

Se eliminados fatores que variam com a época de aquisição da imagem e que exercem influência na resposta espectral (atmosfera, geometria entre ângulos de visada e ângulo solar, entre outros) e se forem considerados influências de fenômenos naturais como a seca, diferenças para menos no NDVI calculado para duas épocas, estão associadas à redução na biomassa, podendo indicar que a área de risco de desertificação está sob pressão antrópica.

d) Terras afetadas pela desertificação.

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.

Verifica-se que os quatro indicadores descritos anteriormente cobrem habilmente a complexidade dos processos envolvidos com a desertificação.

Sem apresentar o compromisso do detalhamento imposto pelas observações pontuais de outros indicadores, os indicadores sugeridos pela ONU, pela visão ampla que oferecem do problema, são adequados aos legisladores e aos que decidem sobre a adoção de políticas de combate à desertificação para nações inteiras ou para grandes regiões.

2.1.2. Indicadores de processos de desertificação

Dregne (1983) identifica duas classes de indicadores utilizados no monitoramento do processo de desertificação:

a) Os que estão diretamente ligados ao processo da desertificação (exemplo, a perda de solo por erosão);

b) Os indiretamente ligados a este processo (exemplo, o número de animais nos pastos).

Estes indicadores por sua vez podem ser de natureza qualitativa (exemplo, a presença de crostas ou de voçorocas nos solos), ou quantitativa (exemplo, a profundidade efetiva e condutividade elétrica dos solos).

Não se pode esquecer a questão espacial e temporal relacionada aos indicadores. Na Tabela 1 são apresentados indicadores relevantes de processos de desertificação conforme a escala de monitoramento.

Tabela 1. Indicadores de processos de desertificação

Fonte: Berry & Ford citados por Dregne, 1983.

Escala de Monitoramento	Indicadores
Global	Albedo, Tempestades de areia, Precipitação Pluvial Erosão do Solo e Sedimentação, Salinização dos solos
Regional/Internacional	Produtividade, Biomassa, Clima, Nutrição, Salinização dos solos
Local/Nacional	Produtividade, Qualidade de vida da população, Percepção humana do problema

Em 1998, na IV Reunião Regional da América Latina e do Caribe (IV RRALC) foi apresentada a proposta de um sistema básico de indicadores de sustentabilidade ambiental que ampliou a definição dos indicadores existentes com a inclusão da unidade de medida, do método e da periodicidade de medição, além de separar em dois tipos: os indicadores de situação (climáticos, econômicos e sociais) e os indicadores de desertificação (físicos, biológicos e agrícolas).

Viana & Rodrigues (1999) e Rodrigues & Viana (2000) publicaram um índice de propensão à desertificação dos municípios cearenses. Para isso, eles usaram 60 indicadores, os quais foram reduzidos para 46 e divididos em quatro grupos: naturais, agrícolas e econômicos, demográficos e sociais. Eles reforçam a ideia de

que é necessário agrupar os indicadores a fim de que se possa caracterizar o quadro de desertificação.

Matallo Júnior (2001), em uma revisão sobre o tema “concluiu que os sistemas indicadores existentes, ainda que insuficientes e necessitando de desenvolvimentos, são os únicos instrumentos disponíveis para a compreensão do problema” (Matallo Júnior (2001) citado por Sampaio & Sampaio (2002).

Em recente revisão, Accioly & Oliveira (2004) apresentam a complexidade da seleção de indicadores para os processos de desertificação. Nesta revisão verifica-se que variáveis associadas à cobertura vegetal estão presentes em todas as listas de indicadores. Tal fato se deve à intrínseca relação entre cobertura vegetal e degradação dos solos, que pode ser traduzida na participação de variáveis associadas à cobertura vegetal nos modelos que tratam das perdas de solo por erosão hídrica.

As diferenças no número e tipos de indicadores e, também, nos critérios de classificação das áreas potencialmente suscetíveis à desertificação, têm levado à produção de mapas que, como era de se esperar, diferem na área e/ou no grau de ocorrência da desertificação no semi-árido brasileiro. Desta forma, quando se consideram as classes no intervalo entre muito grave e moderada, a desertificação nesta região pode atingir uma área que varia entre 182.000 e 665.500 km², segundo Riché *et al.* (1994) e Ferreira *et al.* (1994), respectivamente.

Accioly (2000) apresentou um resumo das principais causas e características ambientais das áreas mais afetadas pelos processos de desertificação no semi-árido brasileiro.

Um workshop em fevereiro de 2007 realizado no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) reuniu especialistas dos Programas de Combate à Desertificação na América do Sul que definiram indicadores de áreas susceptíveis a processos de desertificação para as regiões da América do Sul. Estes indicadores coincidem com os principais estabelecidos pela ONU.

Características e atributos do solo que podem ser alterados com os processos de desertificação.

Neste item são abordados os principais atributos químicos e físicos do solo que podem ser afetados e alterados com os processos de desertificação.

Matéria Orgânica

É o atributo do solo que corresponde aos materiais orgânicos, originários de resíduos vegetais em diferentes estágios de decomposição, fragmentos de carvão finamente divididos, substâncias húmicas, biomassa meso e microbiana, e outros compostos orgânicos naturalmente presentes no solo, os quais podem estar associados ao material mineral em proporções variáveis (EMBRAPA, 2006).

O conteúdo de constituintes orgânicos impõe preponderância de suas propriedades sobre os constituintes minerais. Deve-se salientar que a matéria orgânica do solo é uma importante fonte de nutrientes, elemento estabilizador da estrutura do solo e substrato da desejada intensa atividade biológica, estando diretamente relacionada com a sua capacidade produtiva e, conseqüente resistência à erosão. Está também relacionada com a capacidade de imobilização e decomposição dos pesticidas aplicados.

Em sua revisão, Galindo (2007) citou que os constituintes orgânicos do solo são importantes devido a sua influência na estabilidade dos agregados. Solos podem ser considerados erodíveis se apresentam menos de 2% de carbono orgânico na matéria orgânica. A matéria orgânica e os microrganismos alteram o processo de agregação ao longo do tempo. As alterações vão depender da quantidade e atividade de vários agentes orgânicos de ligação presentes.

Textura

A textura do solo pode ser definida como sendo a proporção relativa das diferentes frações granulométricas (areia, silte e argila) existentes e que sofrem influência da rocha de origem e do grau de intemperização. Isto ocorre a medida que os processos de desprendimento e transporte são afetados. Quanto maior as partículas, maior a resistência ao transporte devido à maior força requerida para arrastá-las. Enquanto que as partículas menores resistem ao desprendimento devido à sua coesão. Em determinados solos, a resistência à erosão é determinada pela combinação das partículas de argila com a matéria orgânica para formar os agregados do solo ou torrões definindo a estabilidade destes. As partículas menos resistentes são silte e areia fina, sendo os solos ricos em silte os mais erodíveis

(Galindo, 2007). Um dos fatores que tem importância na erodibilidade do solo é a textura.

Frações granulométricas grossas (areia)

Os grãos de areia podem ser arredondados ou bastante irregulares, dependendo da abrasão a que foram submetidos. Essas partículas praticamente não revelam plasticidade ou pegajosidade e são, portanto, pouco influenciadas pelas modificações do teor de umidade. A sua capacidade de retenção de água é reduzida e, por causa do grande espaçamento entre as partículas individuais é rápida a passagem da água por percolação. Solos arenosos apresentam uma boa drenagem e aeração, apresentando uma consistência solta e friável.

Frações granulométricas finas (silte e argila)

Em geral, as partículas de argila têm a forma de placas ou lâminas e quando expostas à umidade apresentam grande plasticidade. Quando molhadas, elas se expandem e se tornam pegajosas. Contraem-se na secagem com considerável absorção de energia.

A presença de silte e especialmente de argila num solo lhe assegura textura argilosa e movimentação lenta de água e de ar. Tal solo é altamente plástico, tornando-se pegajoso quando umedecido em demasia, e duro ou muito duro quando seco. É quase sempre elevada a capacidade de retenção de água dos solos com altos teores de silte e argila.

Relação silte/argila

As partículas do tamanho da areia e do silte são geralmente constituídas por minerais primários e, sob a ação do intemperismo, transformam-se em argilas que são minerais secundários, geralmente mais resistentes e menos ricos em reserva de nutrientes na sua constituição. Os minerais resistentes permanecem sob o tamanho de areia, e a fração silte fica, então, sendo o ponto de máxima instabilidade, isto é, somente os solos mais novos são os que apresentam altos teores de silte.

Estrutura

A susceptibilidade do solo aos processos erosivos pode ser considerada como função da estabilidade estrutural do solo. Com efeito, no caso da erosão laminar, ocorre destruição dos agregados pela energia cinética das gotas de chuva, dissociação dos componentes granulométricos e separação das partículas de argila, silte e areia.

Existem fatores que influenciam a estrutura dos solos tais como: agentes cimentantes (argila, matéria orgânica e óxidos de Fe e Al), cátions adsorvidos e o manejo.

A estrutura tem o efeito modificador em solos argilosos. De acordo com Reinert & Reichert (2006), um solo bem estruturado apresenta poros adequados para a entrada de ar e água no solo e resistência à erosão pela alta agregação.

Os mesmos autores ainda afirmam que a perda das condições adequadas e originais define a degradação das condições estruturais e é causada principalmente por: preparo intensivo e queima dos resíduos; tráfego intenso de máquinas com umidade inadequada; impacto das gotas de chuva; e dispersão química dos colóides.

As consequências da degradação da estrutura são aumento da densidade do solo e redução da porosidade; perda da estabilidade dos agregados; diminuição da infiltração da água; compactação das camadas subsuperficiais; aumento da resistência do solo à penetração; formação de crostas superficiais e, conseqüentemente, aumento da erosão.

A estrutura do solo está relacionada com o arranjo das partículas, agregados e poros que constituem este meio poroso. As influências estruturais do solo atuam em diversas escalas tanto macroscópicas como microscópicas. Mudanças estruturais em escala microscópica são importantes porque causam alterações no arranjo das partículas do solo e, conseqüentemente, mudanças na distribuição de poros (Pires, 2006).

Segundo o mesmo autor, os ciclos de umedecimento e secagem causam grandes modificações na estrutura do solo, especialmente na distribuição do tamanho dos poros, que reflete a distribuição espacial e temporal da umidade do solo. Conseqüentemente, estes processos podem afetar a retenção e o movimento de água e nutrientes no solo, tendo importantes conseqüências práticas em

determinações de armazenamento e potencial mátrico da água no solo, amplamente usados em irrigação.

Em relação a avaliação da estrutura do solo, Reinert & Reichert (2006) afirmam que a forma quantitativa mais usada na avaliação da qualidade da condição estrutural é de natureza indireta e mede outras propriedades físicas indiretamente influenciadas pela estrutura. A avaliação da estabilidade de agregados, densidade do solo, porosidade, infiltração e retenção de água, considerando a classe textural, indicam o estado atual da estrutura do solo. Esse tipo de avaliação é bastante usado para se medir a evolução da estrutura de um dado solo quando submetido a diferentes sistemas de manejo.

Porosidade

Porosidade é o espaço do solo não ocupado por sólidos e ocupado pela água e ar, definido como sendo a proporção entre o volume de poros e o volume total de um solo. O espaço poroso do solo é formado por vários processos que resultam em poros de diferentes formas e tamanhos. Os poros provenientes da atividade biológica desaparecem quando submetidos a processos de compactação. Os poros estruturais são resultantes do cultivo, tráfego, tempo e da atividade biológica do solo, sendo considerados bons indicadores dos processos de compactação (Reinert & Reichert, 2006).

Os tipos de poros estão associados à sua forma, que por sua vez tem relação direta com sua origem. Os tipos de poros mais característicos são os de origem biológica, que são arredondados e formados por morte e decomposição de raízes ou como resultado da atividade de animais ou insetos do solo, como minhocas, térmitas, etc.

Estudos realizados em áreas sob plantio direto mostraram que os poros provenientes da atividade biológica, apesar de representarem pequeno volume em relação ao volume total de poros, são altamente funcionais e reduzem a resistência do solo à penetração de raízes. A textura e a estrutura dos solos explicam em grande parte o tipo, tamanho, quantidade e continuidade dos poros.

A classificação mais usual da porosidade refere-se à sua distribuição de tamanho. A mais usual é a classificação da porosidade em duas classes: microporosidade e macroporosidade. A microporosidade é uma classe de tamanho

de poros que, após ser saturada em água, a retém contra a gravidade. Os macroporos, ao contrário, após serem saturados em água não a retém, ou são esvaziados pela ação da gravidade. A funcionalidade desses poros fica evidente quando se considera que os microporos são os responsáveis pela retenção e armazenamento da água no solo e os macroporos responsáveis pela aeração e pela maior contribuição na infiltração de água no solo (Reinert & Reichert, 2006).

Como podem ser observados, os processos de degradação alteram e podem alterar as características dos solos. Segundo Galindo (2007) pode-se afirmar que a maioria das características/atributos dos solos do semi-árido contribui para uma alta susceptibilidade à erosão. Entre estas características podem ser citadas: pequena profundidade e grau de desenvolvimento do perfil, mudança textural abrupta e baixa infiltração, teores médios a altos de sódio trocável, predominância de horizontes superficiais pouco espessos, textura arenosa ou média, reduzido teor de matéria orgânica, alto nível de dispersão e estrutura pouco desenvolvida. Esta suscetibilidade é ainda mais agravada pela distribuição irregular de chuvas, concentradas e com alta intensidade, cultivo em áreas de relevo movimentado, sem medidas de proteção do solo, sobrepastoreio e sistema de uso extrativista predatório.

Em áreas sob processos de desertificação, uma forma de analisar a erodibilidade dos solos é avaliar sua permeabilidade. Com efeito, quanto mais elevada for a velocidade de infiltração da água de chuva no solo, tanto mais reduzida as possibilidades do escoamento superficial e, conseqüentemente, o risco de arrastamento do horizonte A do solo (Leprun, 1986).

2.1.3. O Processo de desertificação no Nordeste

A ação humana, por meio de atividades agropecuárias, mineradoras e do desmatamento, tem provocado a desertificação de grandes áreas na região Nordeste do Brasil. Uma extensão territorial equivalente a quatro vezes o estado do Rio de Janeiro está em processo de desertificação acelerado (Figura 2.2) no Nordeste. Os trechos já completamente desertificados somam cerca de 18 mil km², o que corresponde ao tamanho do estado de Sergipe. Eles cercam os municípios de Irauçuba (CE), Seridó (PB), Equador (RN) e Cabrobó (PE) (MMA, 2000).

O fenômeno ainda ameaça parte do norte de Minas Gerais. No total, a desertificação já atinge uma área de 980 mil km² em dez estados brasileiros. Segundo levantamento feito pelo Ministério do Meio Ambiente, o Brasil perde cerca 300 milhões de dólares por ano por causa desse processo.

Marcada pela perda gradual de fertilidade biológica do solo, a desertificação nessas regiões é resultado, sobretudo do cultivo inadequado da terra associado às variações climáticas locais e as características do solo, com evaporação elevada por causa das altas temperaturas do clima semi-árido.

O estágio atual de desertificação no Nordeste é grave. A recuperação por meio de métodos criados pelo homem é possível, mas tem alto custo. O Ministério do Meio Ambiente estima em dois bilhões de dólares o gasto para reabilitar toda a área do sertão nordestino afetada pelo fenômeno. A viabilidade desse trabalho de recuperação foi discutida na Conferência Mundial de Desertificação realizada em novembro de 1999, no Recife, Pernambuco. O encontro reconheceu o empenho dos países, principalmente africanos, no combate ao problema, mas não fixou atividades, nem prazos.

No Nordeste as áreas com níveis de degradação ambiental severo são tipicamente ocupadas por solos da ordem dos Luvisolos, que apresentam forte suscetibilidade à erosão. Accioly (2002) afirma que os Luvisolos e os Neossolos Litólicos são reconhecidamente mais susceptíveis à erosão.

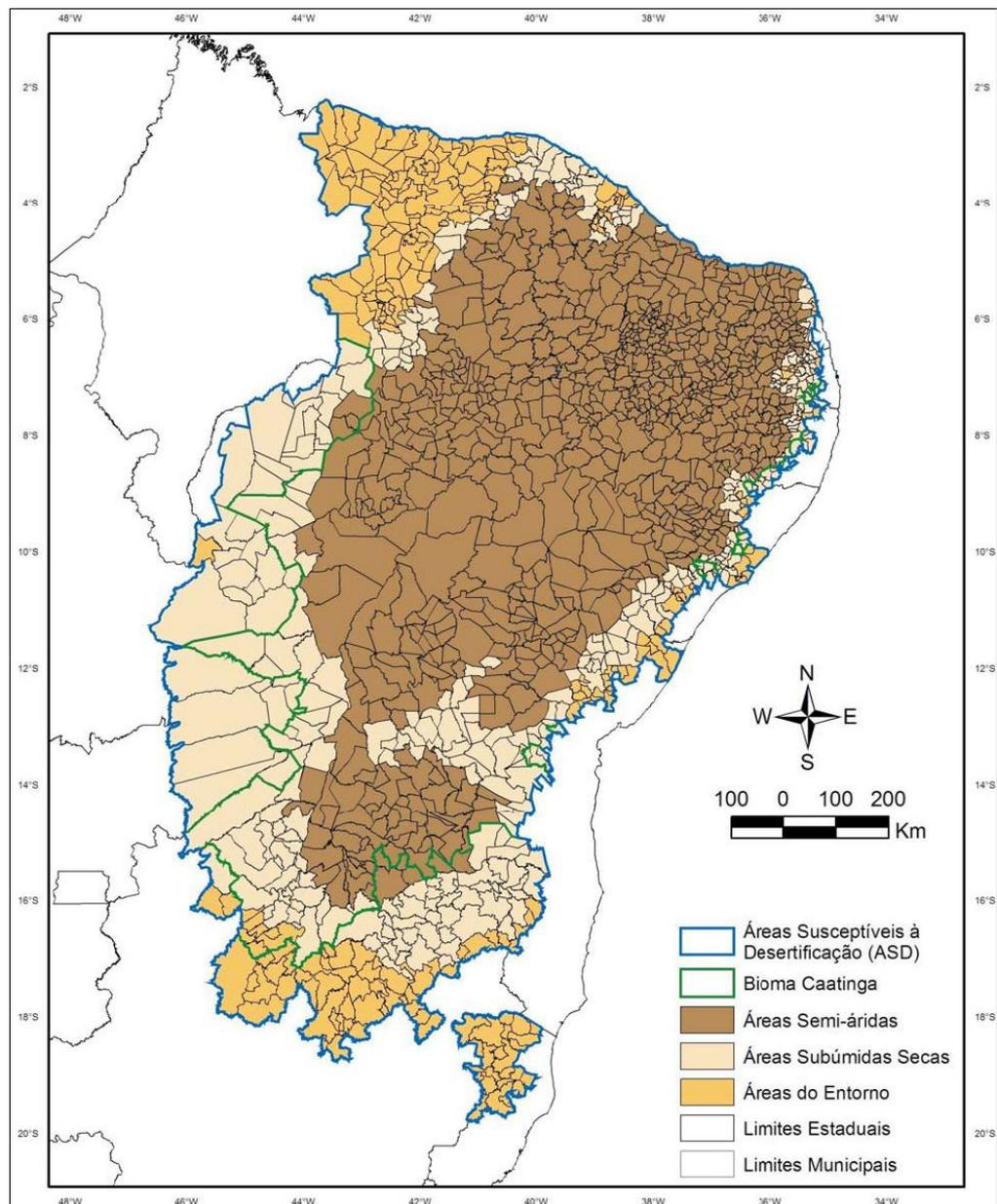


Figura 2.2. Áreas Suscetíveis à Desertificação – ASD

Fonte: IBGE, 1993; IBGE, 2003; Carvalho & Egler, 2003; Brito, 2000; e BEZERRA, Maria do Carmo de Lima. Cenários para o bioma Caatinga. Recife: SECTMA, 2004. Bioma Caatinga. Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Caatinga. In: PANBRASIL, 2004.

No Nordeste do Brasil, as áreas consideradas mais desertificadas são as que conjugam solos descobertos e evidências marcantes de erosão hídrica (Sá et al. 1994, citados por Sampaio & Araújo, 2005).

2.1.4. O Processo de desertificação em Pernambuco

A desertificação em Pernambuco vem sendo estudada desde a década de 60. Como citado, um exemplo de área com sinais extremos de degradação em Pernambuco é o núcleo de desertificação de Cabrobó.

Vasconcelos Sobrinho (1971) publicou seu primeiro estudo sobre os núcleos de desertificação e o polígono das secas. Em Pernambuco, os municípios de Salgueiro, Parnamirim, Cabrobó, Itacuruba, Belém do São Francisco, Petrolina, Afrânio, Ouricuri, Araripina e municípios vizinhos foram incluídos na “área piloto”, vindo mais tarde a ter uma área intitulada de núcleo de desertificação de Cabrobó.

As destruições ocorridas pelo avanço da desertificação se estendem para os municípios vizinhos como Petrolândia, onde grandes quantidades de terras foram retiradas para construção de rodovias e da Barragem de Itaparica. Sem o reflorestamento, o solo ficou mais vulnerável ao processo de erosão e as crateras se expandiram em direção às terras usadas hoje para criação de animais

A exemplo de Cabrobó, técnicas inadequadas de irrigação fizeram grandes estragos em Petrolândia. É o caso da comunidade de Barreiras, onde uma área de 18 mil hectares foi desmatada para virar um grande projeto de irrigação, que até hoje não foi executado. Áreas próximas aos leitos dos rios, antes ricas em matéria orgânica, também apresentam solos com baixa fertilidade.

Nos municípios de Floresta e Jataúba, áreas piloto desta Pesquisa, os processos de desertificação também se encontram em estágios bem avançados. Nessas áreas existem estudos mais aprofundados em relação às características dos solos dessas regiões.

Sá *et al* (2004) utilizaram informações georreferenciadas e documentos satelitários no estudo da desertificação na região de Cabrobó-PE, que compreende os municípios de Santa Maria da Boa Vista, Orocó, Cabrobó e Belém do São Francisco, evidenciando a cobertura vegetal remanescente e o uso das terras. Foram utilizadas imagens de satélite da série LANDSAT 7 sensor ETM, referentes às órbitas pontos 216/66 e 217/66, datadas de 2002. O mapeamento das áreas em processo de desertificação foi executado por meio da interpretação visual e automática, analisando-se os aspectos espaciais e espectrais dos alvos.

Estes autores ainda classificaram e estimaram o grau de severidade dos processos de desertificação da área. A área com grau severo de desertificação,

correspondendo às classes de ocupação com agropecuária, é da ordem de 1.001,00 km²; com grau acentuado, correspondendo às classes de ocupação com Savana Estépica Arborizada é da ordem de 5.194,73 km²; com grau moderado, correspondendo às classes de ocupação com Savana Estépica Florestada, é da ordem de 174,67 km², e com grau baixo, correspondendo às classes de ocupação com vegetação com influência fluvial, é da ordem de 428,35 km².

2.2. Solos das áreas em processo de desertificação em Pernambuco

Segundo Galindo (2007), as áreas piloto (Floresta e Jataúba) no estado de Pernambuco são ocupadas em sua maior parte por solos com características propícias aos processos erosivos e, por conseguinte facilmente degradáveis.

De acordo com Araújo Filho *et al* (2001) no município de Floresta ocorrem pediplanos muitos degradados com áreas predominantemente ocupadas por solos rasos, pedregosos, com mudança textural abrupta e vegetação com porte baixo e raleada. Tais fatores concorrem, como já foi dito anteriormente, para o estabelecimento de processos erosivos mais severos, e, conseqüentemente, o empobrecimento da biodiversidade. São áreas consideradas muito degradadas em contínuo processo de desertificação.

Em Jataúba, no agreste pernambucano, nas elevações ocorrem os Neossolos Litólicos e usualmente apresentam-se cascalhentos e muito suscetíveis a erosão. Nas partes mais suaves dominam os Planossolos Nátricos, muito suscetíveis à erosão, estando, muitas vezes, naturalmente degradados ou erodidos em condições naturais (Galindo, 2007).

Araújo Filho *et al* (2001) ainda afirmam que nesses ambientes os solos predominantes são Planossolos - S, Neossolos Litólicos - RL, Luvisolos – T e Neossolos Regolíticos - RR. Com exceção dos RR, os demais solos são rasos, pedregosos, altamente suscetíveis aos processos erosivos e com baixa capacidade de armazenamento de água.

Sá *et al* (2006) afirmam que as áreas na região de Cabrobó mais afetadas com os processos de desertificação estão associadas aos: Luvisolos, Planossolos e Neossolos Litólicos.

2.3. Características de solos suscetíveis à desertificação em Pernambuco

Os solos encontrados no semi-árido do estado de Pernambuco que apresentam alta suscetibilidade são os Luvisolos, Planossolos e Neossolos Litólicos.

2.3.1. Luvisolos

De acordo com o SiBCS (EMBRAPA, 2006) os Luvisolos, antigos Brunos Não Cálcicos (Figura 2.3) compreendem solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural, com elevada atividade de argila e alta saturação por bases, imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, exceto A chernozêmico, ou sob horizonte E, satisfazendo os seguintes requisitos:

1. Ausência de horizonte plúntico acima ou coincidente com a parte superficial do horizonte Bt.
2. Ausência de horizonte glei acima ou coincidente com a parte superficial do horizonte Bt.

Estes solos variam de moderada a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos (60 a 120 cm), com sequência de horizontes A, Bt e C, e nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt, devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles. A transição para o horizonte Bt é clara ou abrupta, e grande parte dos solos desta classe possui mudança textural abrupta. Podem ou não apresentar pedregosidade na parte superficial e o caráter solódico, na parte subsuperficial. O horizonte Bt é de coloração avermelhada, amarelada e menos frequentemente, brunada. A estrutura é usualmente em blocos, moderada ou fortemente desenvolvida, ou prismática, composta de blocos angulares e subangulares.



Figura 2.3. Perfil MF-1 Luvisolo Crômico Órtico planossólico solódico em ambiente moderadamente degradado de Floresta-PE.
Fonte: Galindo (2007).

Os Luvisolos são moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos, com teores de alumínio extraível baixos ou nulos, e com valores elevados para a relação molecular K_i no horizonte Bt, normalmente entre 2,4 e 4,0, denotando presença, em quantidade variável, mas expressiva, de argilominerais do tipo 2:1. Os Luvisolos são altamente suscetíveis à erosão, principalmente, os subgrupos vertissólico, planossólico e lítico.

2.3.2. Planossolos

O SiBCS (EMBRAPA, 2006) conceitua a classe dos Planossolos como aquela que compreende solos minerais, imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B plânico imediatamente subjacente, adensado, geralmente de acentuada concentração de argila e permeabilidade lenta ou muito lenta. Os Planossolos são típicos de áreas de cotas baixas, planas ou suavemente onduladas, onde o relevo possibilita um excesso de água, mesmo num período

curto, especialmente em regiões sujeitas à estiagem prolongada e até mesmo sob condições de clima semi-árido. Estes solos apresentam, geralmente, pouca profundidade, baixa permeabilidade (presença de horizontes subsuperficiais adensados e pouco permeáveis) e média a alta concentração de sódio trocável abaixo do horizonte superficial.

Os Planossolos, principalmente os Nátricos (Figura 2.4) são altamente suscetíveis a desertificação. Apresentam $PST > 15\%$, estrutura colunar e ocorrem em relevos suavemente ondulados nas regiões do agreste e sertão. Apresentam horizonte B plânico precedido por uma transição abrupta, que constitui uma “camada” de impedimento devido à permeabilidade lenta, que pode gerar lençol freático suspenso de natureza temporária. A estrutura do horizonte B é, geralmente, prismática ou colunar, pelo menos na parte superior do referido horizonte.

São solos rasos a pouco profundos, com horizonte superficial de cores claras e textura arenosa a média, seguido de um horizonte B plânico, argiloso a muito argiloso, adensado, pouco permeável, com cores de redução em decorrência da drenagem deficiente.

Característica distintiva marcante dos Planossolos é a diferenciação bem acentuada entre os horizontes A ou E e o B, devido à mudança textural, normalmente abrupta dos solos desta classe.

Por efeito da vigência cíclica de excesso de umidade, ainda que por períodos curtos, as cores no horizonte B, e mesmo na parte inferior do horizonte subjacente, são predominantemente pouco vivas, tendendo a acinzentadas ou escurecidas, podendo ou não haver ocorrências e até predomínio de cores neutras de redução, com ou sem mosqueados, conforme especificado para o horizonte B plânico.



Figura 2.4. Perfil DJ-2 Planossolo Nátrico Órtico salino em ambiente degradado de Jataúba-PE.

Fonte: Galindo (2007).

2.3.3. Neossolos Litólicos

Os Neossolos Litólicos ocorrem em toda a região semi-árida de Pernambuco, geralmente relacionados com áreas mais acidentadas, contendo afloramentos de rocha. São solos muito pouco desenvolvidos, não hidromórficos, muito rasos, apresentando um horizonte A assente diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C de pequena espessura. São em geral pedregosos e/ou rochosos, moderada a excessivamente drenados, com horizonte A pouco espesso,

cascalhento, de textura predominantemente média, podendo ocorrer texturas arenosa, siltosa e argilosa. Podem ser distróficos ou eutróficos, ocorrendo geralmente em áreas de relevo mais acidentado. Quanto ao uso, são pouco cultivados e normalmente ocupam relevo acidentado de difícil acesso.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo das principais características dos solos susceptíveis a degradação nas áreas piloto no estado de Pernambuco.

Tabela 2. Resumo das principais características/atributos de solos susceptíveis a processos de desertificação nas áreas piloto.

Características/Atributos	Luvisolos	Planossolos	Neossolos Litólicos
Textura superficial e pedregosidade	Média, geralmente com pedregosidade	Arenosa ou média, geralmente com pedregosidade	Média com pedregosidade e rochosidade
Estrutura	Moderada a forte prismática, composta de blocos angulares e subangulares	Moderada a forte prismática ou colunar	Fraca em blocos subangulares e granular
Permeabilidade	moderada a lenta	Pouco permeável	Moderada a excessivamente drenados
Profundidade efetiva	Pouco profundos (51 a 100 cm).	Pouco profundos	Profundidade menor ou igual a 50 cm
Horizonte Diagnóstico	Horizonte B textural	Horizonte B plânico	Não possuem horizonte B diagnóstico
Mudança textural acentuada ou abrupta	Presente	Presente	Não possui
CTC	Alta	Alta	Media
Saturação por bases	Alta	Alta	Alta
Relevo	Suave ondulado a ondulado	Plano a suavemente ondulado	Suave ondulado a fortemente ondulado

2.4. Características do clima do Estado de Pernambuco

O Regime hídrico dos solos é fortemente influenciado pelos padrões de precipitação, e também pelas características de retenção de água no solo, que devem ser incorporadas nas avaliações de variações temporais da erodibilidade. Os efeitos são particularmente marcantes nos trópicos áridos e semi-áridos, onde tanto as intensidades de chuva quanto de seca são frequentemente intensas. Taxas de erosão muito altas são observadas frequentemente no início da estação chuvosa, embora seja geralmente difícil separar os efeitos das propriedades do solo daqueles

das características das chuvas e da reduzida cobertura vegetal (Bryan, 2000).

Eventos relacionados à presença de erosão eólica ocorrem com maior frequência com a diminuição das chuvas, quer entre diferentes regiões climáticas, ou entre períodos distintos, devido à drástica redução da proteção do solo oferecida pela cobertura vegetal ou por seus resíduos (Rajot et al. 2003).

Segundo Nimer (1979), a homogeneidade térmica contrasta com a heterogeneidade espacial e temporal do regime pluviométrico. O principal período da estação chuvosa do semi-árido nordestino estende-se de fevereiro a maio, e pode ser influenciado pelos oceanos tropicais e por fatores de circulação atmosférica de escalas global e regional. A deficiência hídrica se sobressai como o maior problema da região semi-árida. A altura média de precipitação no Nordeste do Brasil se distribui decrescendo bruscamente do litoral para o interior.

Com relação ao regime dos períodos de estiagens, observam-se no Nordeste o regime de seca do tipo mediterrâneo (seca de primavera-verão) nos Estados de Sergipe, Alagoas e parte oriental da Bahia, Pernambuco e Paraíba, e o regime tropical (seca de inverno-primavera-verão) na porção ocidental dos estados da Bahia, Pernambuco e Paraíba e nos demais estados, ou seja, no oeste da região (Nery *et al.*, 1998).

Para se ter uma ideia mais aproximada da real disponibilidade de água em qualquer região e em particular no semi-árido, onde o problema do déficit hídrico provoca grandes impactos sociais, não basta apenas que se conheça o regime pluviométrico. Torna-se necessário a realização do balanço hídrico. O balanço hídrico climático é um método climatológico introduzido por Thornthwate (1948) e aprimorado por Thornthwate & Mather (1955) que consiste em se efetuar a contabilidade de água em relação a uma dada superfície vegetada, computando-se, sistematicamente, todos os ganhos e perdas. São considerados ganhos as contribuições devido à precipitação pluviométrica e as perdas são ocasionadas pela evapotranspiração real.

Em Pernambuco, a temperatura média anual está em torno de 26°C, com uma amplitude térmica muito pequena, sendo a evapotranspiração potencial da ordem de 1.400mm anuais. Nimer (1979) afirmou que, excluindo as áreas de altitudes elevadas, todo o sertão de Pernambuco apresenta médias anuais de temperatura superiores à 24°C, ultrapassando os 26°C nas depressões de 200 a 250 metros de altitude (vale do Rio São Francisco). Apesar da amplitude térmica ser

pequena, as temperaturas mais elevadas de verão são muito significantes, uma vez que nesta época do ano ocorre o maior déficit hídrico, devido à intensificação do processo evapotranspiratório.

Na região sertaneja de Pernambuco, que corresponde a dois terços do território estadual, predomina o clima tropical semi-árido, com baixa pluviosidade (média de 600mm anuais de chuva) concentrada no verão, mas sujeita a irregularidades que acabam provocando secas prolongadas. Na faixa de transição entre a Zona da Mata e o Sertão (Agreste), a pluviosidade fica entre 650 e 1.000 milímetros anuais.

Predomina na região o tipo climático BShs', pela classificação de Köppen ou seja, clima semi-árido de estepe (com estação chuvosa de verão que se adianta para o outono, entre janeiro e maio). Segundo a classificação de Gaussen, o tipo bioclimático dominante é o 4aTh, tropical quente com seca acentuada, com índice xerotérmico entre 150 e 200 e um período seco de 7 a 8 meses (Jacomine *et al*, 1973).

O fator climático é de importância fundamental na formação dos solos e, particularmente, nos estudos de implantação agrícola, sobretudo em se tratando de culturas irrigadas. Através da ação conjunta dos fatores climáticos, o clima não só controla o sistema solo como também suas interações com os vegetais, além de condicionar a própria necessidade de irrigação.

2.5. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é definido por Lillesand & Kiefer (1987) como "a ciência e arte de receber informações sobre um objeto, uma área ou fenômeno pela análise dos dados obtidos de uma maneira tal que não haja contato direto com este objeto, esta área ou este fenômeno". Para se obter estas informações, usa-se um meio que, neste caso, é a energia eletromagnética.

Energia eletromagnética

As técnicas de sensoriamento remoto envolvem quatro elementos fundamentais: a fonte de radiação eletromagnética, a atmosfera, o alvo e o sensor.

Em sistemas sensores passivos, a principal fonte de radiação é o sol, cuja energia radiante está distribuída ao longo de um espectro eletromagnético (EEM). Através da atmosfera propaga-se a radiação eletromagnética – REM (Figura 2.5), sofrendo modificações na sua intensidade e distribuição espectral. Ao atingir o alvo, a REM incidente sofre um processo de interação caracterizado pelos fenômenos de absorção, reflexão e transmissão. A fração de REM refletida ou emitida atravessará novamente a atmosfera, sofrerá novas modificações e atingirá o sensor, localizado em órbita da Terra (Silva, 1978).

A espectrorradiometria de reflectância é uma técnica de sensoriamento remoto que registra o fluxo de radiação eletromagnética refletida por objetos, no caso o solo, não havendo contato físico entre sensor e alvo. A quantidade de energia refletida por um solo é função de três fatores: a energia eletromagnética incidente, que pode ser proveniente do sol ou uma lâmpada; a quantidade de energia absorvida e a quantidade de energia transmitida (Stoner & Baumgardner, 1986). Esta relação pode ser expressa como $R_\lambda = I_\lambda - (A_\lambda + T_\lambda)$, onde R é a reflectância em um determinado comprimento de onda (λ), I é a energia incidente, A é a energia absorvida e T é a energia transmitida. A quantidade de radiação refletida (radiância) comparada com a quantidade incidente (irradiância) sobre o solo fornece a medida de reflectância captada por sensores, denominados radiômetros ou espectrorradiômetros.

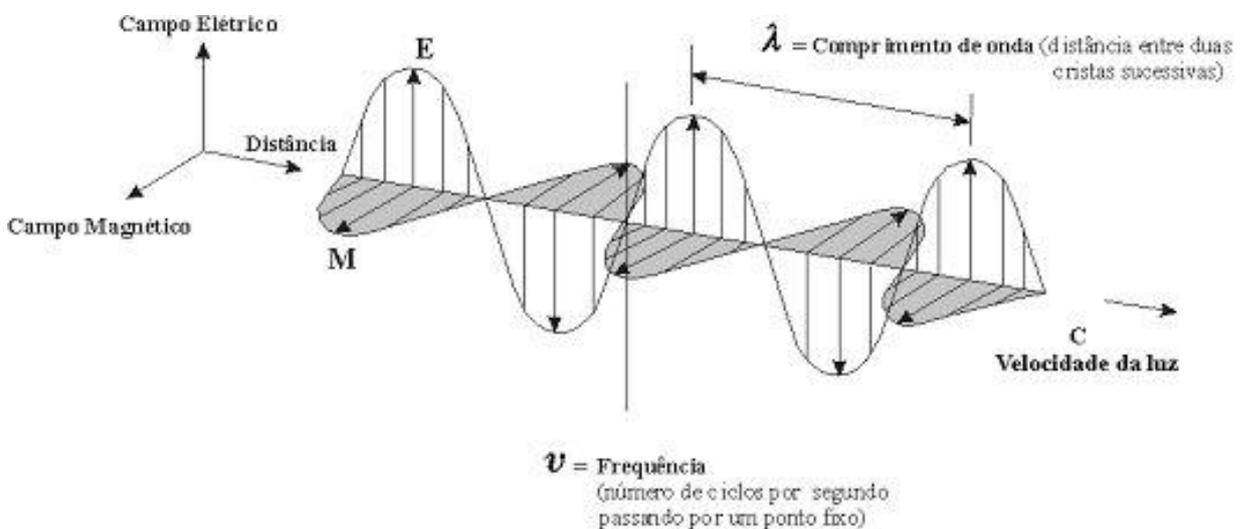


Figura 2.5. Radiação Eletromagnética (REM).
Fonte: adaptado Lillesand & Kiefer (2000).

Estes sensores decompõem a radiação incidente em diferentes comprimentos de onda (os espectrorradiômetros diferem dos radiômetros por operarem em faixas espectrais estreitas) sendo que a intensidade relativa de energia refletida pelo objeto pode ser medida de uma maneira contínua ao longo do espectro eletromagnético (Novo, 1992), fornecendo um conjunto de dados numéricos ou gráficos conhecidos como curvas ou assinaturas espectrais.

Espectro eletromagnético

Existem regiões do EEM onde a atmosfera quase não afeta a energia eletromagnética, isto é, a atmosfera é “transparente” à REM proveniente do Sol ou da superfície terrestre. Estas regiões são conhecidas como janelas atmosféricas. Nestas regiões são colocados os detectores de REM, e, portanto onde é realizado o sensoriamento remoto dos objetos terrestres (Steffen e Moraes, 1993).

Comportamento espectral de alvos naturais

A assinatura espectral de um alvo pode ser definida como sendo o conjunto dos valores sucessivos da reflectância do objeto ao longo do EEM, também conhecido como a assinatura espectral do objeto. A assinatura espectral do objeto define as feições deste, sendo que a forma, a intensidade e a localização de cada banda de absorção é que caracterizam o objeto (Steffen e Moraes, 1993).

Os alvos interagem de maneira diferenciada espectralmente com a energia eletromagnética incidente, pois os objetos apresentam diferentes propriedades físico-químicas e biológicas. Estas diferentes interações é que possibilitam a distinção e o reconhecimento dos diversos objetos terrestres sensoriados remotamente, pois são reconhecidos devido à variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda (Steffen e Moraes, 1996). As características básicas observadas no comportamento espectral destes objetos são:

Vegetação

O comportamento espectral da vegetação apresenta alta absorção da REM na região do espectro visível, que é capturada pela clorofila para a realização da

fotossíntese. Dentro do espectro visível a absorção é mais fraca na região do infravermelho que caracteriza a coloração da vegetação. A alta reflectância no infravermelho próximo (até 1,3 μ m) se deve a estrutura celular, sendo que a partir deste comprimento de onda é o conteúdo de água na vegetação quem modula as bandas de absorção presentes no comportamento espectral desta.

Solos

O comportamento espectral dos solos é também dominado pelas bandas de absorção de seus constituintes. As combinações e arranjos dos materiais constituintes dos solos é que definem o seu comportamento espectral.

A assinatura ou comportamento espectral do solo depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica, sendo que os principais constituintes que afetam seu comportamento espectral são a matéria orgânica e os óxidos de ferro. A mineralogia da fração argila, tamanho de partículas e a rugosidade, além da umidade do solo, também são importantes neste processo (Dalmolim *et al* 2004).

Stoner & Baugardner (1981) definiram cinco tipos de curvas espectrais para solos de acordo com o conteúdo de matéria orgânica, óxidos de ferro e mineralogia, numa tentativa de estabelecer critérios para a classificação dos espectros e agrupar solos que apresentam características espectrais semelhantes.

Stoner et al. (1980) propuseram um atlas com curvas espectrais de várias classes de solos que reúne informações que permitem predizer características dos mesmos.

Água

A água pode-se apresentar na natureza em três estados físicos, os quais apresentam comportamento espectral totalmente distinto. O comportamento espectral da água líquida pura apresenta baixa reflectância (menor do que 10%) na faixa compreendida entre 0,38 e 0,7 μ m e máxima absorção acima de 0,7 μ m.

A Figura 2.6 ilustra o comportamento espectral dos principais alvos da superfície terrestre (vegetação, solo e água) e as bandas espectrais do LANDSAT utilizadas na composição colorida falsa cor 4R3G2B.

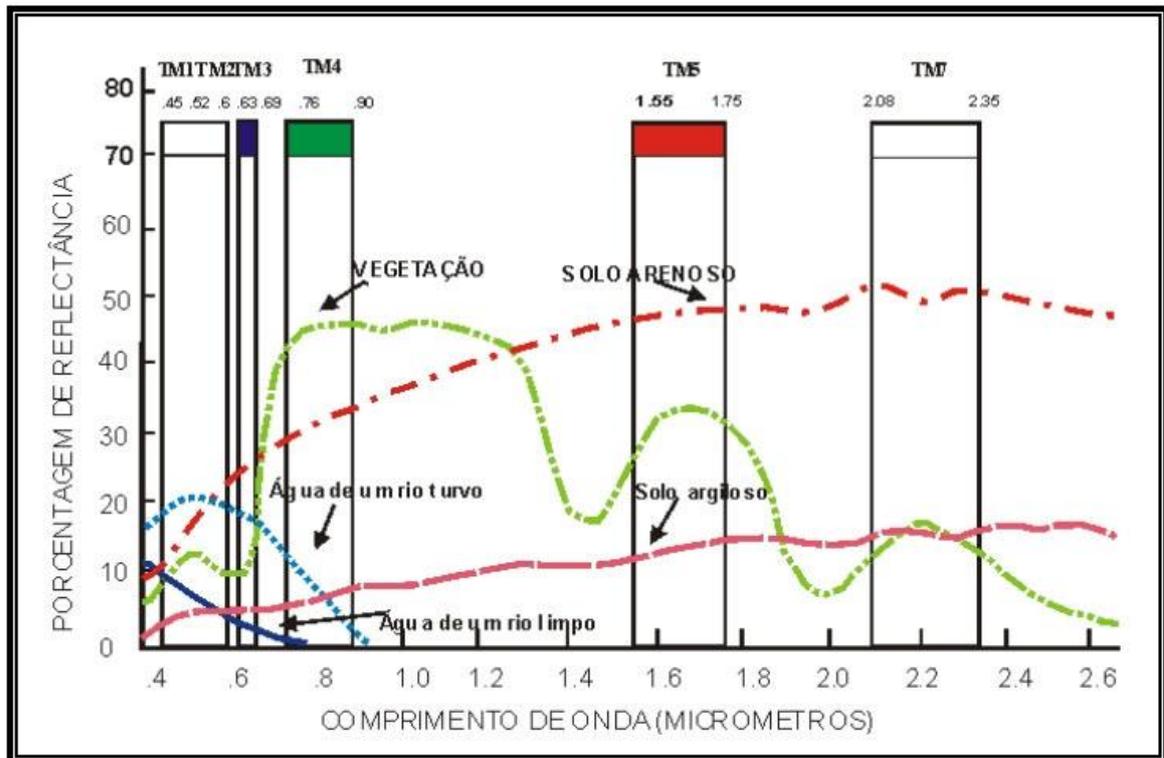


Figura 2.6. Padrão de resposta espectral dos principais alvos da superfície terrestre. Fonte: Modificado de Lillesand & Kiefer (1986, p.17).

Observa-se que nas faixas do espectro visível e infravermelho próximo (0,45 a 1,3 μm), os solos arenosos apresentam maior percentual de refletância do que os solos argilosos. A maior refletância dos solos resulta em elevado albedo. Este comportamento espectral é identificado nas imagens de satélites em tons claros de brilho.

2.5.1. Albedo

O albedo é obtido pela razão entre a radiação refletida e a radiação incidente, e que pode ser determinado para cada faixa espectral, tal como: global (0,3 a 3,0 μm), radiação fotossinteticamente ativa – PAR (*Photosynthetic Active Radiance*) (0,4 a 0,7 μm) e infravermelha (0,7 a 3,0 μm), o que implica nas determinações de albedo da radiação de onda curta do dossel da cultura (r_c), albedo PAR (r_p), albedo infravermelho próximo (r_i) e albedo de onda curta da superfície do solo (r_s) (Bezerra, 2004 e Di Pace, 2004).

O albedo da superfície varia bastante, dependendo do tipo e das condições

da superfície, indo desde valores tão baixos como 5% (para oceanos sob condições de vento leve), a tão altos quanto 90% (para neve seca e fresca).

O albedo mais comum é o de uma superfície da água, que depende do ângulo zenital, nebulosidade, velocidade do vento e impurezas da água. O albedo do oceano para um dia de céu claro aumenta drasticamente quando o ângulo de elevação se aproxima de 0°.

Segundo Bastiaanssen (2000), uma fórmula para calcular o albedo da superfície é:

$$\Gamma_o = \frac{\Gamma_p - \Gamma_a}{t_{sw}}$$

Onde: r_p : albedo no topo da atmosfera; r_a : albedo da atmosfera; t_{sw} : transmitância atmosférica.

Estudos apresentados na Assembléia Geral da ONU (2001) relatam a utilidade no 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.

Göita et al. (1997), formulou a seguinte equação para derivar a emissividade da superfície com imagens AVHRR:

$$\varepsilon_3 = 1 - \frac{L_3(T_3) - TIS_{3j}L_3(T_j)}{\frac{1}{\pi} E_{sun_3} dt_{d3} \cos(\theta_s) + L_{ad3}}$$

Onde,

$L_3(T_3)$ = radiância termal; TIS_{3j} = temperatura spectral; E_{sun_3} = irradiância solar; d = distância sol-terra; t_{d3} = transmitância espectral; θ = ângulo zenital solar; L_{ad3} = radiância atmosférica.

2.5.2. O Albedo da cobertura vegetal e do solo

O albedo de superfícies vegetadas depende da textura do solo e das

condições fisiológicas da copa da planta. Copas compostas de folhas com geometria complexa e muitos espaços vazios, têm albedo que pode ser menor que o de uma superfície vegetada com plantas de único tipo de folha.

O albedo de um solo seco é significativamente maior que de um solo úmido, enquanto uma superfície lisa tem albedo maior que uma superfície rugosa (Hartmann, 1994). Esta alta variabilidade da superfície tem um efeito marcante na absorção de radiação solar, o que também afeta bastante a temperatura da superfície do solo.

Segundo Moran *et al.* (1990), o albedo tem uma dependência forte com a geometria, a estrutura das plantas e os tipos de solo. A quantidade de radiação dispersada em direção ao nadir aumenta com o ângulo de elevação solar, pois a radiação penetra na cobertura vegetal. Logo, devemos considerar que o albedo também varia com o ângulo de visada do satélite e com a capacidade de absorção das plantas, devido à ação dos cloroplastos. Tudo isto deve ser levado em consideração quando forem feitas correlações com diferentes satélites.

Áreas analisadas por Robinove *et al.* (1981) mostraram que aumento no albedo é primeiramente devido ao solo exposto, e diminuição no albedo é primeiramente devido ao aumento da umidade do solo e aumento na densidade da vegetação. A redução da cobertura vegetal também aumenta o albedo, que é a refletância das propriedades da superfície do solo. Sob circunstâncias específicas, o aumento no albedo reduz a precipitação local, intensificando o processo de desertificação. Logo, a vegetação é um fator principal na desertificação. A perda de vegetação promove a desertificação, e a desertificação impede sua regeneração (*Convention to Combat Desertification*, UN, 1998).

O procedimento ideal para determinar o albedo de superfície através de medidas de satélites seria aplicar a correção radiométrica/atmosférica para a radiância de cada canal, e depois corrigir a anisotropia da superfície integrando-o no intervalo de comprimento de onda desejado (KASSAR, 1995).

Segundo Robinove *et al.* (1981) imagens albedo podem ser derivadas diretamente de imagens digitais do LANDSAT e uma sequência de imagens albedo podem ser usadas para mostrar mudanças na superfície. 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.

2.5.3. Características dos Principais Sensores

Sistema Sensor

Slater (1980) afirma que os sistemas sensores multiespectrais são idealizados para atender a uma multidisciplinaridade de aplicações. Os sensores remotos são dispositivos capazes de detectar a REM em determinadas faixas do espectro eletromagnético proveniente de um objeto, transformá-las em um sinal elétrico e registrá-las, de tal forma que este possa ser armazenado ou transmitido em tempo real para posteriormente ser convertido em informações que descrevem as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre.

A REM refletida ou emitida por alvos de uma área observada pode ser coletada por sistemas sensores imageadores ou não-imageadores. Os sistemas imageadores fornecem como produto uma imagem da área observada, enquanto que os sistemas não-imageadores, também denominados radiômetros ou espectralradiômetros, apresentam o resultado em forma de dígitos ou gráficos (Novo, 1989). A qualidade de um sensor geralmente é especificada pela sua capacidade de obter medidas detalhadas da REM. As características dos sensores estão relacionadas com a resolução espacial, espectral e radiométrica (Moreira, 2001). A resolução temporal também caracteriza os sensores.

Essas características podem ser combinadas para extração de informações sobre desertificação. Por exemplo, comparando as respostas espectrais de uma região a partir de imagens obtidas em diferentes épocas, em um intervalo de tempo suficiente para que ocorram mudanças, do ponto de vista da desertificação.

Para melhor interpretar as imagens obtidas faz-se necessário o conhecimento das condições como: fonte de radiação, efeitos atmosféricos, características do sensor, geometria de aquisição de dados, tipo de processamento e estado do objeto (Moreira, 2001). A seguir apresentam-se quatro sistemas sensores orbitais que podem ser utilizados em estudos sobre desertificação.

Satélites LANDSAT

Este é um dos principais programas de sensoriamento remoto. Considerando suas bandas espectrais, as imagens podem ser utilizadas para estudos de cobertura

vegetal e temperatura do solo. O primeiro sensor deste Programa foi o MSS (*Multispectral Scanner Sensor*) com resolução espacial de 80 metros. A partir de 1984 surgiu outro sensor importante do Programa, o sensor TM (*Thematic Mapper*), cuja resolução espacial é bem melhor que a resolução do sensor AVHRR/NOAA. A altitude média dos satélites LANDSAT é 705 km fazendo uma órbita quase polar de 98,2 graus e heliosincronia em 98 minutos, realizando aproximadamente 14 revoluções por dia. Nas Tabelas 3 e 4 a seguir são apresentadas as principais características e aplicações do satélite LANDSAT:

Tabela 3. Principais características e aplicações das bandas TM do satélite LANDSAT 5.

Fonte: DGI/INPE

Banda	Intervalo espectral (μm)	Principais características e aplicações das bandas <i>TM</i> do satélite LANDSAT-5
1	(0,45 - 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	(0,52 - 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	(0,63 - 0,69)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata de galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	(0,76 - 0,90)	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com <i>pinus</i> e <i>eucalipto</i> . Serve para mapear áreas ocupadas com vegetações que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	(1,55 - 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	(10,4 - 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 - 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Tabela 4. Características dos sensores dos satélites da série LANDSAT
 Fonte: DGI/INPE

Características dos principais Instrumentos Sensores do satélite LANDSAT					
Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Faixa Imageada
MSS	4	0,5 - 0,6 um			
	5	0,6 - 0,7 um	80m		
	6	0,7 - 0,8 um		18 dias	185 km
	7	0,8 - 1,1 um			
	8				
	somente para o LANDSAT 3	10,4 - 12,6 um	120m		
TM	1	0,45 - 0,52 um			
	2	0,50 - 0,60 um			
	3	0,63 - 0,69 um	30m		
	4	0,76 - 0,90 um		16 dias	185 km
	5	1,55 - 1,75 um			
	6	10,4 - 12,5 um	120m		
	7	2,08 - 2,35 um	30m		
ETM+	1	0,45 - 0,52 um			
	2	0,50 - 0,60 um			
	3	0,63 - 0,69 um	30m		
	4	0,76 - 0,90 um		16 dias	185 km
	5	1,55 - 1,75 um			
	6	10,4 - 12,5 um	60m		
	7	2,08 - 2,35 um	30m		
	8	0,50 - 0,90 um	15m		

2.5.4. Interação da radiação eletromagnética com o solo

Para melhor entendimento de como a degradação do solo pode ser detectada através de técnicas de sensoriamento remoto é necessário conhecer como ocorrem as interações entre a radiação eletromagnética (REM) e o solo. Ou seja, o comportamento espectral de solos.

O comportamento espectral de solos é dependente de suas características físicas, químicas e biológicas. Utilizando técnicas de sensoriamento remoto, podem ser obtidas informações de maneira rápida e não destrutiva da constituição dos solos em nível de laboratório ou em nível orbital.

2.5.5. Parâmetros do solo que influenciam a REM

Os parâmetros do solo que influenciam a radiação eletromagnética (REM) refletida pela superfície são vários, porém, a literatura cita como mais importantes: os óxidos de ferro, a umidade, a matéria orgânica, a textura, a mineralogia da argila e o material de origem. Além desses fatores, têm sido citados a cor do solo, a temperatura, as condições de drenagem interna do solo, etc. A rigor, a quantidade de energia refletida por um determinado tipo de solo é função de todos esses fatores que, conjuntamente, se encontram no solo. Em determinadas condições, a influência de um parâmetro na energia refletida pelo solo, sobrepuja a dos outros, resultando, assim, num espectro característico daquele parâmetro.

Materia Orgânica

A composição e o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS) são reconhecidamente fatores de forte influência sobre a reflectância dos solos. À medida que o teor de matéria orgânica aumenta, a reflectância do solo decresce no intervalo de comprimento de onda de 400 a 2500 nm (Hoffer e Johannsen, 1969).

Segundo Baumgardner et al. (1970), quando o teor de matéria orgânica no solo excede a 2,0 %, ela desempenha um papel importante na determinação das propriedades espectrais do solo. Quando o teor é menor que 2,0%, outros constituintes passam a ser mais influentes no comportamento espectral do solo.

Na Figura 2.7 são mostradas três curvas espectrais, obtidas de solos com materiais orgânicos em diferentes estágios de decomposição; ou seja, materiais sápricos (altamente decompostos), materiais hêmicos (moderadamente decompostos) e materiais fíbricos (fracamente decompostos). Pode-se observar que quanto mais decomposto for o material orgânico, como no caso dos sápricos, maior é a absorção de energia eletromagnética e, conseqüentemente, menor é a reflectância nesta região espectral.

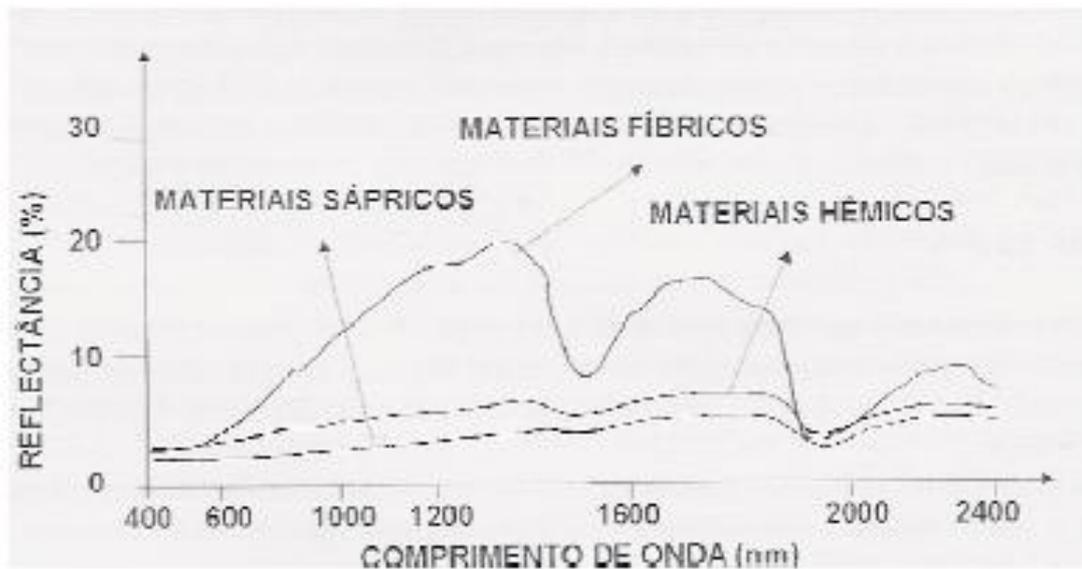


Figura 2.7. Comportamento espectral de solos com materiais orgânicos sápricos, hêmicos e fíbricos.

Fonte: Stoner (1979).

Solos orgânicos com material sáprico, altamente decomposto, têm baixa reflectância na região de 500 a 2300nm se comparados com material hêmico, moderadamente decomposto. Já o material fíbriico, ligeiramente decomposto, apresenta reflectância elevada, principalmente na região do infravermelho próximo (STONER, 1979).

Além do teor, os componentes da matéria orgânica também afetam o comportamento espectral. Constituintes orgânicos como ácidos húmicos e fúlvicos são conhecidos por influenciarem diferentemente a reflectância do solo. Ácidos húmicos têm um baixo coeficiente de radiância - 0,02 a 0,03 - enquanto os ácidos fúlvicos apresentam coeficientes de 0,04 a 0,06 (Henderson et al., 1992).

A reflectância da matéria orgânica ao longo de seu processo de decomposição foi investigada por Ben-Dor *et al.* (1997) que constataram mudança no comportamento espectral na região do visível e infravermelho próximo, sendo esta mudança correlacionada à relação C/N. Estes autores relataram que a reflectância espectral é uma ferramenta promissora para monitoração dos processos de decomposição da matéria orgânica.

Demattê et al. (2004a) constataram diferenças no comportamento espectral de solos que foram tratados com resíduos de cana de açúcar em relação aos não

tratados. Mudanças provocadas pelos processos de fermentação foram responsáveis pelas diferenças espectrais encontradas.

A matéria orgânica, que influencia várias características químicas e físicas do solo, é um constituinte primário da coloração do mesmo apresentando, portanto, uma estreita relação com a reflectância do solo. A matéria orgânica influencia na forma e no albedo da curva espectral ao longo de todo o espectro óptico, sendo que, na literatura, diferentes intervalos espectrais são utilizados em algoritmos para predizer seu teor no solo.

A matéria orgânica pode ainda exercer efeito de máscara diminuindo as feições de absorção de outros constituintes. Teores superiores a 17g.kg^{-1} de matéria orgânica no solo fazem desaparecer o efeito dos óxidos de ferro na reflectância e na cor, sendo mais forte este efeito na região do visível. O decréscimo no conteúdo de matéria orgânica acentua as fortes relações entre a reflectância e o ferro total, favorecendo o aparecimento de uma banda de absorção bem definida ao redor de 900nm (Baumgardner et al. 1970; Demattê & Garcia, 1999; Galvão & Vitorello, 1998).

A seleção das bandas do espectro óptico para predição da matéria orgânica no solo é muito variável podendo ser fixada de acordo com o conjunto de bandas disponíveis para cada sensor em particular (Henderson et al. 1989).

Mathews et al. (1973a) observaram que amostras de solo com elevado conteúdo de matéria orgânica (128g.kg^{-1}), apresentaram um decréscimo significativo na reflectância na região de 500 a 1150nm , enquanto que em amostras de solo com teores entre 20 e 30g.kg^{-1} de matéria orgânica, o mesmo comportamento não foi observado.

Krishnan et al. (1980), ao estudarem a reflectância espectral de solos para identificar comprimentos de onda mais adequados para predizer o conteúdo de matéria orgânica do solo, concluíram que a região do visível proporcionou as melhores informações, com coeficiente máximo de correlação para os modelos estudados de 0,98 para as bandas na região de 623 e 564nm , enquanto que na região do infravermelho, o coeficiente máximo de correlação foi 0,87.

Já Coleman & Montgomery (1987), usando um radiômetro portátil de campo, constataram que, com o aumento da umidade e dos teores de matéria orgânica no solo, ocorreu um decréscimo na reflectância espectral em todos os comprimentos de onda estudados, sendo a região de 760 a 900nm a mais importante para predizer o

conteúdo de matéria orgânica no solo. Posteriormente, Coleman *et al.* (1991) também com um radiômetro de campo, coletaram dados de reflectância em oito comprimentos de onda coincidentes com as bandas do sensor TM do satélite LANDSAT. Estes autores concluíram que o conteúdo de matéria orgânica do solo foi mais bem estimado, usando as bandas 2 (520 a 600nm - verde), 6 e 7 (1550 a 1750 e 2030 a 2350nm - infravermelho médio) e 8 (10400 a 12500nm - infravermelho termal).

Stoner (1979), baseado em resultados estatísticos e na avaliação quantitativa da reflectância do solo e nas características de absorção, observou que a faixa de 520 a 620 nm foi a que teve maior correlação com o teor de matéria orgânica do solo.

Textura

No sensoriamento remoto, o conhecimento da textura da superfície do solo é importante porque, dependendo da sua granulometria, a radiação eletromagnética pode interagir com os constituintes do solo em maior ou menor intensidade.

Por exemplo, se um solo apresenta, no seu horizonte superficial, uma composição de 80% de areia, 10% de silte e 10% de argila, ele é dito arenoso. Nesta situação, provavelmente, o solo apresenta uma alta reflectividade, ou seja, grande parte da energia incidente sobre ele é refletida. Esta energia refletida, quando captada por algum sistema sensor é transformada em produtos que podem ser analisados por métodos visuais ou automáticos, apresentando tons de cinza mais claros, em relação a outros solos mais argilosos ou com maior quantidade de matéria orgânica (MOREIRA, 2001).

De uma maneira geral, solos de textura arenosa tendem a ter maior reflectância, devido à sua constituição mineralógica (rica em quartzo) e ao fato de geralmente apresentarem baixos teores de matéria orgânica, óxidos de ferro e menores teores de água (STONER, 1979).

No semi-árido pernambucano a resposta espectral do solo vai depender dos atributos do solo. Em se tratando de solos arenosos, as imagens multiespectrais apresentam cores em tons de cinza claros. No caso de solos argilosos ou com maior quantidade de matéria orgânica, as imagens aparecem em tons de cinza escuros.

Os solos são formados por partículas de diferentes tamanhos. Entretanto, a caracterização textural de um solo é feita em função das frações areia (2 a 0,05 mm), silte (0,05 a 0,002 mm) e argila (<0,002 mm). Nota-se que cada uma dessas frações pode estar no solo em diferentes tamanhos compreendidos nestes intervalos. Assim, uma mancha de solo pode apresentar reflectância espectral diferente de outra mancha de solo da mesma classe textural em virtude da concentração e tamanho das partículas que as compõem.

Por outro lado, o arranjo físico e a agregação dessas partículas proporcionam ao solo uma estrutura. A textura e a estrutura são responsáveis pela quantidade e tamanho dos espaços porosos no solo, que são ocupados pela água e pelo ar. No caso de um solo ideal para cultivo, sem problema com excesso de umidade, o ar ocupa os poros maiores que 5 milímetros e a água poros menores que 5 milímetros.

Temperatura

A partir do sensoriamento remoto via satélite, pode-se avaliar a temperatura da superfície terrestre (Ts). Este parâmetro é relevante nos processos físicos à superfície terrestre em escala regional e global, estando envolvida no balanço de energia, evaporação e transpiração da vegetação e em processos de desertificação, podendo ser utilizada como indicador de degradação terrestre e de mudança climática (Araújo & Di Pace, 2007).

A diminuição das áreas verdes cria mudanças na atmosfera local, modificando a temperatura e as chuvas da região, bem como a direção e a velocidade dos ventos. As áreas verdes também alteram os índices de reflexão do calor e favorecem a manutenção da umidade relativa do ar (Kato e Yamaguchi, 2005 citados por Araújo & Di Pace, 2007).

A temperatura do ar é a variável meteorológica mais medida e de grande importância no monitoramento de vários fenômenos climatológicos, tais como monitoramento de secas, detecção de queimadas, monitoramento da superfície do mar, detecção e monitoramento do estresse hídrico de culturas e estudos de mudanças climáticas, dentre outras aplicações (Araújo & Di Pace, 2007).

A estimativa da temperatura da superfície terrestre (To) é uma tarefa complicada, devido à complexidade de separar os efeitos atmosféricos e as emissividades dos efeitos da temperatura de superfície, nas medições de radiância.

Bowers & Hanks (1965) relatam que a elevada temperatura em solos escuros, durante o dia, é atribuída à elevada absorção da energia solar, indicando que a reflectância é menor nestes solos. Estes autores mostraram que, ao longo de todo espectro óptico, a reflectância foi superior nas amostras onde a matéria orgânica foi eliminada previamente com peróxido de hidrogênio (H_2O_2). O mesmo comportamento foi observado por Demattê & Garcia (1999), que observaram aumento na resposta espectral dos solos quando houve decréscimo de matéria orgânica.

A partir de imagens NOAA, Silva *et al* (2006) geraram imagens de LST (*Land Surface Temperature*) – temperatura da superfície do solo - e correlacionaram com os dados de pluviometria no município de Floresta, Pernambuco, visando estudos sobre desertificação. A partir de modelos matemáticos desenvolvidos pelo DLR – Agência Espacial Alemã, as imagens NOAA foram adquiridas e tratadas na RRS (*Recife Receiving Station*) – Estação de Recepção de Recife. Foi aplicado sobre as imagens o modelo de cálculo de LST e em seguida foram geradas composições mensais (imagens LST em trinta dias consecutivos). Essas composições de LST foram comparadas com o índice pluviométrico do período analisado (outubro de 2003 a setembro de 2004). Foi observado que uma pequena área no município de Floresta apresentou valores de LST sempre acima de 30° C, em relação ao restante do território do município. Tal comportamento espectral foi similar a outras áreas mapeadas em processos de desertificação em Pernambuco e no Nordeste (Mendes, 1986; MMA, 2000; Sobrinho, 1978). Assim sendo, informações de pluviosidade e de temperatura do solo geradas e extraídas a partir de imagens orbitais se mostram eficientes como fonte de dados para estudos de desertificação.

Umidade

Num solo ideal, a proporção de água está em torno de 25%. É claro que, nas condições de campo, esta proporção é muito variada. Por exemplo, para solos inundados a quantidade de água contida nos seus poros é total, enquanto que em solos desérticos a quantidade existente é bastante reduzida.

Por outro lado, quando o solo é molhado, sua coloração torna-se mais escura. Isto ocorre porque a absorção da radiação eletromagnética aumenta devido à presença da água, fazendo com que a reflectância do solo decresça na região do

visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, quando comparado ao seu estado seco.

A Figura 2.8 mostra várias curvas espectrais de solos contendo diferentes porcentagens de água. É possível observar que as curvas apresentam descontinuidades nas faixas de maior absorção pela água. É possível observar, ainda, que todas elas apresentam bandas de maior absorção pela água em 1400nm, 1900nm e 2200nm.

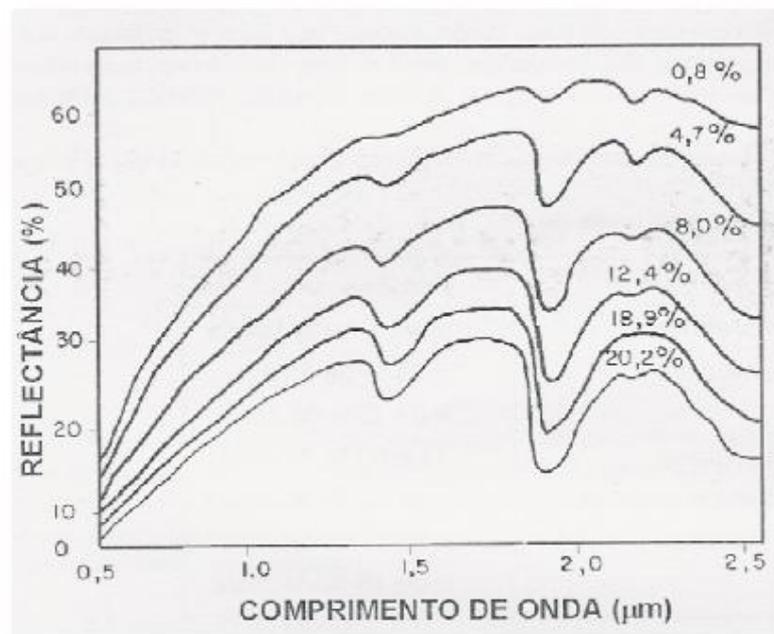


Figura 2.8. Assinaturas espectrais de solos com quantidades de água diferentes
Fonte: adaptada de Bowers & Hanks (1965), p.132.

Em relação à umidade, os solos se tornam mais escuros quanto maior for a umidade, ocasionando uma diminuição na reflectância do mesmo ao longo do espectro óptico (Bowers & Hanks, 1965). De maneira geral, não ocorrem alterações significativas na forma das curvas espectrais em função da alteração da umidade, com exceção das bandas típicas de absorção de água nas regiões de 1400 e 1900nm.

Solos úmidos, em geral, apresentam uma reflectância menor que os secos, na faixa de comprimento de onda de 400 a 2600 nm (HOFFER & JOHANNSEN, 1969).

Óxidos de Ferro

Epiphanyo *et al.* (1992) afirmam que os óxidos de ferro, dependendo do tipo e da quantidade relativa, influenciam a cor dos solos, isto é, dão aos solos a cor correspondente ao óxido. Por exemplo, solos que contêm quantidades apreciáveis de ilmenita ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$) apresentam coloração amarelo-clara, porque é a cor manifestada pela ilmenita. Solos ricos em hematita (Fe_2O_3) são de coloração vermelha, por causa da cor da hematita. Eles ainda afirmam que no contexto de sensoriamento remoto, a reflectância espectral de solos pode ser usada como um critério importante na identificação de solos que contêm diferentes óxidos de ferro. As diferentes cores dos óxidos de ferro são devidas à absorção seletiva da luz na região do visível, causada pela transição dos elétrons na camada orbital.

Em amostras heterogêneas, o matiz avermelhado da hematita mascara o matiz amarelo da goethita, mesmo quando a relação hematita/hematita + goethita é relativamente baixa (Resende, 1976). Estes minerais, de grande ocorrência nas regiões tropicais e subtropicais, afetam o comportamento químico e físico do solo e também influenciam seu comportamento espectral. A goethita apresenta maior reflectância que a hematita (Vitorello & Galvão, 1996), sendo que a presença destes óxidos de ferro no solo influencia o comportamento da curva espectral principalmente na região do visível e infravermelho próximo (Formaggio *et al.*, 1996; Demattê & Garcia, 1999), no infravermelho médio (Stoner, 1979) diminuindo o albedo conforme aumenta seu teor no solo.

Os óxidos de ferro também apresentam feições típicas, principalmente na região de 900nm, que são mais intensas quanto maiores forem os teores de ferro (Mathews *et al.*, 1973a; Stoner *et al.*, 1980).

Stoner *et al.* (1991), ao estudarem duas classes de Latossolos brasileiros, observaram bandas de absorção atribuídas aos óxidos de ferro em diferentes comprimentos de onda do espectro óptico, principalmente nas regiões de 400 a 550nm e em 650nm e 850nm. A maior diferença nos espectros destes solos ocorreu na faixa inferior a 550nm, devido ao predomínio de hematita no solo deixando-o opaco, ou seja, com elevado poder de absorção de luz.

Em geral, os óxidos de ferro absorvem bastante a energia eletromagnética da região do infravermelho próximo (com máximo de absorção em torno de 900 nm).

Cor

O desenvolvimento de relações de cor do solo com a reflectância pode auxiliar na identificação de características físicas e químicas do solo a partir de sensoriamento remoto. A cor do solo é dependente da luz incidente, da percepção do observador ou instrumento de medida e também da energia refletida pelo solo, podendo ser, de acordo com Fernandes & Schulze (1987), calculada a partir do espectro de reflectância. Usando esta técnica estes autores quantificaram pequenas diferenças na cor do solo, as quais seriam imperceptíveis à observação visual.

A cor do solo é um atributo importante, sendo largamente utilizado para classificar e fazer interpretações sobre os solos. Sua importância reside no fato de que a matéria orgânica e os óxidos de ferro estão associados a ela (Post et al., 1993). Inúmeros trabalhos mostrando relações entre óxidos de ferro e cor (Schwertmann, 1993), matéria orgânica e cor (Schulze *et al.*, 1993) além dos parâmetros de cor obtidos através da reflectância espectral do solo (Barron e Torrent, 1986), são encontrados na literatura.

Mattikalli (1997) utilizou 76 amostras de solos para validar um modelo que pode determinar a cor do solo por meio da sua reflectância, obtendo resultados com boa precisão. Os intervalos espectrais do radiômetro utilizado coincidiram com as bandas do sensor multiespectral MSS do satélite LANDSAT, o que levou este autor a concluir que os resultados do seu estudo podem ter um considerável potencial de aplicação para identificação e mapeamento de solos em grandes áreas ou em áreas inacessíveis utilizando imagens de satélite.

Nesta mesma linha, Escadafal *et al* (1989) obtiveram coeficientes de correlação superiores a 0,9 ao estudar relações entre a cor do solo, medida com a carta de Munsell, e as bandas do LANDSAT. Observações semelhantes foram verificadas por Post *et al.* (1994), que ao estudarem as características de cor da terra fina de solos, obtida com colorímetro e através de números digitais registrados pelo LANDSAT, obtiveram dados altamente correlacionados.

2.5.6. Relação solo e cobertura vegetal

O solo pode exercer bastante influência no comportamento espectral da cobertura vegetal, dependendo da época em que os dados foram adquiridos. Em dossel agrícola, no início do crescimento vegetativo e para culturas cujo espaçamento é relativamente grande, como é o caso das culturas do café e citrus, a contribuição do solo é muito grande em relação ao estágio de maior crescimento vegetativo.

Para Huete *et al.* (1985), a reflectância do solo tem influência marcante na avaliação e caracterização de áreas vegetadas. O tipo de solo, bem como suas características, influenciam a reflectância do dossel de algumas culturas, principalmente durante o período inicial de desenvolvimento, quando ocorre a maior porcentagem de solo exposto (Bauer *et al.*, 1981; Ahlrichs e Bauer, 1983).

2.5.7. Comportamento espectral dos solos

A reflectância espectral do solo depende dos parâmetros citados anteriormente e outros como rugosidade da superfície, conteúdo mineral e biomassa seca residual. O conteúdo de umidade do solo e biomassa seca residual, os quais variam com o tempo, dominam o padrão de reflectância espectral do solo (Gausman *et al.* 1975).

Accioly *et al* (2002) estudando o albedo em imagens de satélites no monitoramento dos processos de desertificação do semi-árido brasileiro, verificaram que o albedo aumentou em áreas ocupadas principalmente por Luvisolos, Neossolos Litólicos e em áreas onde há predominância de afloramentos de rocha. Neste estudo eles afirmam que os solos das classes Luvisolos e Neossolos Litólicos são, também, reconhecidamente mais susceptíveis à erosão. No caso dos Neossolos Litólicos a hipótese mais provável é que esse aumento de suscetibilidade à erosão esteja associado à exploração da lenha em áreas que no passado eram mantidas preservadas, ou seja, áreas onde grande parte do relevo pertence às classes forte ondulado (20 a 45% de declividade) e montanhoso (45 a 75% de declividade).

De acordo com Alsdorf *et al* (2000) a maior parte das informações pedológicas podem não vir diretamente das imagens, mas sim de informações

associadas, além dos trabalhos de campo e do conhecimento do pesquisador. No entanto, com mapas preliminares de solos produzidos através de sensores multiespectrais, é possível acelerar os processos de levantamento de solos de uma região em considerável extensão, podendo adicionar características a serem obtidas de cuidadosa análise das propriedades das imagens (Gherardi *et al.*, 2005).

2.5.8. Processamento Digital de Dados

O principal objetivo do processamento digital de imagens é ampliar o poder de discriminação dos alvos nas imagens. Segundo Schowengerdt (1983) o processamento digital de imagens é composto de três etapas: pré-processamento, realce e classificação. Técnicas de segmentação também fazem parte do contexto aqui descrito, visto que esta técnica, utilizada mais recentemente, é considerada uma etapa intermediária entre o realce e a classificação (Venturieri, 1996).

Um dos mais freqüentes métodos usados para extração digital de informações é a classificação multiespectral (Jensen, 1986). O referido método de classificação é conduzido considerando estritamente as características espectrais dos alvos que compõem a superfície terrestre.

Essas características espectrais constituem o comportamento radiométrico de cada alvo ou conjunto de alvos numa cena. Este comportamento é a medida quantitativa das características espectrais em vários intervalos de comprimento de onda (Thomas *et al.*, 1987).

2.5.9. Normalized Difference Vegetation Index - NDVI

As imagens-índice de vegetação baseiam-se no fato de que a vegetação possui uma resposta característica nas regiões do espectro eletromagnético relativas ao vermelho e ao infravermelho próximo, diferenciando-a de outros alvos terrestres.

Matematicamente, os índices são razões de bandas, i.e., o resultado de uma operação aritmética, onde os níveis de cinza ou os valores de reflectância de duas ou mais bandas, referentes à mesma cena, são divididos para formar uma nova banda. Esta operação é útil e simples, porém depende muito do conhecimento do usuário, por exemplo, na escolha das bandas.

Os índices mais conhecidos são a Razão Simples (*Simple Ratio*) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*), sendo este o mais utilizado.

As técnicas de processamento envolvendo índices e razões são de grande utilidade, pois são de fácil realização e interpretação, reduzem a dimensionalidade dos dados e reduzem os efeitos de sombra e de interferência da atmosfera e do solo, os quais mascaram a resposta da vegetação.

O NDVI representa o contraste espectral entre a resposta das plantas verdes nas bandas vermelho e infra-vermelho próximo sendo dado pela seguinte expressão:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Onde,

NIR = reflectância espectral da banda do sensor na faixa do infravermelho próximo;

RED = reflectância espectral da banda do sensor na faixa do vermelho.

Os valores de NDVI variam entre - 1 e + 1. Este índice permite identificar a presença de vegetação verde na superfície e caracterizar a sua distribuição espacial, bem como a evolução de seu estado ao longo do tempo, o qual é determinado pelas variações das condições climáticas reinantes. Sua interpretação deve levar em consideração os ciclos fenológicos anuais a fim de se distinguir as oscilações naturais do estado da vegetação.

Qualquer sistema sensor pode gerar imagens NDVI desde que possua bandas nas duas regiões do espectro eletromagnético. Por exemplo, no sensor AVHRR/NOAA as bandas no vermelho e infravermelho próximo correspondem as bandas 1 e 2 e compreendem as faixas espectrais de 0,58 μm a 0,68 μm e 0,72 μm a 1,10 μm , respectivamente. Além do AVHRR/NOAA, o NDVI pode ser obtido a partir dos sensores MSS ou TM do LANDSAT.

O NDVI (Figura 2.9) derivado de imagens AVHRR é o mais utilizado para a análise de cobertura vegetal em escala global e regional. Exemplos do uso do NDVI para mapear a vegetação, mostraram que este se correlaciona linearmente com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela vegetação e com o índice de área foliar (IAF) (Tucker *et al.*, 1985; Law, 1995).

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo é computado pela seguinte equação empírica:

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$$

Onde SAVI é o Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI). Este índice busca amenizar os efeitos do “background” do solo e é dado pela expressão (Huete, 1988, citado por Bezerra, 2004):

$$SAVI = \frac{(1+L)(?_{IV} - ?_V)}{(L + ?_{IV} + ?_V)}$$

Onde,

L é constante e (?) é a banda espectral do sensor utilizado. Normalmente o valor de L é 0,5.

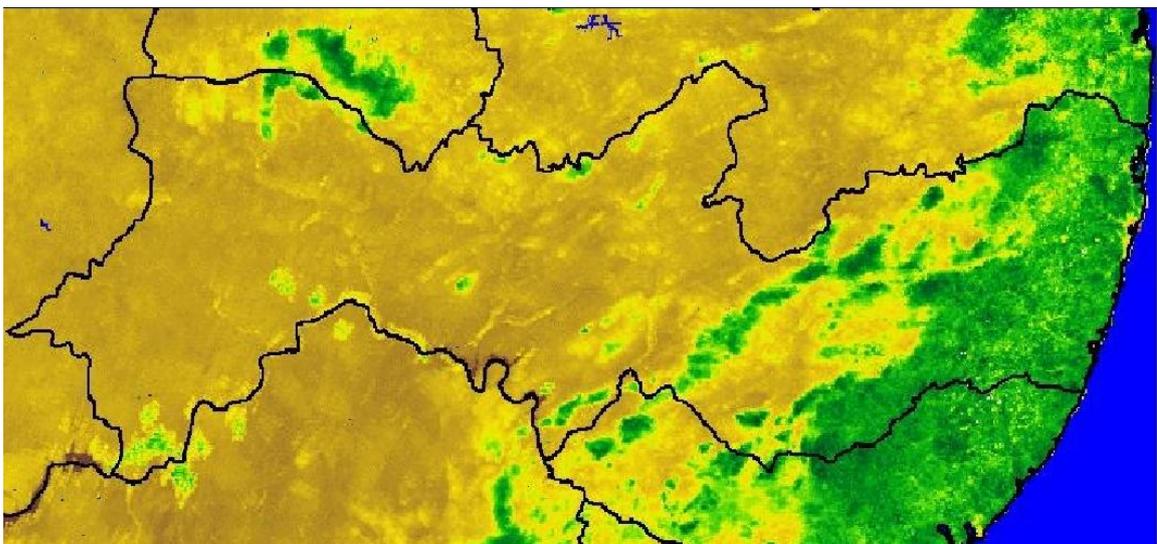


Figura 2.9. Imagem de NDVI gerada a partir de imagens do NOAA 16.
Fonte: RRS/GEOSERE/UFRPE.

O NDVI é preferido para monitoramento da vegetação global, porque compensa parcialmente a variação nas condições de iluminação, inclinação da superfície terrestre e aspectos das visadas do sensor em função da ampla largura da órbita (2.700 km). Nuvens, água e neve têm reflectâncias maiores no visível do que no infravermelho, sendo que nestas condições o NDVI tem valores negativos (Figura 2.10). Rochas e solos expostos têm reflectâncias similares nestas duas bandas e o resultado no índice de vegetação é aproximadamente zero.

Para este trabalho foi considerado a seguinte escala de NDVI:

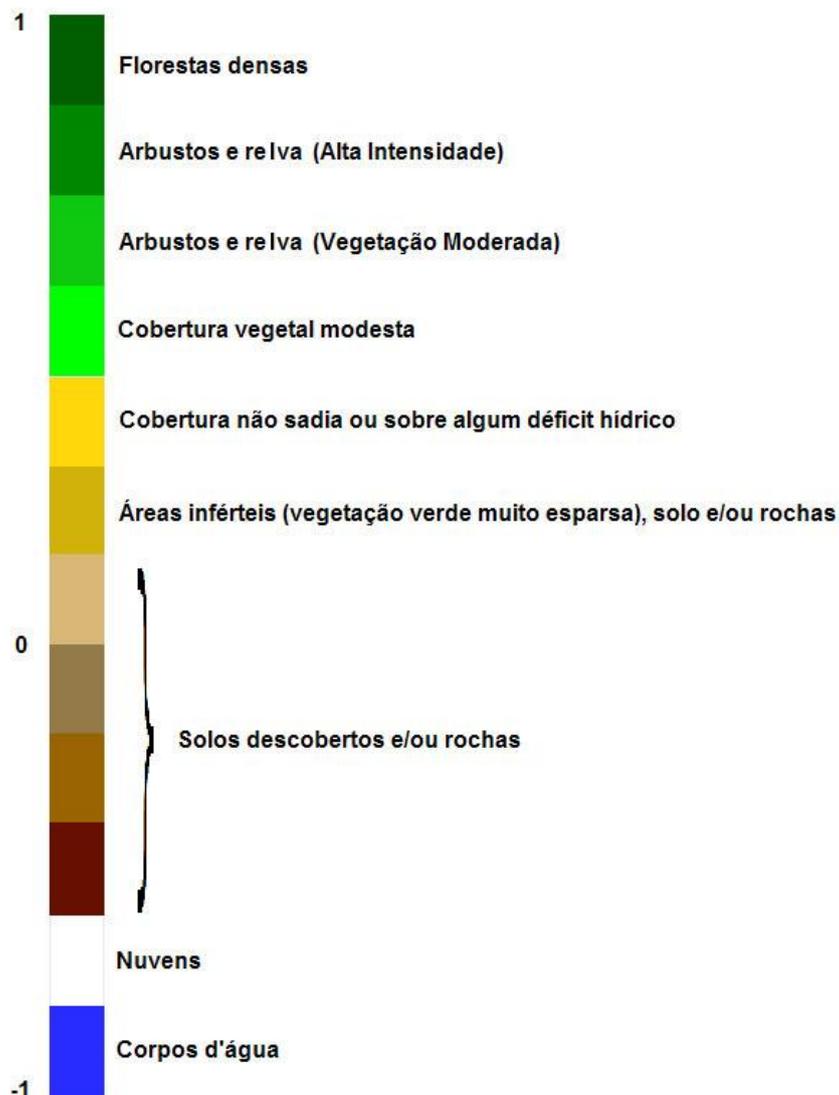


Figura 2.10. Escala de cores associadas aos valores de NDVI e respectivas feições nas imagens de satélites.

Fonte: RRS/GEOSERE/UFRPE, 2008.

Em cenas com vegetação o NDVI varia de 0,1 a 0,6, onde os valores mais altos são associados com maior vigor e densidade da cobertura vegetal. Efeitos atmosféricos como o espalhamento por poeira, aerossóis e nuvens de tamanho dos subpixels agem para aumentar a reflectância na banda 1, em relação à banda 2, e reduzir o valor do índice da vegetação (Holben, 1986).

2.5.10. Temperatura da Superfície (Ts)

A temperatura do ar é a variável meteorológica mais medida e de grande importância no monitoramento de vários fenômenos climatológicos, tais como monitoramento de secas, detecção de queimadas, monitoramento da superfície do mar, detecção e monitoramento do estresse hídrico de culturas e estudos de mudanças climáticas, dentre outras aplicações (Di Pace, 2004).

A estimativa da temperatura da superfície terrestre (Ts) é uma tarefa complicada, devido à complexidade de separar os efeitos atmosféricos e as emissividades dos efeitos da temperatura de superfície, nas medições de radiância.

Quando se utiliza o sensoriamento remoto para obter a temperatura da superfície, devem ser considerados os problemas resultantes dos efeitos de absorção atmosférica e da emissividade da superfície, ao nível de cada pixel da imagem. Para a correção desses efeitos, têm sido propostos diferentes algoritmos para obtenção de valores de Ts mais confiáveis (Di Pace, 2004).

Para a estimativa de emissividade da superfície terrestre, um dos métodos usuais é o método de Griend & Owe (1993), que utiliza uma correlação empírica entre emissividade e NDVI. A estimativa de emissividade média das bandas termais 4 e 5 do sensor AVHRR/NOAA é expressa em função do NDVI:

Para $NDVI \leq 0,24$, considerado como solo nu, $\epsilon = 0,94$;

Para $NDVI > 0,24$, $\epsilon = 1,0094 + 0,10824 \log (NDVI)$.

2.5.11. Sistema de informações geográficas (SIG)

A integração de informações temáticas relativas à desertificação pode ser feita com a utilização de um sistema de informações geográficas (SIG). O SIG é um ambiente computacional utilizado para integrar dados cartográficos, cadastrais, de

sensores remotos, redes e modelos numéricos de terreno. Permite também consultar, recuperar, visualizar, manipular e plotar o conteúdo de um banco de dados georreferenciados. É uma ferramenta poderosa para análise e manipulação de um grande número de informações espaciais (CÂMARA, 1993).

A desertificação é um fenômeno espacial e como tal pode ser tratado dentro de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). As ferramentas de análise de um SIG permitem estabelecer correlações espaciais e modelagens diversas para dados os mais variados como os provenientes de indicadores dos processos de desertificação. A integração de dados em um único banco de dados e a possibilidade de apresentar os resultados da análise dos processos de desertificação na forma de mapas são vantagens adicionais oferecidas por um SIG.

Neste trabalho foi desenvolvido um SIG para risco de desertificação de Pernambuco. Os temas relacionados a desertificação foram organizados espacialmente e sobre estes foram realizadas operações de análise espacial.

Ao concluir esta Fundamentação Teórica, ressalta-se que foram abordados conceitos de três áreas de conhecimento: Ciência do Solo, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. Ou seja, foram apresentados apenas os conhecimentos teóricos dessas áreas necessários para compreensão e aplicação da metodologia definida. No capítulo a seguir estes conceitos estão inseridos nos procedimentos metodológicos realizados no desenvolvimento desta Tese.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área de estudo

A área de estudo abrange parte do semi-árido do Estado de Pernambuco, na sua porção oeste, que corresponde à região do Sertão (Figura 3.1) e uma pequena parte do agreste pernambucano, especificamente o município de Jataúba e circunvizinhança.

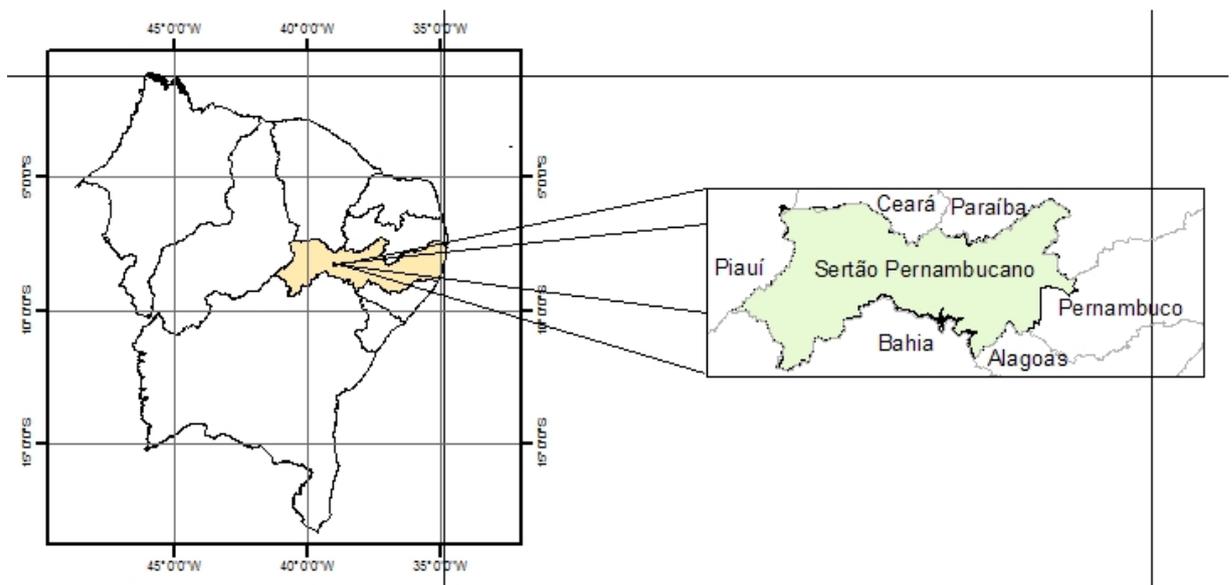


Figura 3.1. Localização da área de estudo

3.1.1. Localização das áreas piloto

As áreas piloto desse estudo estão localizadas nos municípios de Floresta e Jataúba (Figura 3.2), e foram selecionadas por apresentarem alto nível de degradação e estarem incluídas no projeto de pesquisa SOLODESERT (RIBEIRO, 2004).

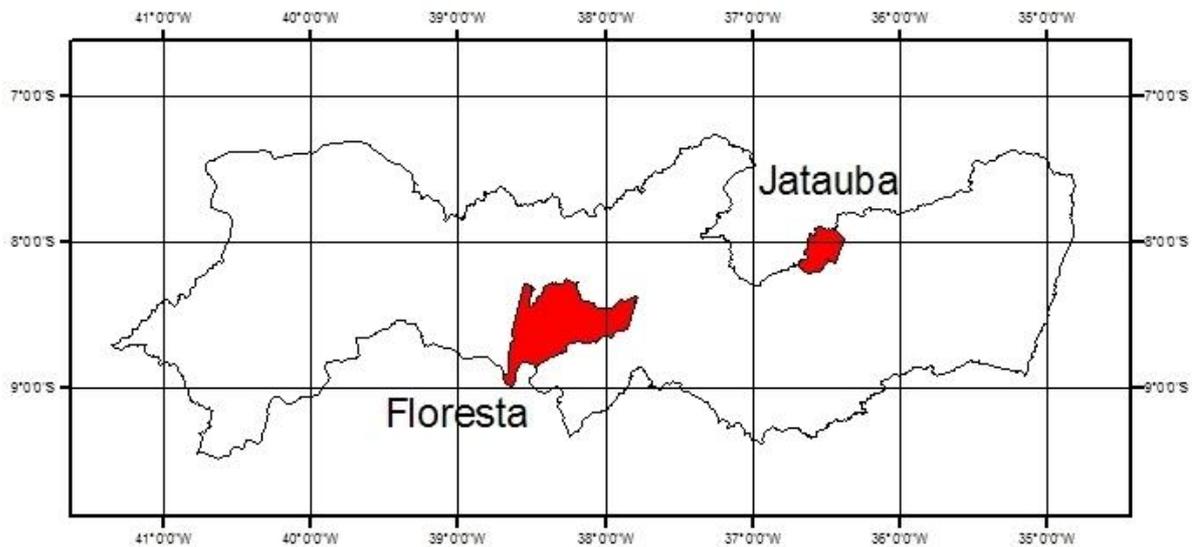


Figura 3.2. Localização dos municípios de Floresta e Jataúba, Pernambuco.
Fonte: GEOSERE/UFRPE, 2008.

3.1.1.1. Município de Floresta

O município de Floresta está localizado a 434 km a oeste da cidade de Recife (Figura 3.2). Na mesorregião do São Francisco pernambucano e microrregião Sertão de Itaparica, limita-se a Norte com o município de Serra Talhada, Betânia e Custódia, a Oeste com Carnaubeira da Penha e Itacuruba, a Sul com Tacaratu, Petrolândia e Estado da Bahia, a Leste com Inajá, Ibimirim (CPRM, 2005).

O acesso à cidade de Floresta, partindo de Recife, é feito pela BR-232 até o povoado do Cruzeiro do Nordeste, tomando-se em seguida a BR-110 por um percurso de 60 km até a cidade de Ibimirim, depois segue pela PE-360 por um trecho de 106 km até a cidade de Floresta, (CPRM, 2005).

Aspectos Fisiográficos

No município de Floresta tem-se uma paisagem típica do semi-árido nordestino, caracterizada por uma superfície de pediplanação bastante monótona, relevo predominantemente suave-ondulado, cortada por vales estreitos, com vertentes dissecadas. Elevações residuais, cristas e/ou outeiros pontuam a linha do horizonte. Esses relevos isolados testemunham os ciclos intensos de erosão que atingiram grande parte do sertão nordestino (JATOBÁ, 2003).

Clima

Segundo dados da agência CONDEPE em 1998, o clima nessa mesorregião é do tipo Tropical Semi-Árido, com estação seca bem definida e com chuvas concentradas, sobretudo, no verão, tendo como principal elemento influenciador, o mecanismo de circulação das massas de ar (Ferraz *et al*, 2006).

Pela sistemática de Köppen, prevalece o tipo climático BSw'h', ou seja, muito quente, semi-árido, tipo estepe, com estação chuvosa adiantada para o outono, entre janeiro e maio. As precipitações pluviométricas são da ordem de 623 mm se distribuem com acentuada irregularidade, não só anualmente como também mensalmente. O período chuvoso é de janeiro a maio, sendo os meses mais chuvosos março e abril.

A temperatura média anual da região é de 26,5°C, sendo a do mês mais quente 33,9°C e a do mês mais frio 18,3°C. A insolação é elevada (2.300 a 2.400h/ano). A forte irradiação, aliada à pouca umidade relativa, condiciona uma elevada evapotranspiração potencial, cuja média anual é de 1646 mm. Nessas condições, o balanço hídrico do solo apresenta um déficit muito acentuado, indicando grandes limitações para se praticar agricultura de sequeiro na região. Logo, o trato com lavouras dependentes de chuvas se constitui em uma prática de alto risco (Araújo Filho *et al*, 2001).

Vegetação

Segundo Araújo Filho *et al* (2001) a vegetação predominante no município de Floresta é a caatinga hiperxerófila. Ocorrem trechos de floresta caducifólia (Rodal & Sampaio, 2002) nos ambientes de serras.

Galindo (2007) em recente estudo também afirma que nas áreas do município de Floresta estudadas na Tese a vegetação predominante é a caatinga hiperxerófila arbustiva baixa com altura média inferior a 1,5m, apresentando significativa diminuição da densidade absoluta em função da intensidade de degradação dos solos.

Essa vegetação possui uma atividade biológica muito baixa, durante boa parte do ano. Esse tipo de cobertura expõe o solo ao impacto direto das chuvas, geralmente de alta intensidade, acelerando o processo erosivo. A pecuária extensiva

e o manejo inadequado da vegetação de caatinga têm proporcionado uma redução ou fragmentação das áreas com vegetação ainda preservada (Pacheco *et al* 2006).

Geologia

O município de Floresta encontra-se inserido, geologicamente, na Província Borborema, sendo constituído pelos litotipos dos complexos Floresta, Sertânia, Serra de Jabitacá, Cabrobó, Belém do São Francisco, Lagoa das Contendas, Vertentes e São Caetano. Também é constituído dos compartimentos Granítica-migmática Peraluminosa Recanto/Riacho do Forno, Serrote das Pedras Pretas e Intrusiva Calcicalina Trondhjemitica, da Formação Barra Bonita, das suítes Peraluminosa Xingo, Calcicalino de Médio a Alto Potássio Itaporanga, Shoshonítica Ultrapotássica Triunfo e Prata, da Formação Tacaratu, do Grupo Brotas e das formações Santana, Candeias, Marizal e Exu, e dos depósitos Colúvio-eluviais e Aluvionares (CPRM, 2005).

3.1.1.2. Município de Jataúba

Segundo a CPRM (2005) o município de Jataúba está localizado na Mesorregião Agreste e Microrregião Vale do Ipojuca do Estado de Pernambuco, limitando-se a norte com Estado da Paraíba, a sul com Belo Jardim, a leste com Brejo da Madre de Deus e Santa Cruz do Capibaribe, e a oeste com Poção.

A área municipal ocupa 637 Km² e representa 0,72% do Estado (Figura 3.2). A sede do município tem uma altitude aproximada de 516 m e coordenadas geográficas de 07° 59' 24" de latitude sul e 36° 29' 47" de longitude oeste, distando 228 km da capital, cujo acesso é feito pela BR-232, BR 104 e PE-145 (Galindo, 2007).

Aspectos fisiográficos

De acordo com Jatobá (2003) o município de Jataúba está inserido no embasamento cristalino, um dos mais destacados compartimentos regionais do relevo nordestino, o Planalto da Borborema, formado por maciços e outeiros altos, com altitude variando entre 500 a 800 metros.

O relevo é geralmente movimentado, com vales profundos e estreitos dissecados. Com respeito à fertilidade dos solos é bastante variada, com certa predominância de média para alta. A área da unidade é recortada por rios perenes, porém de pequena vazão e o potencial de água subterrânea é baixa.

Clima

O clima em Jataúba é do tipo Tropical Chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se inicia em janeiro/fevereiro com término em setembro, podendo se adiantar até outubro (CPRM, 2005).

Predomina na região o tipo bioclimático BShs', pela classificação de Köppen ou seja, clima semi-árido de estepe (com estação chuvosa adiantada para o outono, entre janeiro e maio), quente ou nordestino de seca acentuada com índice xerotérmico entre 150 e 200 e um período seco de 7 a 8 meses (JACOMINE *et al*, 1973).

A temperatura média anual da região é de 24°C, sendo a do mês mais quente 33,9°C e a do mês mais frio 18,3°C. A insolação é elevada (2.300 a 2.400h/ano). As precipitações pluviométricas são da ordem de 635 mm se distribuem com acentuada irregularidades, não só anualmente como também mensalmente. O período chuvoso é de janeiro a maio, sendo os meses mais chuvosos março e abril.

Vegetação

Galindo (2007) em recente estudo afirma que nas áreas do município de Jataúba estudadas na Tese a vegetação predominante é a caatinga hiperxerófila arbóreo-arbustiva e arbustiva pouco densa a aberta, apresentando diminuição da densidade absoluta em função da intensidade de degradação dos solos.

As Figuras 3.3 e 3.4 são composições coloridas falsa cor das bandas 432 em RGB do sensor TM/LANDSAT. Ou seja, nas composições falsa cor, os alvos não estão associados às cores naturais. Nestas imagens, a cor vermelha está associada a cobertura vegetal. Os territórios dos municípios de Floresta e Jataúba estão delimitados pela linha amarela.

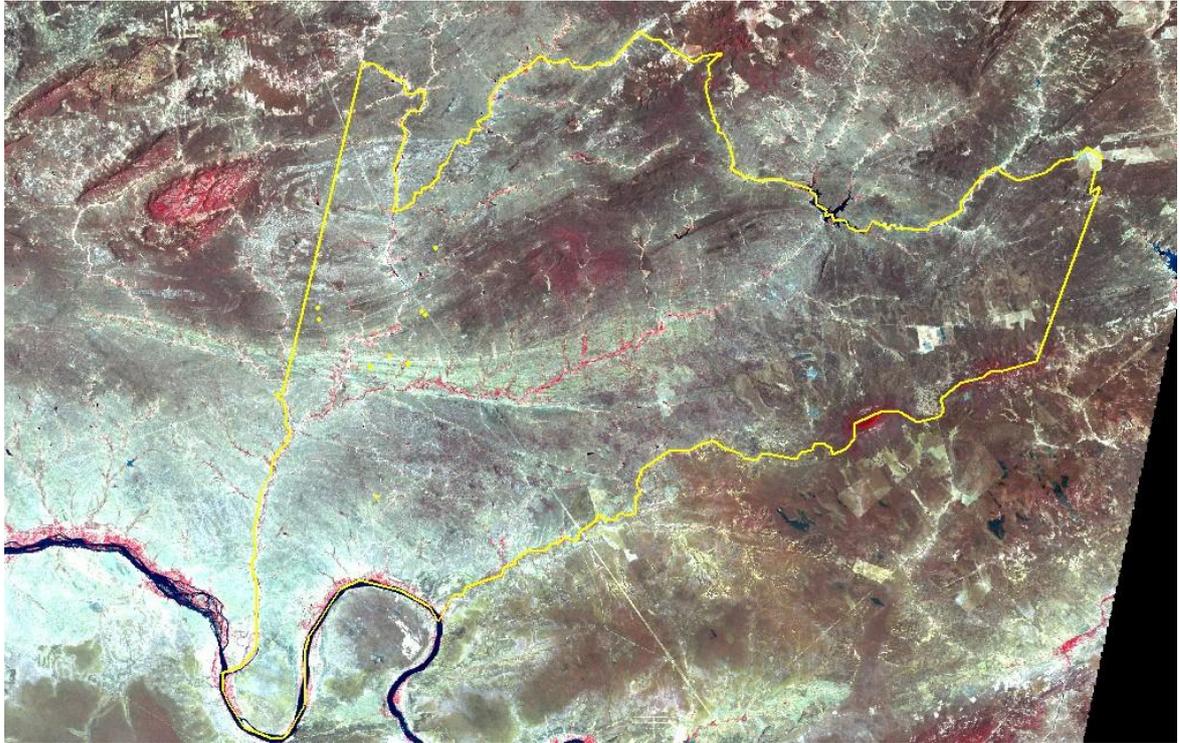


Figura 3.3. Imagem LANDSAT composição colorida falsa cor 432RGB do município de Floresta. A aquisição da imagem foi em 30 de setembro de 1999.
Fonte: GEOSERE/UFRPE, 2007.

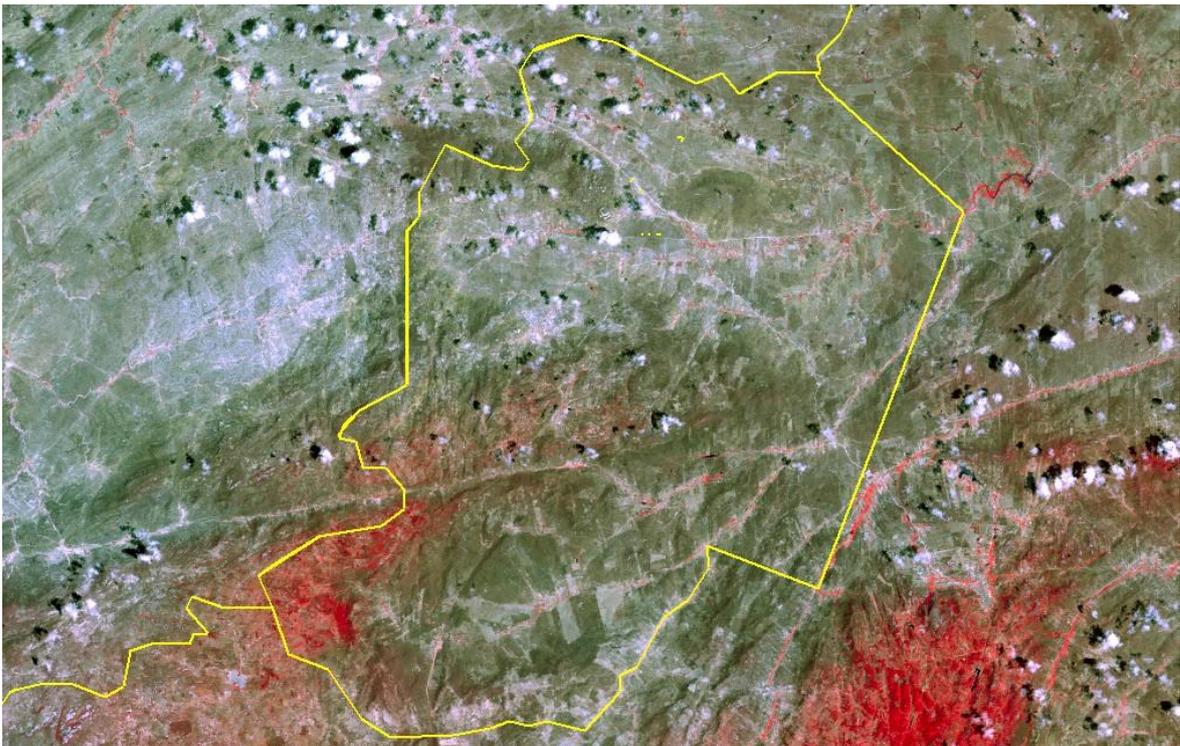


Figura 3.4. Imagem LANDSAT composição colorida falsa cor 432RGB do município de Jataúba. A aquisição da imagem foi em 12 de novembro de 2001.
Fonte: GEOSERE/UFRPE, 2007.

3.2. Materiais utilizados

A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa de Solos e no GEOSERE (Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto) localizados na UFRPE. Inicialmente foi realizada a aquisição de imagens pretéritas da série LANDSAT 1, 2, 3, 5 e 7. Destas foram selecionadas uma série histórica de imagens dos sensores MSS (LANDSAT 1, 2 e 3), TM (LANDSAT 5) e ETM⁺(LANDSAT 7) no período de 1973 a 2008.

Para isso, foi realizado um levantamento das imagens existentes nos bancos de dados de agências espaciais e instituições de pesquisas como a NASA (*National Administration Space Agency*), USGS (*United States Geological Survey*), *Maryland University*, INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais), GEOSERE/UFRPE (Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto / UFRPE), EMBRAPA Monitoramento por Satélite. Foram adquiridas 180 (cento e oitenta) imagens de satélites, totalizando 34,6 gigabytes de informações. As imagens estão com resolução radiométrica de 8 bits e com a menor cobertura de nuvens possível nos anos de aquisição. A Tabela 05 apresenta a relação das imagens utilizadas.

Tabela 05: Cenas do satélite LANDSAT utilizadas na Pesquisa

Satélite	Sensor	Órbita/ Ponto	Bandas Espectrais	Data de aquisição
LANDSAT 1	MSS	230/066	4, 5 e 7	16/04/1975
LANDSAT 1	MSS	231/065	4, 5 e 7	04/01/1974
LANDSAT 1	MSS	231/065	4, 5 e 7	12/01/1976
LANDSAT 1	MSS	231/066	4, 5 e 7	04/01/1974
LANDSAT 1	MSS	231/066	4, 5 e 7	12/03/1975
LANDSAT 1	MSS	231/066	4, 5 e 7	12/01/1976
LANDSAT 1	MSS	231/066	4, 5 e 7	17/05/1976
LANDSAT 1	MSS	232/066	4, 5 e 7	07/10/1973
LANDSAT 1	MSS	232/066	4, 5 e 7	28/07/1973
LANDSAT 1	MSS	233/066	4, 5 e 7	13/11/1973
LANDSAT 1	MSS	233/066	4, 5 e 7	06/11/1974
LANDSAT 1	MSS	233/066	4, 5 e 7	16/10/1975
LANDSAT 1	MSS	229/066	4, 5 e 7	02/06/1976
LANDSAT 2	MSS	230/066	4, 5 e 7	25/06/1977

LANDSAT 2	MSS	230/066	4, 5 e 7	09/03/1977
LANDSAT 2	MSS	230/066	4, 5 e 7	29/10/1977
LANDSAT 2	MSS	230/066	4, 5 e 7	28/05/1979
LANDSAT 2	MSS	230/066	4, 5 e 7	02/08/1980
LANDSAT 2	MSS	230/066	4, 5 e 7	08/10/1981
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	10/12/1976
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	04/11/1976
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	19/08/1977
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	05/12/1977
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	12/10/1977
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	02/10/1979
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	21/08/1980
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	07/12/1980
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	12/01/1981
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	27/10/1981
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	25/01/1982
LANDSAT 2	MSS	231/065	4, 5 e 7	10/12/1976
LANDSAT 2	MSS	231/065	4, 5 e 7	04/11/1976
LANDSAT 2	MSS	231/065	4, 5 e 7	12/10/1977
LANDSAT 2	MSS	231/065	4, 5 e 7	14/09/1979
LANDSAT 2	MSS	231/065	4, 5 e 7	21/08/1980
LANDSAT 2	MSS	231/065	4, 5 e 7	12/04/1981
LANDSAT 2	MSS	231/065	4, 5 e 7	23/06/1981
LANDSAT 2	MSS	231/066	4, 5 e 7	07/12/1980
LANDSAT 2	MSS	231/065	4, 5 e 7	25/01/1982
LANDSAT 2	MSS	232/066	4, 5 e 7	05/11/1976
LANDSAT 2	MSS	232/066	4, 5 e 7	30/05/1979
LANDSAT 2	MSS	232/066	4, 5 e 7	22/08/1980
LANDSAT 2	MSS	232/066	4, 5 e 7	08/12/1980
LANDSAT 2	MSS	232/066	4, 5 e 7	03/12/1981
LANDSAT 2	MSS	232/066	4, 5 e 7	30/07/1981
LANDSAT 2	MSS	232/066	4, 5 e 7	08/03/1981
LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	06/11/1976
LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	01/11/1977
LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	16/09/1979

LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	10/09/1980
LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	19/02/1981
LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	31/07/1981
LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	09/03/1981
LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	16/11/1981
LANDSAT 2	MSS	233/066	4, 5 e 7	05/09/1981
LANDSAT 3	MSS	230/066	4, 5 e 7	17/07/1978
LANDSAT 3	MSS	230/066	4, 5 e 7	03/12/1979
LANDSAT 3	MSS	231/065	4, 5 e 7	23/08/1978
LANDSAT 3	MSS	231/065	4, 5 e 7	28/09/1978
LANDSAT 3	MSS	231/065	4, 5 e 7	19/06/1980
LANDSAT 3	MSS	231/066	4, 5 e 7	23/08/1978
LANDSAT 3	MSS	231/066	4, 5 e 7	21/11/1978
LANDSAT 3	MSS	231/066	4, 5 e 7	19/02/1979
LANDSAT 3	MSS	231/066	4, 5 e 7	09/01/1980
LANDSAT 3	MSS	232/066	4, 5 e 7	08/05/1978
LANDSAT 3	MSS	232/066	4, 5 e 7	22/11/1978
LANDSAT 3	MSS	232/066	4, 5 e 7	17/10/1978
LANDSAT 3	MSS	232/066	4, 5 e 7	11/09/1978
LANDSAT 3	MSS	232/066	4, 5 e 7	20/06/1980
LANDSAT 3	MSS	233/066	4, 5 e 7	27/05/1978
LANDSAT 3	MSS	233/066	4, 5 e 7	23/11/1978
LANDSAT 3	MSS	233/066	4, 5 e 7	06/12/1979
LANDSAT 3	MSS	233/066	4, 5 e 7	21/02/1979
LANDSAT 3	MSS	229/066	4, 5 e 7	02/06/1976
LANDSAT 3	MSS	232/066	4, 5 e 7	08/05/1978
LANDSAT 3	MSS	232/066	4, 5 e 7	22/11/1978
LANDSAT 5	TM	215/066	2, 3 e 4	23/10/1987
LANDSAT 5	TM	216/066	2, 3 e 4	23/10/1987
LANDSAT 5	TM	215/065	2, 3 e 4	18/06/1990
LANDSAT 5	TM	218/066	2, 3 e 4	04/01/1990
LANDSAT 5	TM	217/065	2, 3 e 4	24/08/1992
LANDSAT 5	TM	217/066	2, 3 e 4	24/08/1992
LANDSAT 5	TM	218/066	2, 3 e 4	04/01/1992
LANDSAT 5	TM	215/066	2, 3 e 4	09/12/1995

LANSAT 5	TM	215/065	2,3 e 4	18/06/1990
LANSAT 5	TM	215/066	2,3 e 4	21/08/1990
LANSAT 5	TM	216/065	2,3 e 4	13/09/1990
LANSAT 5	TM	216/066	2,3 e 4	13/09/1990
LANSAT 5	TM	217/065	2,3 e 4	16/06/1990
LANSAT 5	TM	217/066	2,3 e 4	16/06/1990
LANSAT 5	TM	217/067	2,3 e 4	16/06/1990
LANSAT 5	TM	218/066	2,3 e 4	07/06/1990
LANSAT 5	TM	215/065	2,3 e 4	08/04/1999
LANSAT 5	TM	215/066	2,3 e 4	17/10/1999
LANSAT 5	TM	216/065	2,3 e 4	04/07/1999
LANSAT 5	TM	216/066	2,3 e 4	07/04/1999
LANSAT 5	TM	217/065	2,3 e 4	25/06/1999
LANSAT 5	TM	217/066	2,3 e 4	25/06/1999
LANSAT 5	TM	217/067	2,3 e 4	08/05/1999
LANSAT 5	TM	218/066	2,3 e 4	31/05/1999
LANSAT 5	TM	215/065	2,3 e 4	23/09/2008
LANSAT 5	TM	215/066	2,3 e 4	23/09/2008
LANSAT 5	TM	216/065	2,3 e 4	01/11/2008
LANSAT 5	TM	216/066	2,3 e 4	01/11/2008
LANSAT 5	TM	217/065	2,3 e 4	21/09/2008
LANSAT 5	TM	217/066	2,3 e 4	21/09/2008
LANSAT 5	TM	217/067	2,3 e 4	17/06/2008
LANSAT 5	TM	218/066	2,3 e 4	28/09/2008
LANDSAT 7	ETM+	216/066	2,3 e 4	30/09/1999
LANDSAT 7	ETM+	217/065	2, 3 e 4	25/10/2000
LANDSAT 7	ETM+	218/066	2, 3 e 4	01/11/2000
LANDSAT 7	ETM+	215/065	2, 3 e 4	12/11/2000
LANDSAT 7	ETM+	215/066	2, 3 e 4	12/11/2000
LANDSAT 7	ETM+	216/067	2, 3 e 4	07/02/2001
LANDSAT 7	ETM+	217/066	2, 3 e 4	10/09/2001

Para processamento digital das imagens foi utilizado o software SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (CÂMARA *et al*, 1996).

Para visualização e georreferenciamento das imagens foram utilizados os softwares SPRING 4.3.3 e o ENVI (*Environment Visualization of Images*) versão 4.4. Utilizou-se ainda o software ArcGIS da ESRI e suas extensões para geração do banco de dados digitais georreferenciados, *layers* (planos de informações) e elaboração dos mapas (*layouts*). Este software possui ferramentas de armazenamento, recuperação e manipulação de dados digitais.

Utilizando-se o software ArcGIS versão 9.3 e com as imagens de satélite, mapas, dados e informações levantadas foram criados *layers* para compor o SIG desta pesquisa.

Foram utilizados pontos obtidos através de tecnologia GPS (*Global Positioning System*) levantados no trabalho de campo para caracterização dos solos e da vegetação realizado por Galindo (2007). Estes pontos foram utilizados para análise espacial, visando correlacionar as informações extraídas das imagens com as características dos solos classificados em campo.

Utilizou-se o ZAPE (Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco) versão 2001, desenvolvido pela EMBRAPA. Este banco de dados digital foi importante para o desenvolvimento desta tese, pois o mesmo contempla informações sobre solos, clima, recursos hídricos, sócio-economia, potencial de terras para irrigação e aptidão pedoclimática por cultura do Estado de Pernambuco. Estas informações se apresentam de forma integrada. Do ZAPE utilizou-se principalmente o mapa de solos de Pernambuco para ser confrontado com as informações extraídas das imagens de satélites.

Foram utilizados dados de pluviometria dos últimos 20 anos fornecidos pelo CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) do INPE e pelo LAMEPE (Laboratório de Meteorologia de Pernambuco) pertencente ao ITEP (Instituto Tecnológico de Pernambuco). Estes dados foram utilizados para associar as condições climáticas das épocas de aquisição das imagens e suas respectivas respostas espectrais, ou seja, a influência do clima no comportamento espectral dos recursos hídricos, do solo e cobertura vegetal.

3.3 Metodologia

A metodologia desenvolvida pode ser visualizada no Fluxograma a seguir:

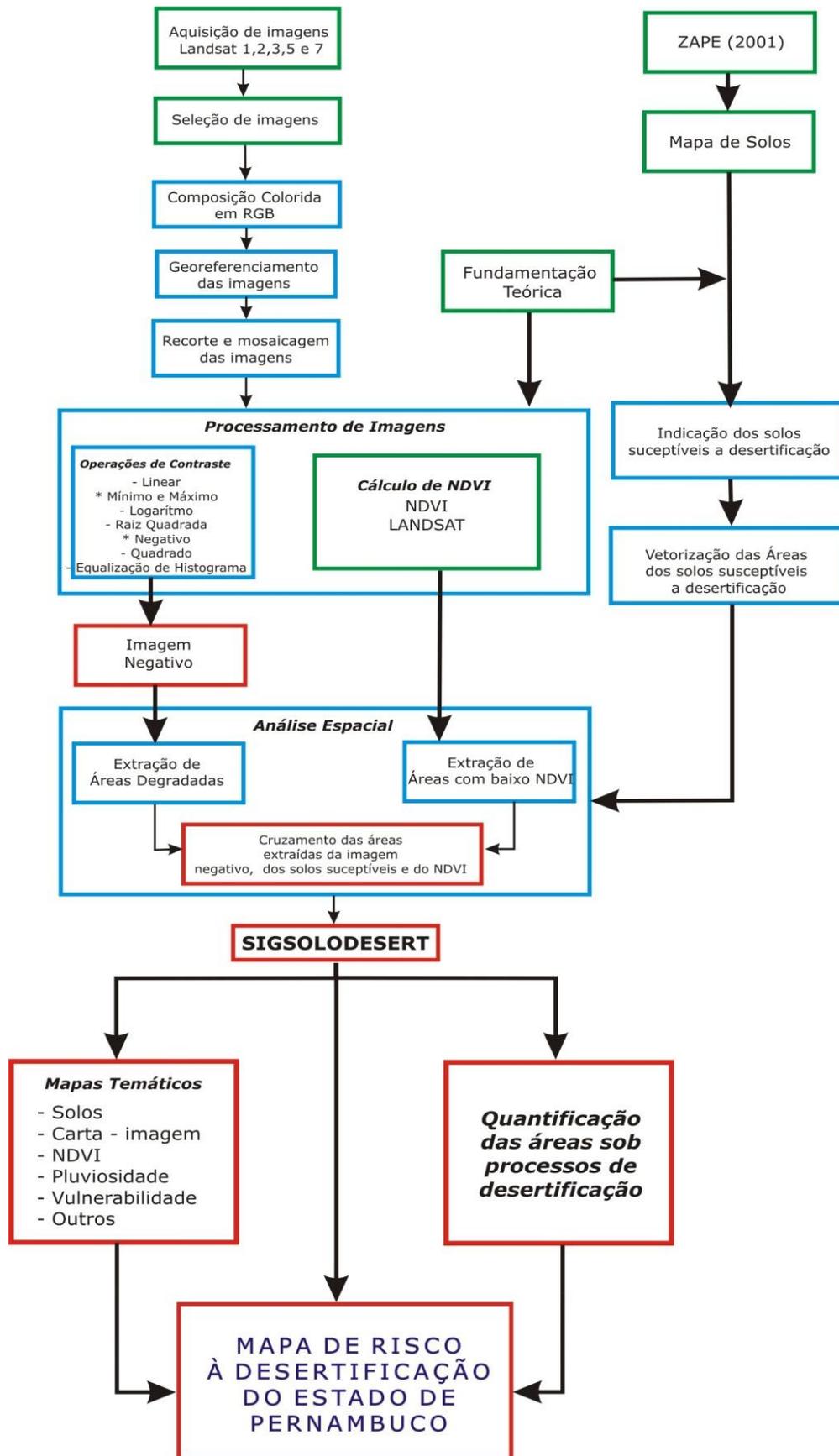


Figura 3.5. Fluxograma da metodologia para geração do mapa de risco de desertificação do semi-árido de Pernambuco.

3.3.1. Aquisição e seleção das imagens LANDSAT

A aquisição de imagens dos sensores MSS (LANDSAT 1, 2 e 3), TM (LANDSAT 5) e ETM⁺(LANDSAT 7) para compor uma série histórica no período de 1973 a 2008 foi realizada de forma criteriosa.

Do Levantamento de imagens existentes foi realizada uma seleção que atendesse os critérios de:

- (a) Menor cobertura de nuvens;
- (b) Data de aquisição da imagem (preferencialmente no período chuvoso);
- (c) Qualidade do pré-processamento (onde os pixels não foram “estourados”.

Ou seja, não foi aplicado excesso de contraste radiométrico;

(d) Compatibilidade das resoluções espectrais dos diferentes sensores utilizados. Ou seja, as faixas espectrais são semelhantes nos diferentes sensores;

(d) Compatibilidade das resoluções radiométricas. Neste estudo foram consideradas as resoluções de 8 e 10 bits.

3.3.2. Composição colorida

A utilização de composições coloridas é fundamentada pelo fato de que o olho humano é capaz de discriminar mais facilmente matiz de cores do que tons de cinza. Para cada banda, associa-se uma cor primária (vermelha, verde e azul), de modo que para cada alvo diferente da cena se associa uma cor ou uma combinação de cores diferentes. A imagem resultante é costumeiramente denominada imagem colorida RGB (*Red, Green e Blue*).

Após a seleção das imagens LANDSAT foram feitas composições coloridas. Nestas composições em RGB procurou-se utilizar as bandas dos sensores MSS, TM e ETM⁺ que estão nas mesmas faixas do Espectro Eletromagnético. As bandas espectrais que melhor atendem a esse critério são as bandas 4, 5 e 7 do sensor MSS e bandas 2, 3 e 4 dos sensores TM e ETM⁺.

Nas composições coloridas, a associação das bandas espectrais 2, 3 e 4 com os canais RGB não foi feita de acordo com as cores naturais, mas foi em função da melhor discriminação dos alvos nas imagens, por isso a composição colorida é dita falsa cor. O motivo de escolha destas bandas para a composição colorida em RGB falsa cor, se prende ao fato de que nela os matizes de cores relacionados à

vegetação apresentam-se mais perceptíveis ao intérprete, uma vez que a cor vermelha é atribuída à banda 4 (região espectral do infravermelho próximo) onde é muito mais evidente a resposta espectral pela vegetação, e assim o fotointérprete faz uma associação direta dos matizes do vermelho com áreas providas de diferentes densidades de cobertura vegetal. Os matizes do amarelo, resultado da resposta refletida pelo solo arenoso em porcentagem maior na banda 3 (região espectral do vermelho), identificam áreas com exposição de solo, ou rocha, com reduzida cobertura vegetal. Os matizes do azul e a cor preto se relacionam à água e seu relativo conteúdo de sedimentos em suspensão.

A Figura 3.6 apresenta composições coloridas em RGB falsa cor do município de Floresta, em diferentes datas (outubro 1987 e setembro 1999). Com o objetivo de destacar a cobertura vegetal, o solo e os cursos d'água, associou-se a banda 4 ao canal R (*Red*), a banda 3 ao canal G (*Green*) e a banda 2 ao canal B (*Blue*). As composições estão sem correção radiométrica.



Figura 3.6. Composição colorida em R4G3B2 – Imagens do sensor TM/LANDSAT 5 de outubro de 1987 e do sensor ETM⁺/LANDSAT 7 de setembro de 1999 respectivamente sem correção radiométrica.

A Figura 3.7 apresenta as composições coloridas em 4(R) 3(G) 2(B). Nelas foi aplicada uma correção radiométrica nas bandas espectrais. Para isso utilizou-se da operação de contraste Mínimo e Máximo do SPRING 4.3.3. Ou seja, aplicou-se nos valores máximo e mínimo do histograma nos canais R, G e B, separadamente. Observam-se as diferentes tonalidades de cores nas composições.

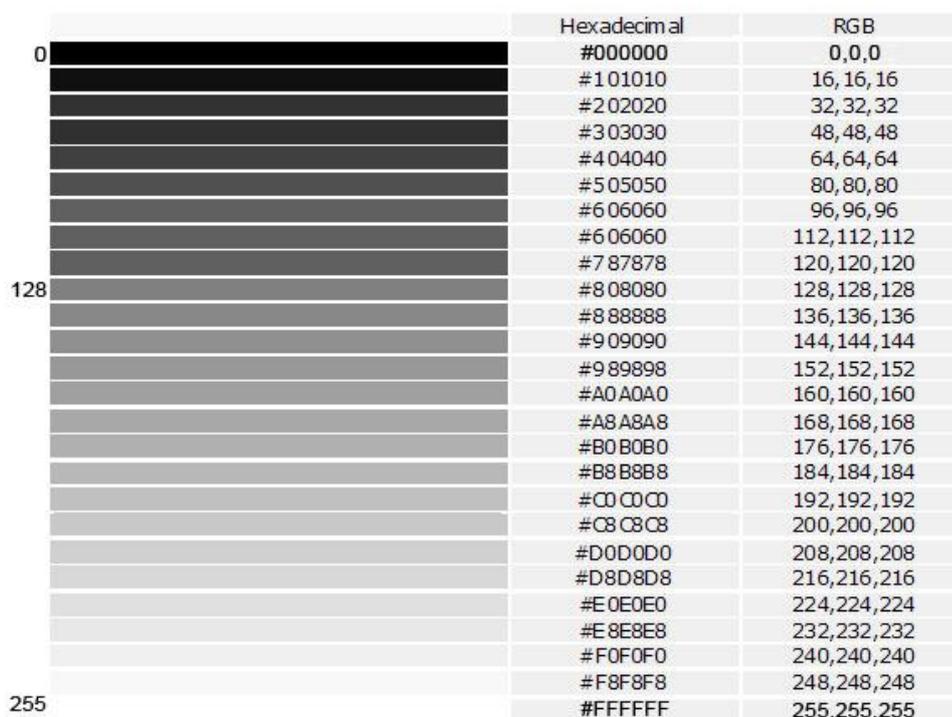


Figura 3.7. Composição colorida em R4G3B2 – Imagens do sensor TM/LANDSAT 5 de outubro de 1987 e do sensor ETM⁺/LANDSAT 7 de setembro de 1999 respectivamente com correção radiométrica.

Leitura de pixels

Os pixels das bandas espectrais que geraram as composições coloridas foram analisados em função da posição espacial e de intensidade radiométrica (níveis de cinza). A análise do nível de cinza do pixel de uma banda é útil para trabalhos que envolvam estudos do comportamento espectral dos alvos, nas várias bandas dos satélites de sensoriamento remoto. O SPRING apresenta os níveis digitais dos pixels da(s) banda(s) visualizada(s) através da função leitura de pixels.

Esta função do SPRING 4.3.3 permite saber qual o valor do nível de cinza de um determinado pixel e seus vizinhos. Esta função não produz, nem permite nenhuma alteração na imagem original da composição colorida. A escala de níveis de cinza (Figura 3.8) foi utilizada para definir os intervalos espectrais de classificação das áreas degradadas.



	Hexadecimal	RGB
0	#000000	0,0,0
	#101010	16,16,16
	#202020	32,32,32
	#303030	48,48,48
	#404040	64,64,64
	#505050	80,80,80
	#606060	96,96,96
	#606060	112,112,112
	#787878	120,120,120
128	#808080	128,128,128
	#888888	136,136,136
	#909090	144,144,144
	#989898	152,152,152
	#A0A0A0	160,160,160
	#A8A8A8	168,168,168
	#B0B0B0	176,176,176
	#B8B8B8	184,184,184
	#C0C0C0	192,192,192
	#C8C8C8	200,200,200
	#D0D0D0	208,208,208
	#D8D8D8	216,216,216
	#E0E0E0	224,224,224
	#E8E8E8	232,232,232
	#F0F0F0	240,240,240
	#F8F8F8	248,248,248
255	#FFFFFF	255,255,255

Figura 3.8. Escala de níveis de cinza com os valores em RGB.

Mais adiante são apresentados valores, em um exemplo, correspondentes aos pixels presentes em uma imagem original, independente da escala de visualização da imagem na tela.

3.3.3. Georreferenciamento e mosaicagem das imagens

As imagens selecionadas dos satélites LANDSAT 5 e 7, sensores TM e ETM+7 respectivamente, bandas 2, 3 e 4 foram adquiridas georreferenciadas através do ESDI (*Earth Science Data Interface*) da *Global Land Cover Facility*.

Estas imagens foram importadas para o SPRING 4.3.3 e inseridas em um banco de dados. No georreferenciamento, o sistema de projeção cartográfica é UTM e Datum SAD69. Este procedimento foi realizado no módulo de registro de imagens do SPRING.

Considerando que foram utilizadas imagens de diferentes épocas onde as respostas espectrais são influenciadas principalmente pelas condições climáticas, a mosaicagem das imagens LANDSAT foi realizada de tal forma que as diferenças de radiometrias fossem minimizadas.

3.3.4. Operações de contraste de imagem

O contraste entre dois objetos pode ser definido como a razão entre os seus níveis de cinza médios. A manipulação do contraste consiste numa transferência radiométrica em cada "pixel", com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem. Realiza-se a operação ponto a ponto, independentemente da vizinhança. Esta transferência radiométrica é realizada com ajuda de histogramas das imagens (SPRING, 1996).

No software SPRING existem 08 operações de contraste de imagem: Mínimo/Máximo, Linear, Raiz Quadrada, Quadrado, Logaritmo, Negativo, Equalização de Histograma, Fatiamento e Edição.

Após aplicações dessas operações nas composições coloridas, selecionou-se a operação de Mínimo/Máximo no pré-processamento das imagens, como exemplificado na Figura 3.7 e a operação NEGATIVO para proceder a análise espacial. A operação Linear é a operação padrão do programa, ela é aplicada por igual em todo o histograma da imagem.

Operação Linear

O aumento de contraste por uma transformação linear é a forma mais simples das opções. A função de transferência é uma reta e apenas dois parâmetros são controlados: a inclinação da reta e o ponto de intersecção com o eixo X (Figura 3.8). A inclinação controla a quantidade de aumento de contraste e o ponto de intersecção com o eixo X controla a intensidade média da imagem final. A função de mapeamento linear pode ser representada por:

$$Y = AX + B \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde,

Y = novo valor de nível de cinza;

X = valor original de nível de cinza;

A = inclinação da reta (tangente do ângulo);

B = fator de incremento, definido pelos limites mínimo e máximo fornecidos pelo usuário.

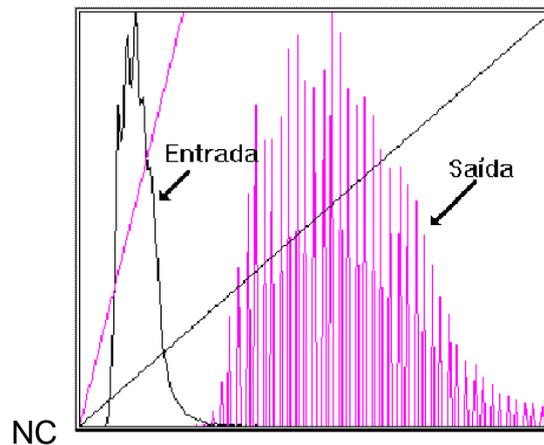


Figura 3.9: Histograma Linear
Fonte: SPRING (1996).

No aumento linear de contraste as barras que formam o histograma da imagem de saída são espaçadas igualmente, uma vez que a função de transferência é uma reta. Como podemos observar na Figura acima, o histograma de saída será idêntico, em formato, ao histograma de entrada, exceto que ele terá um valor médio e um espalhamento diferentes.

Operação Máximo e Mínimo

A manipulação dos histogramas das imagens através da operação Mínimo e Máximo é idêntica a manipulação de uma curva linear como apresentado anteriormente. A diferença está no momento em que é feita a escolha dos nc (níveis de cinza) que serão manipulados.

Observa-se na Figura 3.10, assim que são indicadas as posições de nc do histograma, o Programa calcula o valor de nível de cinza mínimo e máximo que é ocupado pela imagem original. De posse desses valores é aplicada uma transformação linear onde a base da reta é posicionada no valor mínimo e o topo da reta no valor máximo. Desse modo não haverá perda de informação por “*overflow*”, isto é, todos os níveis de cinza continuarão com o mesmo número de pixels.

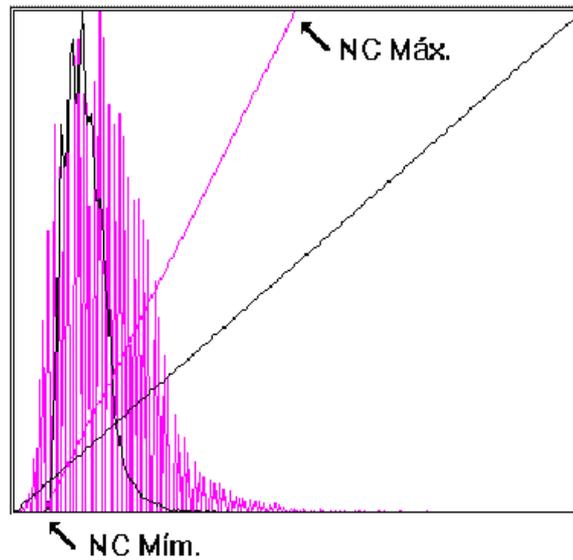


Figura 3.10. Histograma Máximo/Mínimo
Fonte: SPRING (1996).

Operação Negativo

É uma função de mapeamento linear inversa, ou seja, o contraste ocorre de modo que as áreas escuras (baixos valores de nível de cinza) tornam-se claras (altos valores de nível de cinza) e vice-versa. A Figura 3.11 mostra sua representação. Nesta operação de contraste também pode ocorrer um “*overflow*”.

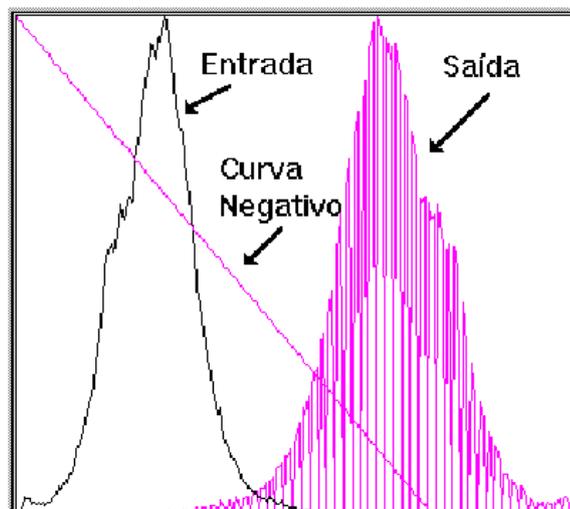


Figura 3.11. Histograma Negativo
Fonte: SPRING (1996).

A função de mapeamento NEGATIVO pode ser representada por:

$$Y = - (AX + B) \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde,

Y = novo valor de nível de cinza

X = valor original de nível de cinza

A = inclinação da reta (tangente do ângulo)

B = fator de incremento, definido pelos limites mínimo e máximo fornecidos pelo usuário.

Na Figura 3.12 tem-se uma imagem NEGATIVO obtida a partir de uma composição colorida falsa cor em RGB 432. As imagens são do sensor CCD/CBERS 2B adquiridas em 20 de julho de 2006. As imagens foram corrigidas radiometricamente e sobre cada banda espectral foi aplicada separadamente a operação NEGATIVO. Este procedimento foi realizado através do SPRING 4.3.3. Na Figura as feições tons escuros e avermelhados (baixos níveis de cinza) correspondem às áreas com maior albedo. As feições em tons claros e esverdeados correspondem às áreas com menor albedo.

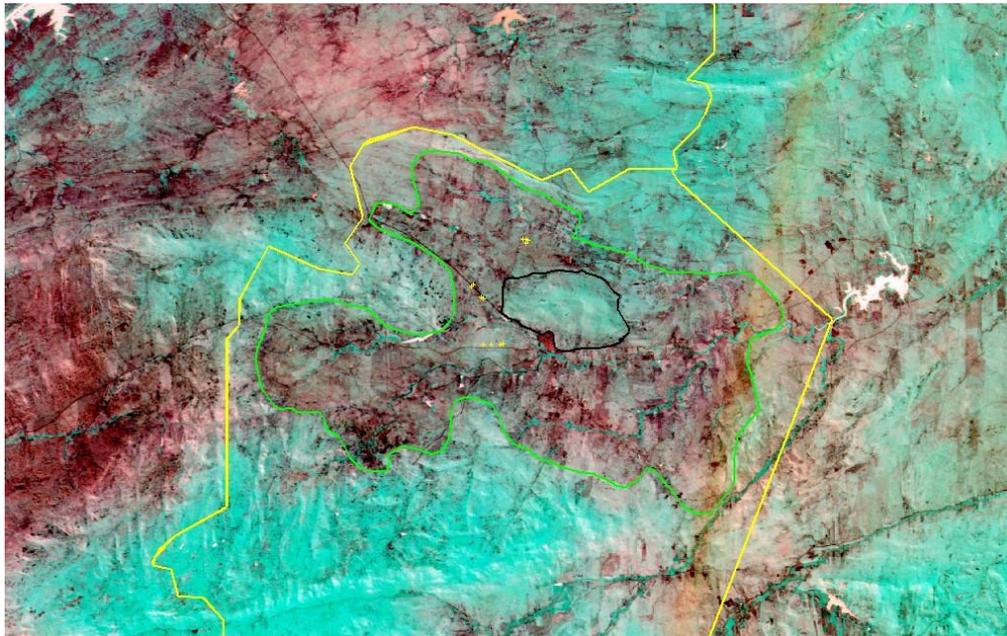


Figura 3.12. Imagem NEGATIVO de parte do município de Jataúba-PE a partir das imagens CCD/CBERS 2B adquirida em 20 de julho de 2006.

3.3.5. Cálculo do NDVI

Para calcular o NDVI das imagens foram criados no SPRING 4.3.3 quatro planos de informação, sendo um pertencente à categoria “Numérico” com o nome de “Índices”, outro plano à categoria “Imagem” denominado “Imagens”, e mais dois pertencentes à categoria “Temático”, que foram chamados de “Fatiamento” e “Faixas_Espectrais”.

Ao plano de informações “Faixas_Espectrais” foram associadas classes temáticas, cada uma representada por uma cor distinta das outras a fim de representar intervalos na faixa espectral durante o processo de fatiamento.

A partir das composições coloridas em RGB corrigidas radiometricamente foi iniciado então o processo de cálculo do NDVI através da programação em LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) no software SPRING. A princípio criou-se uma rotina capaz de gerar uma grade com valores numéricos através da equação:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde,

NIR = banda espectral do infravermelho próximo

RED = banda espectral do vermelho

Foram geradas imagens em tons de cinza com valores de NDVI apresentados em escala linear variando entre -1 e 1. A Figura 3.13 apresenta a grade com valores numéricos de NDVI para o município de Floresta calculado a partir de imagens dos satélites LANDSAT 5 e 7, sensores TM e ETM+7 respectivamente, bandas 2, 3 e 4.

A fim de se obter os mapas temáticos, realizou-se um processo de fatiamento através da programação em LEGAL onde os valores numéricos de cada pixel foram relacionados a uma cor previamente definida para cada classe temática pertencente ao modelo de dados “Faixas_Espectrais”.

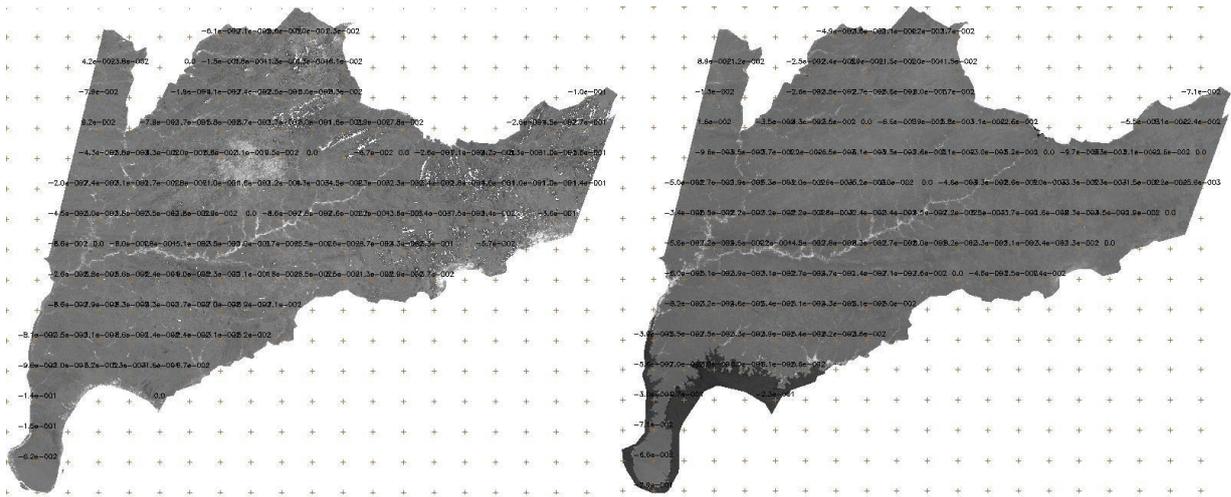


Figura 3.13. Grade de valores numéricos de NDVI para o município de Floresta-PE a partir das imagens TM/LANDSAT 5 (outubro 1987) e ETM+/LANDSAT 7 (setembro 1999).

Desta forma os valores de NDVI correspondentes a vegetação foram apresentados em tons de amarelo e verde, as áreas de rocha, solo descampado ou com algum tipo cobertura que não vegetação se apresentaram em tons de marrom, as nuvens na cor branca e os corpos d'água na cor azul.

A partir dos cálculos processados através da programação em LEGAL foram geradas imagens de NDVI das áreas piloto de estudo (municípios de Floresta e Jataúba). Assim, numa série histórica de imagens, pode-se indicar se há ou não indícios de que nestas áreas estejam ocorrendo processos prolongados de degradação e, deste modo, necessitando de observações mais detalhadas de campo para constatação de que essas áreas estão sob processos de desertificação.

A Figura 3.14 representa de forma temática o NDVI do município de Floresta para os meses de outubro de 1987 e setembro de 1999, respectivamente.

Em ambas as imagens os pixels com valores compreendidos entre -1 e -0.2 receberam a cor azul representando corpos d'água; já aqueles com valores compreendidos entre -0.2 e -0.1 receberam a cor branca representando nuvens.

Os pixels com valores entre -0.1 e +0.07 receberam tonalidades decrescentes de marrom, variando do mais escuro para o mais claro, representando áreas sem vegetação; para os pixels com valores entre +0.07 e +0.11 foram adotadas diferentes tonalidades da cor amarela representando áreas inférteis (vegetação verde muito esparsa), e/ou cobertura não sadia (sobre algum déficit hídrico).

Finalmente, os pixels com valores variando entre +0,11 e +1 receberam diferentes tons de verde que, dos mais claros para os mais escuros, representando valores crescentes de vegetação de forma que quanto mais próximo de +1 este valor, maior é a densidade da vegetação daquela área.

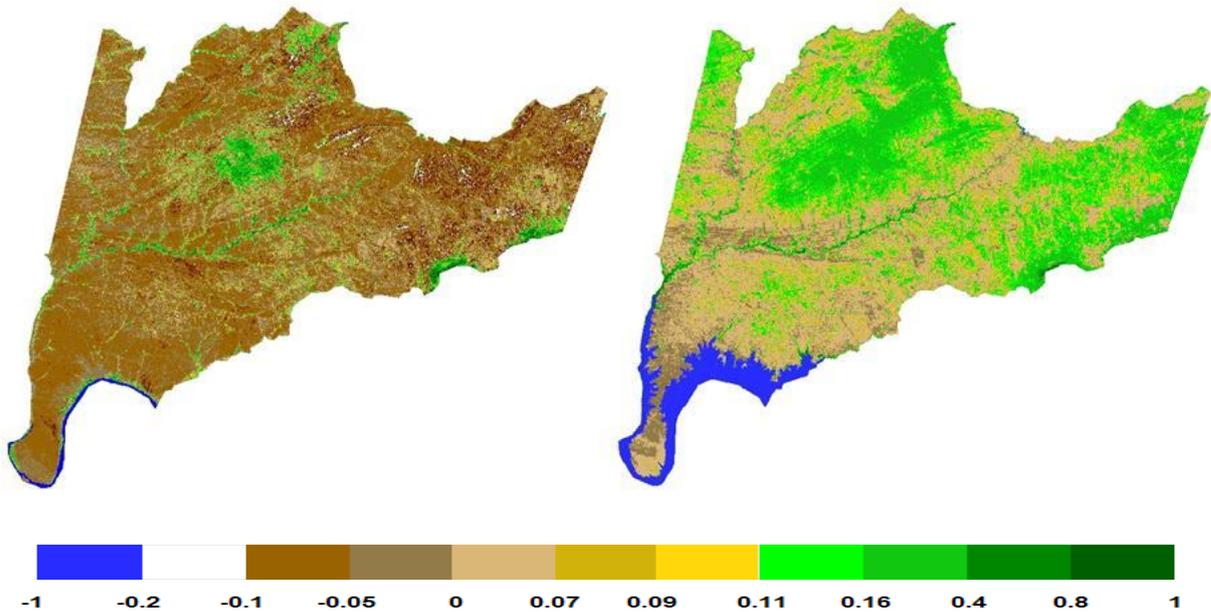


Figura 3.14. Imagem de NDVI do município de Floresta a partir das imagens TM/LANDSAT 5 (outubro 1987) e ETM⁺/LANDSAT 7 (setembro 1999).

3.3.6. Imagens NEGATIVO

Na operação NEGATIVO as áreas em tons claros (altos valores de nível de cinza) tornam-se em tons escuros (baixos valores de nível de cinza) e vice-versa. Ou seja, nesta imagem as áreas escuras correspondem às áreas de altos valores de albedo.

Foram geradas imagens NEGATIVO, a partir das imagens LANDSAT para os municípios de Floresta, Jataúba e o sertão de Pernambuco em diferentes datas. Na Figura 3.15 tem-se a imagem NEGATIVO da parte norte do município de Jataúba. A operação foi aplicada nas imagens ETM⁺/LANDSAT, composição 432 em RGB, adquirida em 12 de novembro de 2001.

Devido a variação e intensidade da cobertura de nuvens no estado de Pernambuco, não foi possível dispor de imagens com boa qualidade visual em épocas semelhantes para cada ano. O ideal é adquirir imagens das épocas chuvosa

e seca, preferencialmente no mesmo mês para cada ano do período de estudo (1975 a 2008).

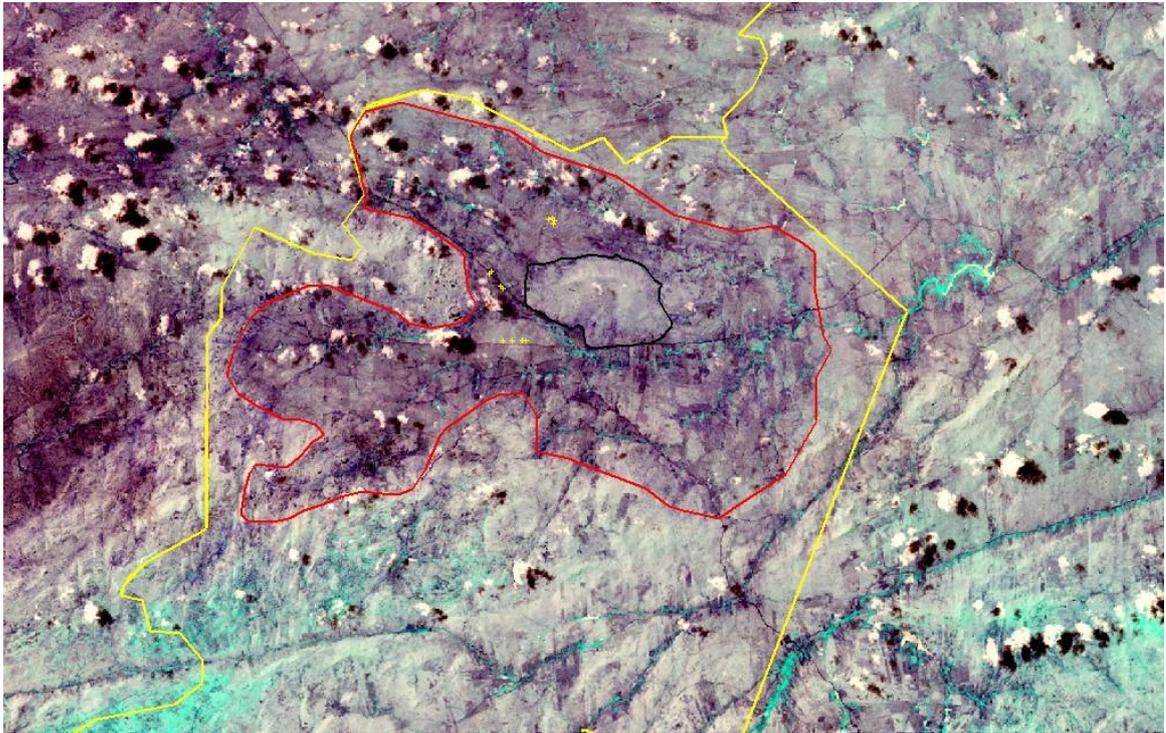


Figura 3.15. imagem NEGATIVO da parte norte do município de Jataúba a partir de imagens ETM+/LANDSAT, composição 432 em RGB (12 de novembro de 2001).

3.3.7. Análise espacial das áreas extraídas da imagem NEGATIVO e NDVI

Após gerar as imagens NEGATIVO e as imagens NDVI, foi realizada a análise espacial, realizando a interpretação digital e visual. Esta análise consistiu de cruzar as informações obtidas e correlacioná-las. A análise espacial foi feita na forma digital e visual diretamente na tela do monitor, desenvolvendo o trabalho de análise e interpretação das informações temáticas por meio de edição vetorial, o que permitiu a construção dos diversos PI (Planos de Informações) inseridos no SIG. Para as áreas piloto foram geradas carta-imagem NEGATIVO com a indicação das áreas degradadas. Estas áreas foram plotadas nos mapas de solos dos municípios. Este procedimento foi aplicado para as imagens LANDSAT selecionadas.

3.3.8. Indicação e vetorização de áreas com solos susceptíveis à desertificação

A digitalização das áreas indicadas sob processos de desertificação foi em função de elementos de interpretação e análise espacial da imagem NEGATIVO. A forma de feições na imagem, a textura (arranjo e frequência de variações tonais) da imagem e a reflectância espectral do solo.

Na imagem NEGATIVO as áreas claras (altos valores de nível de cinza) tornam-se escuras (baixos valores de nível de cinza) e vice-versa. Ou seja, nesta imagem as áreas escuras correspondem às áreas de altos valores de albedo. A digitalização dessas áreas foi feita para diferentes datas de aquisição de imagens de satélites. A escala de vetorização foi aproximadamente 1: 250.000.

Na Figura 3.15 mostrada anteriormente, tem-se um exemplo de vetorização. Pode-se observar o limite do município de Jataúba vetorizado na cor amarela, o limite das áreas degradadas vetorizado na cor vermelha e o limite da Serra, logo acima da sede do município, na cor preto.

3.3.9. Vulnerabilidade das unidades de mapeamento dos solos

De acordo com o mapeamento de solos realizado pela EMBRAPA (ZAPE, 2001) nos municípios estudados, foram classificadas as unidades de solos em relação a vulnerabilidade à erosão.

Com base nas unidades de mapeamento da EMBRAPA e considerando as características/atributos dos solos na área de estudo, apresenta-se a seguir o mapa de vulnerabilidade dos solos do semi-árido de Pernambuco. Levou-se em consideração principalmente os atributos dos solos que são afetados pela degradação, o relevo, o risco à erosão e a presença de solos suscetíveis a desertificação na unidade.

3.3.10. Geração do SIGSOLODESERT

A partir dos dados adquiridos (imagens de satélites, mapas, coordenadas de pontos amostrais de solos, atributos de solos, pluviosidade) e das informações geradas (imagens NEGATIVO, NDVI, áreas vetorizadas) foi possível a construção do **SIGSOLODESERT** (Sistema de Informações Geográficas SOLODESERT). Este

SIG foi construído sobre uma base cartográfica de tal forma que todas as informações espaciais e não espaciais tenham uma mesma georreferência.

O SIG foi construído na plataforma do software ArcGIS versão 9.3 (ESRI, 2008). No projeto construído no SIGSOLODESERT foi possível manipular todas as informações associadas a ele. Para isso os PI (Planos de Informações) gerados foram hierarquizados dentro do Projeto. O SIG possui ferramentas digitais que permitiram armazenar, eliminar, recuperar, cruzar, realizar operações aritméticas e realizar outras aplicações que contribuiram para gerar o mapa de risco.

Para o SIG foram importados as imagens, diretórios e *shapefiles* gerados no SPRING e no ENVI. Dessa forma foi possível montar um banco de dados robusto com todas as informações relacionadas ao objeto desta pesquisa.

3.3.11. Quantificação das áreas sob processos de desertificação

Através do SIGSOLODESERT foi possível quantificar as áreas dos solos sob processos de desertificação no semi-árido de Pernambuco. Considerando que as informações estão georreferenciadas, o cálculo da extensão territorial das áreas foi feito através da ferramenta de análise espacial (*Spatial Analyst*) do ArcGIS 9.3.

3.3.12. Mapas Temáticos

No SIGSOLODESERT foram elaborados *layouts* (mapas) para vários temas como Solos, NDVI, Pluviosidade, imagens de satélites, áreas degradadas, solos suscetíveis, imagem NEGATIVO e outros, culminando com o mapa de risco de desertificação.

Os mapas temáticos apresentam de forma cartográfica os resultados obtidos nesta Pesquisa sobre processos de desertificação no estado de Pernambuco.

É importante ressaltar que o SIG permite a elaboração de outros mapas resultantes de cruzamentos de informações ou inserção de novos dados.

Outro aspecto importante na elaboração dos mapas temáticos é a escala utilizada. Os mapas foram plotados em papel no formato A3. Logo, a escala está adequada ao tamanho do papel, neste caso, escala de aproximada de 1: 1.000.000. Isto não impede que os mapas sejam plotados em outra escala desde que seja compatível com o nível de detalhe possível de observar no mapa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho tem como principal resultado o mapa de risco de desertificação do Estado de Pernambuco a partir de imagens de satélites. Este mapeamento visa subsidiar o desenvolvimento de uma política de controle da desertificação no Estado.

Mapeamentos da desertificação na região Nordeste têm sido elaborados nos últimos anos. A Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME (1993) fez o mapeamento da desertificação para o Estado do Ceará a partir da análise de imagens de satélites e considerou os índices de aridez dos municípios (Leite *et al.* 1994), sem levar em consideração os aspectos econômicos ou sociais. Em Pernambuco, Sá *et al* (2006) mapearam a desertificação na região de Cabrobó por meio de interpretação visual e automática de imagens do sensor ETM⁺ do satélite LANDSAT. Estes autores mensuraram uma área de aproximadamente 1.000 Km² com grau severo de desertificação.

Sampaio (2002) fez uma revisão sobre grupos de trabalhos e suas propostas de mensuração da desertificação no Brasil. Ele destacou as propostas de Ferreira *et al* (1994) e Rodrigues *et al* (1995) adotadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), como uma das medidas oficiais da desertificação no Brasil. Com base nessa revisão e nos trabalhos de Sá *et al* (1994) e de Torrico (1994) foi elaborado o mapa de desertificação quantificando as áreas em muito grave, grave e moderado.

Analisando os mapeamentos citados acima, verifica-se que estes se basearam em imagens de satélites, dados de campo e indicadores dos processos de desertificação. Entretanto, não se destacou a importância do tipo de solos e a vulnerabilidade destes em função de suas características pedogenéticas e espectrais na susceptibilidade aos processos de degradação.

Assim sendo, entende-se que a melhor maneira de mensurar áreas sob processos de desertificação é definir inicialmente a escala e os critérios de mensuração para os processos de desertificação da região estudada.

Considerando a extensão territorial de Pernambuco e tamanho de papel, neste trabalho optou-se em mapear o semi-árido utilizando escalas que variaram de 1: 3.500.000 a 1: 1000.000, desde que não compromettesse os critérios de mensuração adotados a partir da interpretação visual e automática dos parâmetros espaciais relacionados às características/atributos dos solos suscetíveis que contribuem para o fenômeno da desertificação. Considerando o tamanho de papel

no formato A3, as cartas temáticas das áreas piloto foram elaboradas na escala de 1: 350.000 a 1: 200.000 .

Outro resultado significativo é o SIGSOLODESERT, um Sistema de Informações Geográficas sobre solos suscetíveis à desertificação no semi-árido de Pernambuco. O Sistema é constituído por todos os dados e informações levantados e gerados nesta pesquisa.

A partir desses resultados tem-se a quantificação da distribuição espacial das áreas que mais apresentam suscetibilidade à degradação na região semi-árida de Pernambuco.

Nos itens a seguir são apresentadas figuras correspondentes às cartas e mapas elaborados neste trabalho de Tese. Em anexo estão cartas e mapas em formato A3. Os produtos elaborados neste trabalho estão de acordo com as convenções de representação cartográfica. Os mapas temáticos apresentam legenda com as convenções utilizadas para os principais temas contidos nos respectivos mapas, a escala gráfica, mapa de localização, a projeção cartográfica e orientação magnética da carta e/ou mapa. Em cada mapa estão indicados título do mapa, a escala numérica, datas e as informações sobre a base temática e/ou base cartográfica utilizadas na elaboração.

4.1. Áreas suscetíveis à desertificação nas áreas piloto

Inicialmente foram gerados cartas e mapas que representam os resultados obtidos da aplicação da metodologia nas áreas piloto consideradas (Floresta e Jataúba).

4.1.1. Cartas-imagem NEGATIVO do município de Floresta

Para o município de Floresta foi realizada a extração e delimitação das áreas degradadas nas imagens NEGATIVO geradas a partir das imagens dos satélites LANDSAT adquiridas nos anos de 1976, 1987 e 1999 resultando num intervalo de tempo médio de 11,5 anos entre as aquisições.

A Figura 4.1a representa a carta-imagem NEGATIVO/LANDSAT do município de Floresta com indicação de áreas sob processos de degradação extraídas de

imagens MSS/LANDSAT 2 adquiridas em 05 de novembro de 1976. Na operação de contraste NEGATIVO as áreas claras (altos valores de nível de cinza) tornam-se escuras (baixos valores de nível de cinza) e vice-versa. Ou seja, na imagem NEGATIVO as áreas escuras correspondem às áreas de elevado albedo na imagem original (composição colorida falsa cor 754 em RGB, sensor MSS/LANDSAT 2).

A digitalização das áreas consideradas em processo de desertificação (polígonos na cor amarela) foi feita em função de elementos de interpretação e análise espacial na imagem NEGATIVO, como a forma de feições na imagem, a textura (arranjo e frequência de variações tonais) e a reflectância espectral do solo.

Na Figura 4.1b apresenta-se a carta imagem NEGATIVO do município de Floresta com indicação de áreas degradadas a partir de imagens ETM⁺/LANDSAT 7 adquiridas em 30 de setembro de 1999.

Na imagem NEGATIVO pode-se observar que as áreas delimitadas como áreas degradadas (polígonos na cor amarela) apresentam variações tonais escuras e textura de imagem lisa. Logo, correspondem as áreas de altos valores de níveis de cinza na imagem original (composição colorida falsa cor 432 em RGB, sensor ETM⁺/LANDSAT 7). Essas áreas estão associadas à redução da cobertura vegetal, ou solo exposto, ou então déficit hídrico. O albedo foi alto em áreas ocupadas principalmente por Luvissolos e Planossolos.

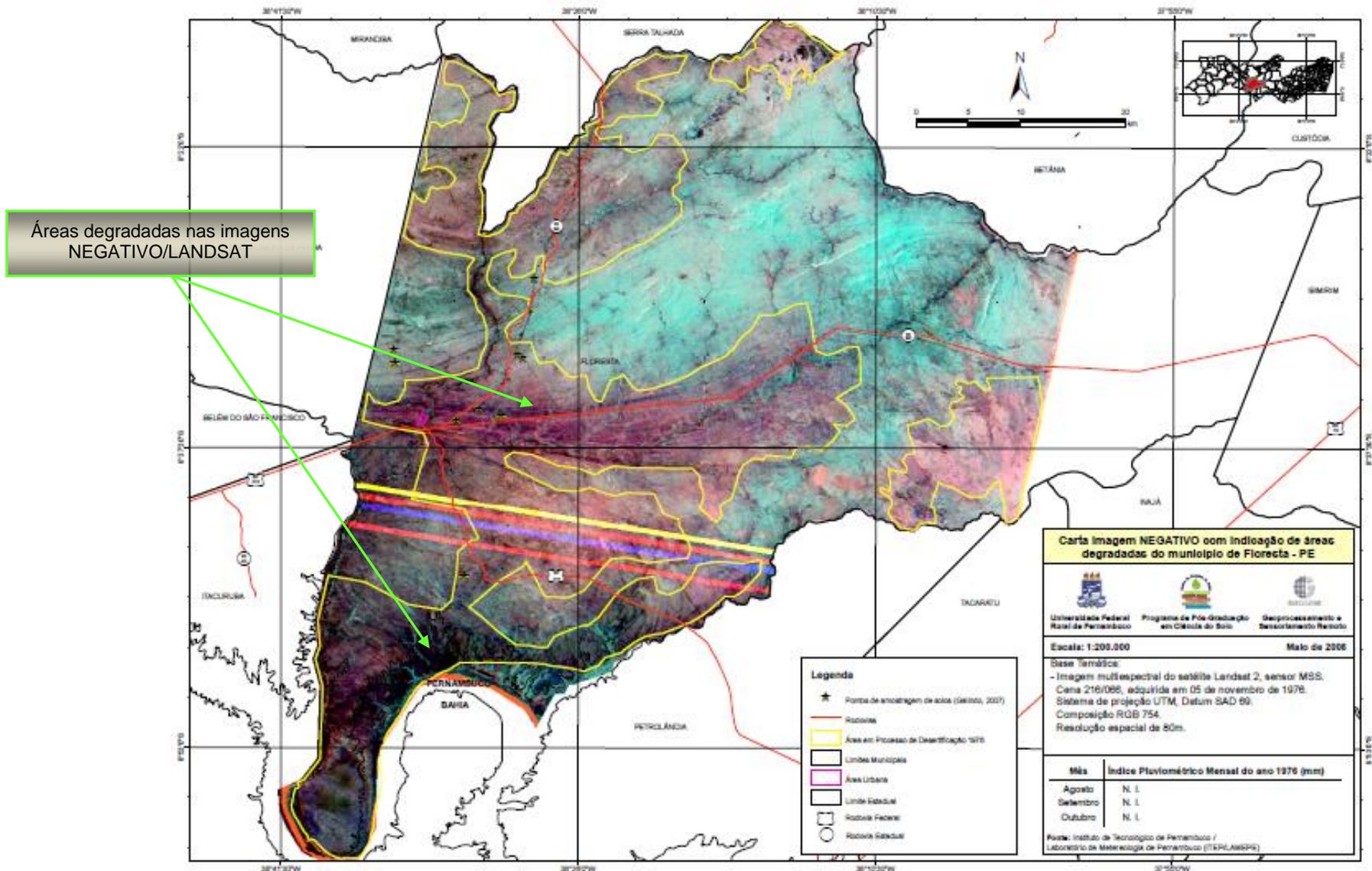


Figura 4.1a. Carta imagem NEGATIVO do município de Floresta com indicação de áreas degradadas, a partir de imagens do sensor MSS/LANDSAT 2 adquiridas em 05 de novembro de 1976.

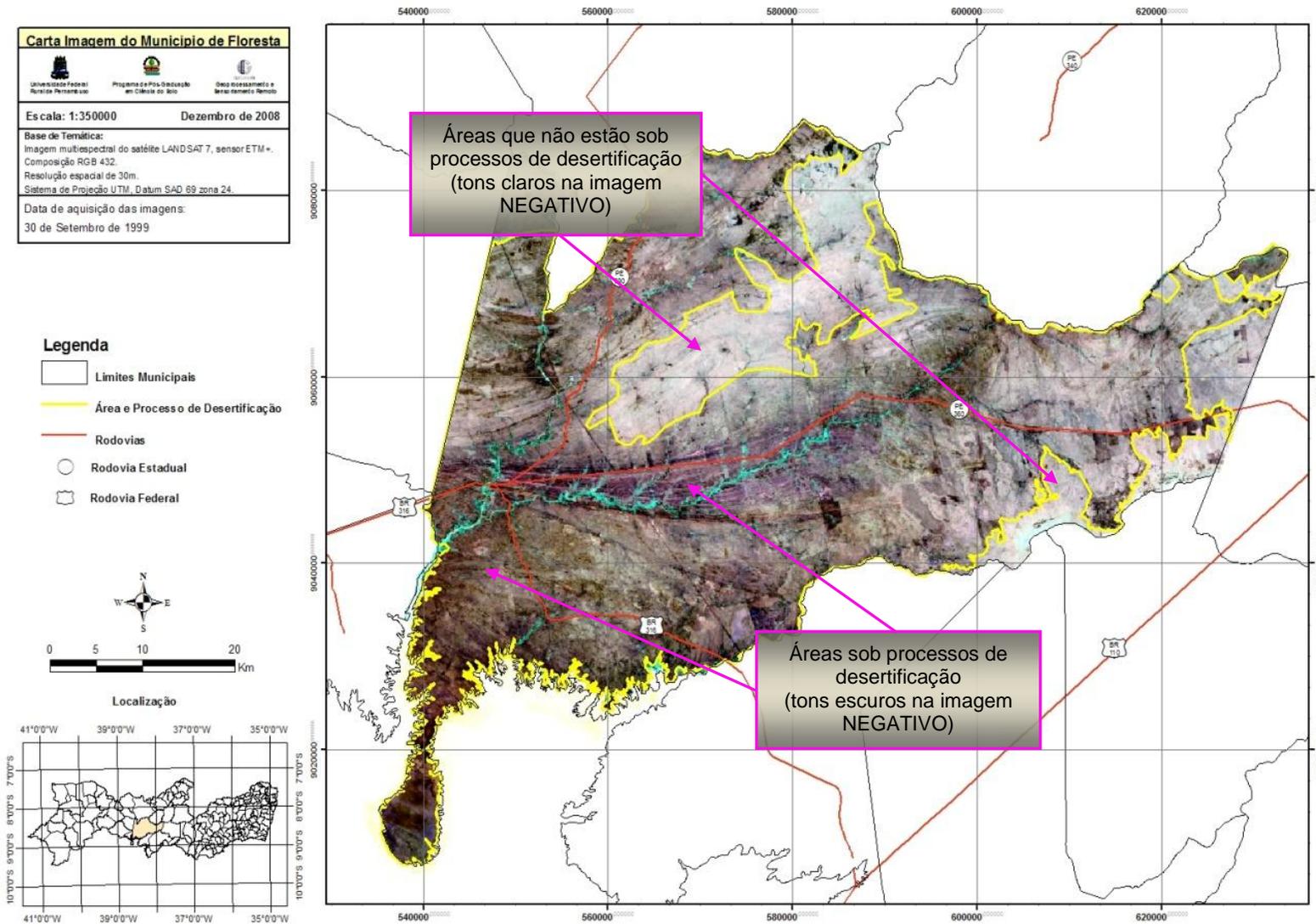


Figura 4.1b. Carta imagem NEGATIVO do município de Floresta com indicação de áreas degradadas, a partir de imagens do sensor ETM+/LANDSAT 7 adquiridas em 30 de setembro de 1999.

4.1.2. Cartas-Imagem NEGATIVO do município de Jataúba

Para o município de Jataúba foi realizada a extração e delimitação das áreas degradadas nas imagens NEGATIVO geradas a partir de imagens LANDSAT adquiridas nos anos de 1975, 1990 e 2000, com um intervalo de tempo de 15 e 10 anos, respectivamente, entre as aquisições.

A Figura 4.2a apresenta a carta-imagem NEGATIVO do município de Jataúba com indicação de áreas sob processo de desertificação extraídas de imagens MSS/LANDSAT 2 adquiridas em 12 de novembro de 1975.

A Figura 4.2b apresenta a carta-imagem NEGATIVO do município de Jataúba com indicação de áreas sob processo de desertificação extraídas de imagens ETM⁺/LANDSAT 7 adquiridas em 12 de novembro de 2000.

Na carta-imagem NEGATIVO/LANDSAT de Jataúba, observa-se que as áreas delimitadas como áreas suscetíveis à desertificação apresentam tons mais escuros do que no município de Floresta. Isto se deve principalmente ao tipo de solo e à menor precipitação pluviométrica do período da aquisição da imagem de satélite, o que contribuiu para baixos valores de níveis de cinza na imagem NEGATIVO, ou seja, elevado albedo na imagem original (composição colorida falsa cor 432 em RGB sensor ETM⁺/LANDSAT 7). A serra logo acima da sede do município apresenta tons claros de níveis de cinza, o que corresponde a uma área de menor albedo na imagem original. Isto se deve a umidade presente na cobertura vegetal mais preservada da serra.

Ao analisar a imagem NEGATIVO do ano de 2000 para o município de Jataúba, observa-se que a expansão da degradação não ocorre na direção sul devido ao relevo de elevada altitude daquela região. Nota-se que na direção norte, por ser uma região com relevo mais plano a suavemente ondulado, a expansão da degradação ocorre de forma acentuada e em direção à Região do Cariri do Estado da Paraíba, mais seca e em processo de desertificação.

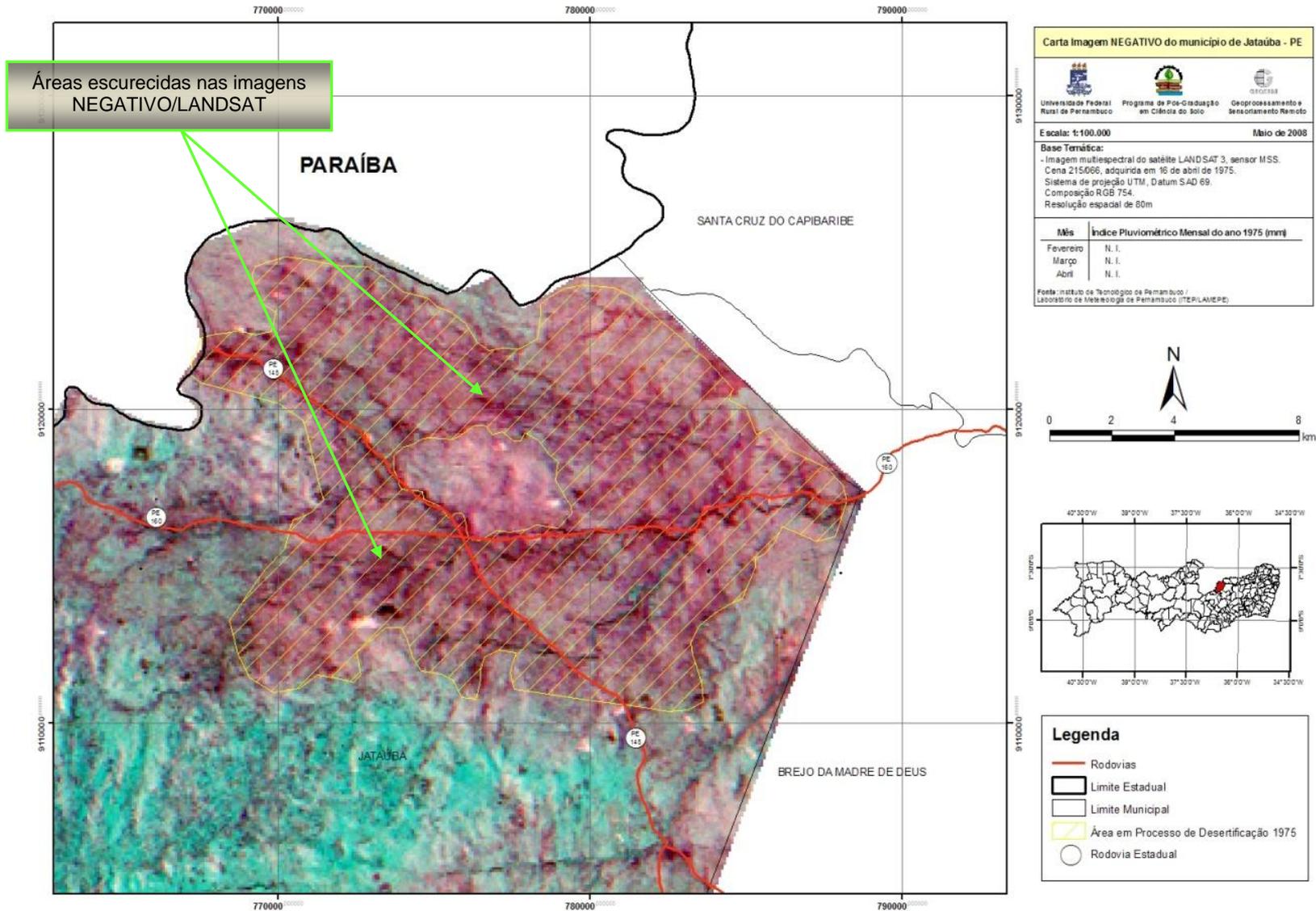


Figura 4.2a. Carta imagem NEGATIVO do município de Jataúba com indicação de áreas degradadas a partir de imagens do sensor MSS/LANDSAT 2, adquiridas em 12 de novembro de 1975.

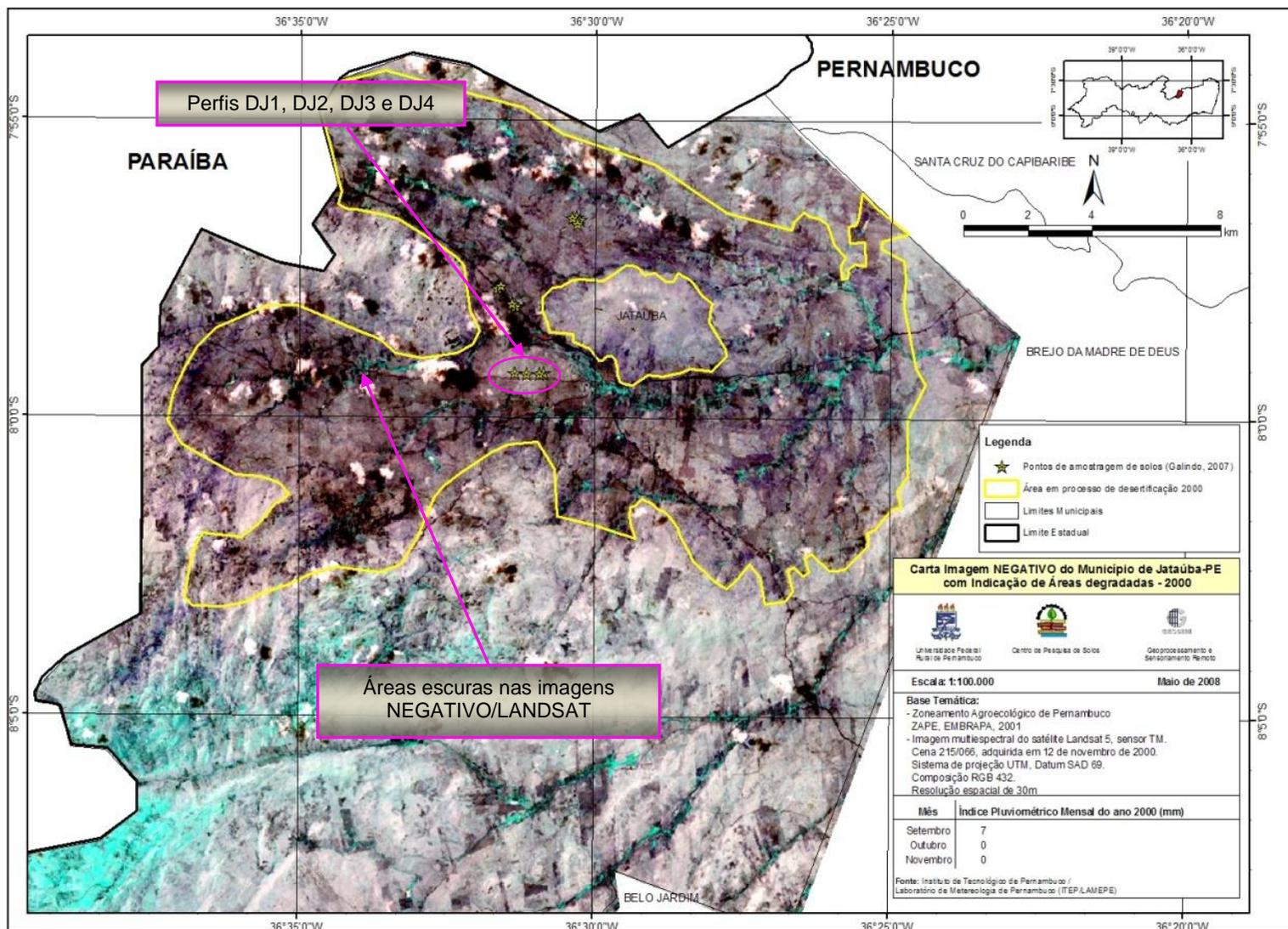


Figura 4.2b. Carta imagem NEGATIVO com indicação de áreas degradadas do município de Jataúba, sensor ETM⁺/LANDSAT 7, adquiridas em 12 de novembro de 2000. Pontos na cor amarela são os perfis de solos descritos por Galindo (2007).

4.1.3. Cartas de solos do município de Floresta com indicação de áreas degradadas

Na Figura 4.3a é apresentado a carta de solos do município de Floresta com indicação de áreas sob processo de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/TM/LANDSAT 5 adquiridas em 23 de outubro de 1987. Este mapa foi gerado a partir do mapa de solos elaborado pela EMBRAPA Solos (2001).

As áreas vetorizadas e hachuradas na cor vermelha são áreas delimitadas como áreas suscetíveis à desertificação. Observa-se que essas áreas correspondem, também, às áreas ocupadas por Luvisolos e Planossolos e uma pequena parte por Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos.

De acordo com este mapa de solos, os perfis de solos coletados e descritos por Galindo (2007) estão em áreas ocupadas por Luvisolos. Os perfis descritos DF1, DF2, DF3 e DF4 localizam-se em ambientes degradados (Figura 4.3b). Estes ambientes estão dentro das áreas extraídas do mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT.

Nas análises físicas e químicas, os perfis apresentaram conteúdos muito baixos de carbono e nitrogênio. Devido aos baixos teores de MOS, o comportamento espectral desses solos não foi influenciado pela matéria orgânica. Conseqüentemente o albedo dessas áreas é maior. Nos difratogramas de raio X das frações granulométricas desses perfis foram encontrados elevados valores para o quartzo e mica (biotita e muscovita). A presença destes minerais também contribui para a alta refletividade dos solos.

A declividade local variou de 4 a 7% nos perfis. A erosão observada foi laminar severa e em sulcos, o que provocou redução na profundidade efetiva do solo. Isto acarretou na remoção do horizonte A nos perfis DF3 e DF4. Na análise granulométrica, os perfis apresentaram textura argilo-arenosa. Mesmo assim, o percentual de quartzo na fração areia do horizonte superficial foi elevado (acima de 83%) o que resulta em alta refletividade do solo.

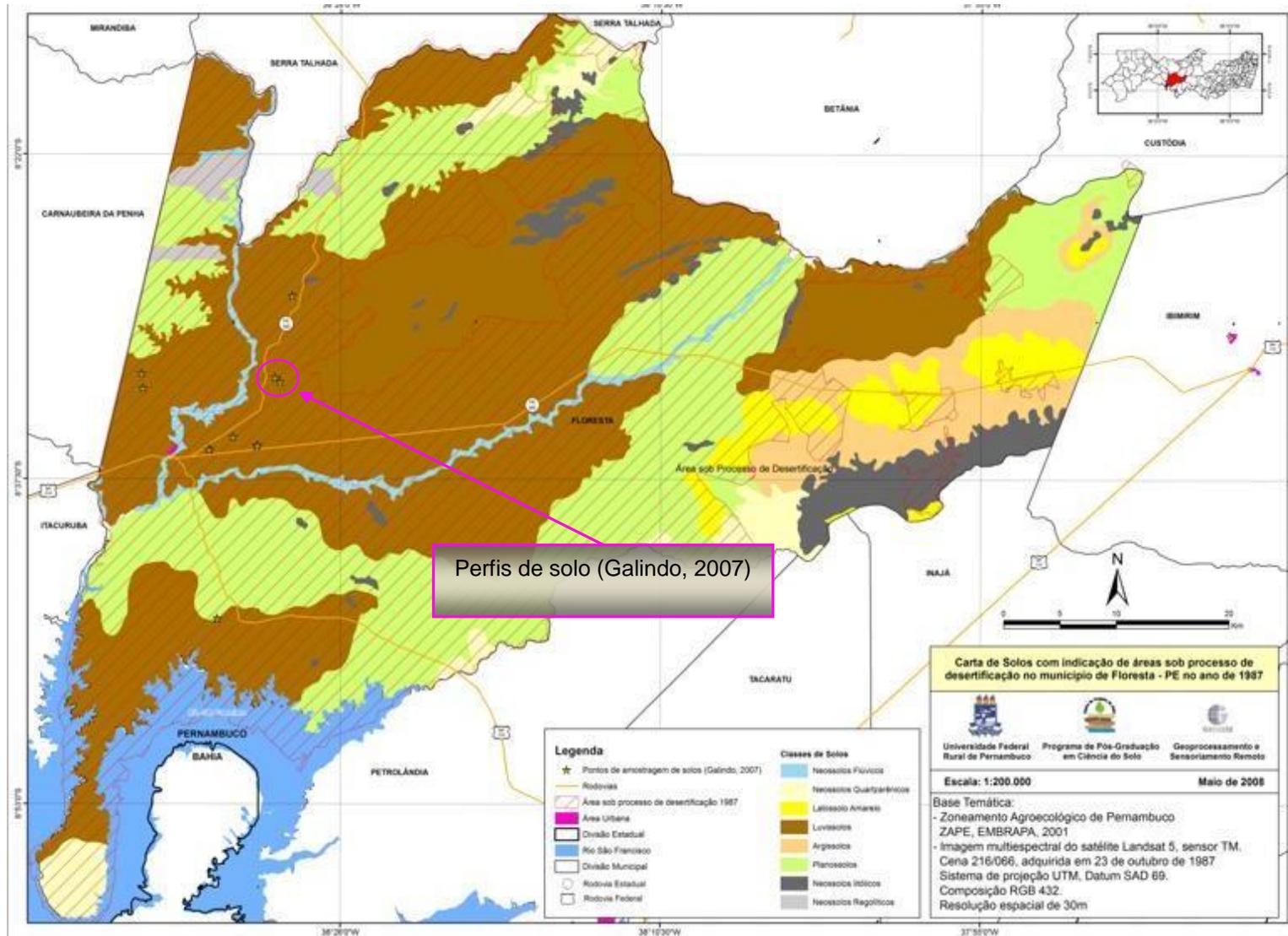


Figura 4.3a. Carta de solos de Floresta com indicação de áreas sob processos de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/LANDSAT de 23 de outubro de 1987. Pontos na cor amarela são perfis de solos descritos por Galindo (2007).

Nesta análise não foram detectados óxidos de ferro (goethita e hematita) em quantidades elevadas. O baixo percentual desses óxidos também contribui para a alta reflectância dos solos. As características químicas, físicas, mineralógicas e morfológicas associadas ao baixo índice pluviométrico da região e a cobertura vegetal esparsa e de pequeno porte resultam em um comportamento espectral típico de áreas degradadas, ou seja, elevado albedo na imagem original. Nas imagens NEGATIVO essas áreas apresentam-se em tons escuros.



Figura 4.3b. Ambiente degradado em Floresta na área do perfil DF2. Fonte: Galindo (2007).

Na Figura 4.3c apresenta-se a carta de solos do município de Floresta com indicação de áreas sob processo de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/LANDSAT adquiridas em 30 de setembro de 1999. Esta carta foi gerada a partir do mapa das unidades de solos elaborado pela EMBRAPA Solos (2001).

Pode-se observar que a maior parte das áreas sob processo de desertificação (polígonos hachurados na cor vermelha) delimitadas a partir das imagens NEGATIVO está sobre Luvisolos e Planossolos e pequenas partes sobre Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos, Argissolos e Latossolos.

De acordo com as áreas delimitadas nas imagens NEGATIVO, também se evidencia que ocorreu uma evolução da degradação no território do município de Floresta no período entre 1987 e 1999.

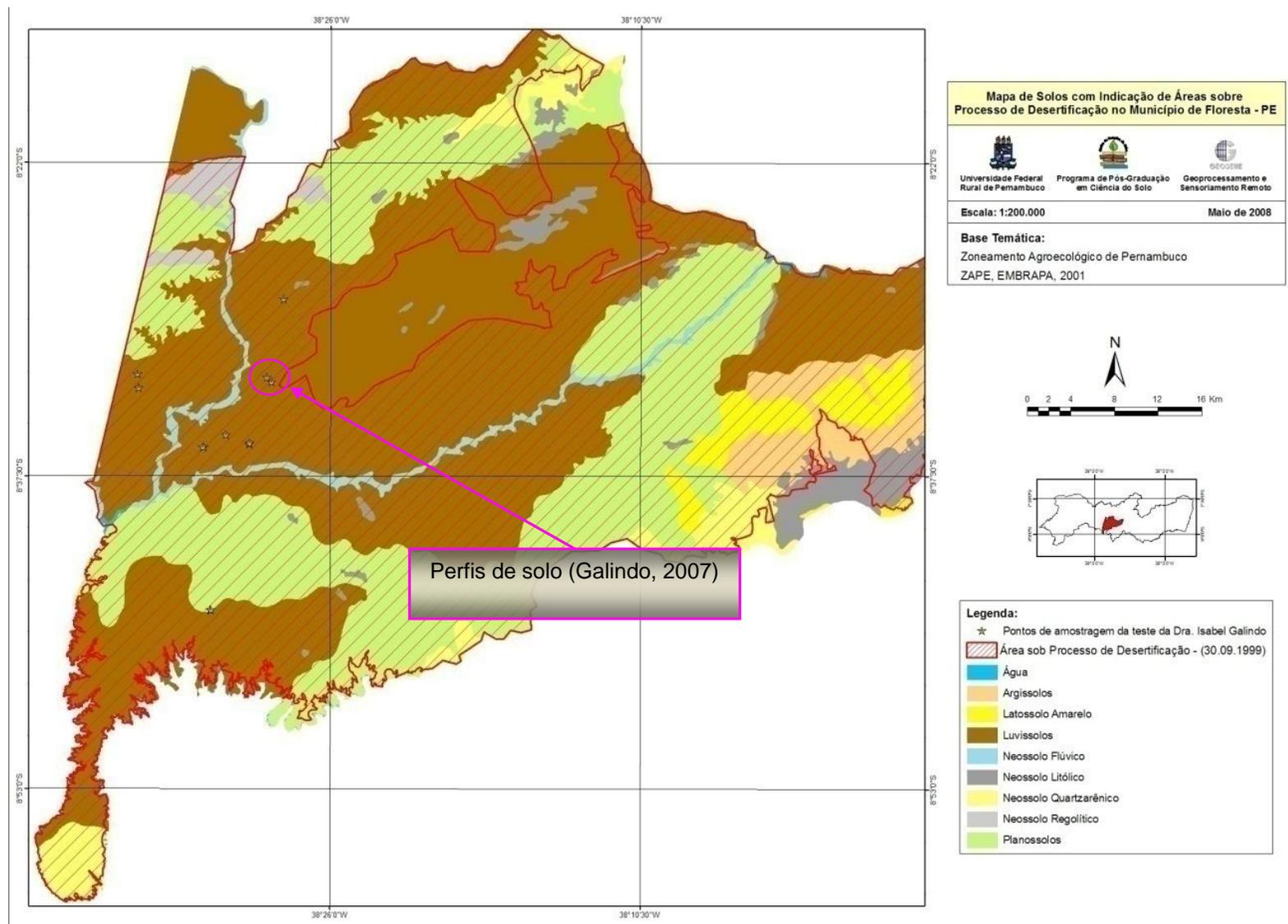


Figura 4.3c. Carta de solos de Floresta com indicação de áreas sob processos de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/LANDSAT adquiridas em 30 de setembro de 1999. Na cor amarela são os perfis de solos descritos por Galindo (2007).
Fonte: adaptado EMBRAPA Solos (2001).

4.1.4. Carta de solos do município de Jataúba com indicação de áreas sob processos de desertificação

Na Figura 4.4a é apresentado o mapa de solos do município de Jataúba, com indicação de áreas sob processo de desertificação, extraídas de imagens do sensor TM/LANDSAT 5 de 12 de novembro de 2000. Este mapa também foi gerado a partir do mapa das unidades de solos elaborado pela EMBRAPA Solos (2001).

A área vetorizada e hachurada na cor vermelha foi delimitada como área suscetível à desertificação. Essa área corresponde à área ocupada por Planossolos e Luvisolos e pequenas partes por Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos. De acordo com Accioly (2002), os solos das classes Luvisolos e Planossolos são reconhecidamente suscetíveis à erosão. De acordo com o mapa de solos de Jataúba, os perfis de solos coletados e descritos por Galindo (2007) em áreas degradadas coincidem com as manchas ocupadas por Planossolos.

Os perfis descritos DJ1, DJ2, DJ3 e DJ4 estão localizados em ambientes degradados (Figura 4.4b). Estes ambientes estão dentro da área degradada extraída no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT do município de Jataúba. A declividade local variou de 0 a 2,5% nos perfis. A erosão observada foi laminar severa o que provocou redução na espessura do horizonte superficial. A vegetação é de caatinga hiperxerófila aberta.

Nas análises físicas e químicas, os perfis DJ1, DJ2, DJ3 e DJ4 também apresentaram conteúdos muito baixos de carbono e nitrogênio. Devido aos baixos teores de MOS encontrados em todos os horizontes dos perfis, o comportamento espectral desses solos não foi influenciado pela matéria orgânica.

Nos difratogramas de raio X das frações granulométricas desses perfis foram encontrados elevados valores para feldspato e mica (biotita e muscovita). Estes minerais contribuíram para a alta refletividade dos solos.

Na análise granulométrica, os solos coletados por Galindo (2007) apresentaram textura franco-arenosa no horizonte A. O percentual de quartzo na fração areia foi elevado (acima de 94%) resultando em alta refletividade do solo.

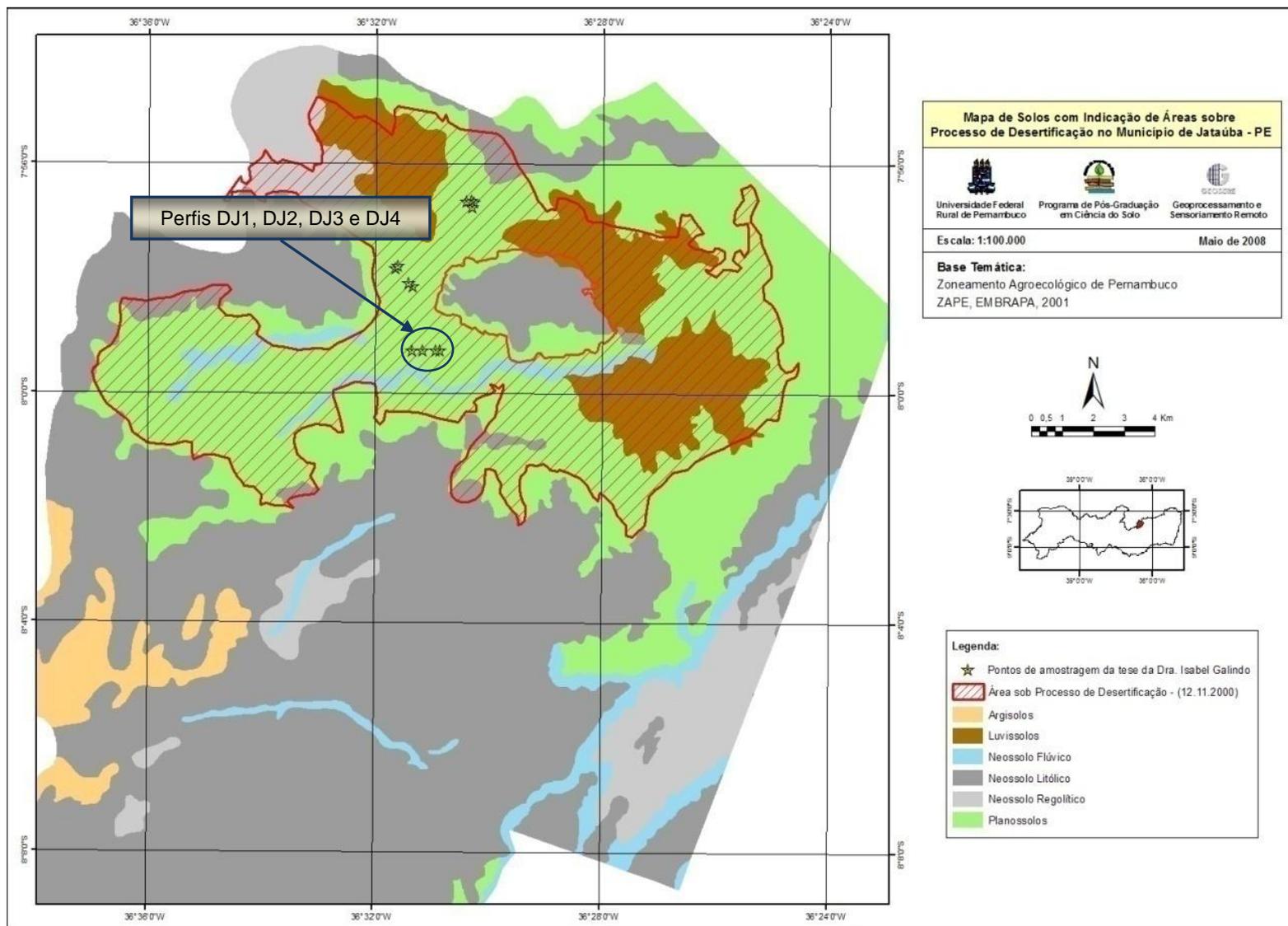


Figura 4.4a. Carta de solos do município de Jataúba com indicação de áreas sob processo de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/TM/LANDSAT adquiridas em 12 de novembro de 2000.
Fonte: adaptado EMBRAPA (2001).

Não foram detectados óxidos de ferro (goethita e hematita) em quantidades elevadas. O baixo percentual desses óxidos também contribuiu para a alta refletância dos solos na área estudada.

A associação das características químicas, físicas, mineralógicas e morfológicas com o baixo índice pluviométrico da região e a cobertura vegetal aberta resultam no comportamento espectral típico de áreas degradadas, ou seja, elevado albedo na imagem original. Nas imagens NEGATIVO essas áreas apresentam-se em tons escuros.

Os perfis DJ2, DJ3 e DJ4 foram classificados como Planossolos Nátricos (Galindo, 2007). Estes solos apresentam características/atributos que favorecem os processos de desertificação em virtude dos altos teores de sódio trocável no Btn, que reduzem ainda mais a profundidade efetiva. Isto se evidencia na Figura 4.2b onde os perfis estão numa área da imagem NEGATIVO em tons escuros bastante fortes.

Este resultado confirma o comportamento espectral do Planossolo Nátrico. Dessa forma é possível afirmar que esta classe de solo é bastante suscetível à desertificação e tem contribuído para expansão do processo naquela região.



Figura 4.4b. Ambiente degradado em Jataúba, na área do perfil DJ-2
Fonte: Galindo (2007).

4.1.5. Carta imagem NEGATIVO da evolução das áreas degradadas do município de Floresta (período de 1987 a 1999)

A evolução histórica da degradação no município de Floresta pode ser analisada na Figura 4.5. Nota-se que no período de 1987 a 1999 (12 anos) houve uma expansão das áreas degradadas.

Os polígonos na cor magenta são as áreas degradadas vetorizadas nas imagens NEGATIVO a partir das imagens LANDSAT 5 adquiridas em 23 de outubro de 1987 e os polígonos na cor amarela são as áreas degradadas vetorizadas nas imagens NEGATIVO a partir das imagens LANDSAT 7 adquiridas em 30 de novembro de 1999. No período da evolução histórica, Os Luvisolos e Planossolos são os solos mais afetados por processos de degradação indicados nas imagens NEGATIVO/LANDSAT. A expansão da degradação calculada no município de Floresta ao longo destes 12 anos foi de aproximadamente 102 Km².

4.1.6. Cartas de solos com a evolução da degradação no município de Jataúba (período de 1975 – 2000)

A partir das imagens NEGATIVO/LANDSAT foram extraídas áreas degradadas para os anos de 1975, 1990 e 2000. Estas áreas foram plotadas na carta de solos do município de Jataúba. São três polígonos indicativos de áreas degradadas.

Na cor azul é a área indicada no ano de 1975, na cor amarela é a área indicada no ano de 1990 e na cor vermelha é a área indicada no ano de 2000. As Figuras 4.6a, 4.6b e 4.6c apresentam respectivamente três cartas de solos com as áreas degradadas para cada ano citado. Nestas cartas de solos pode-se constatar a evolução histórica da degradação no município de Jataúba.

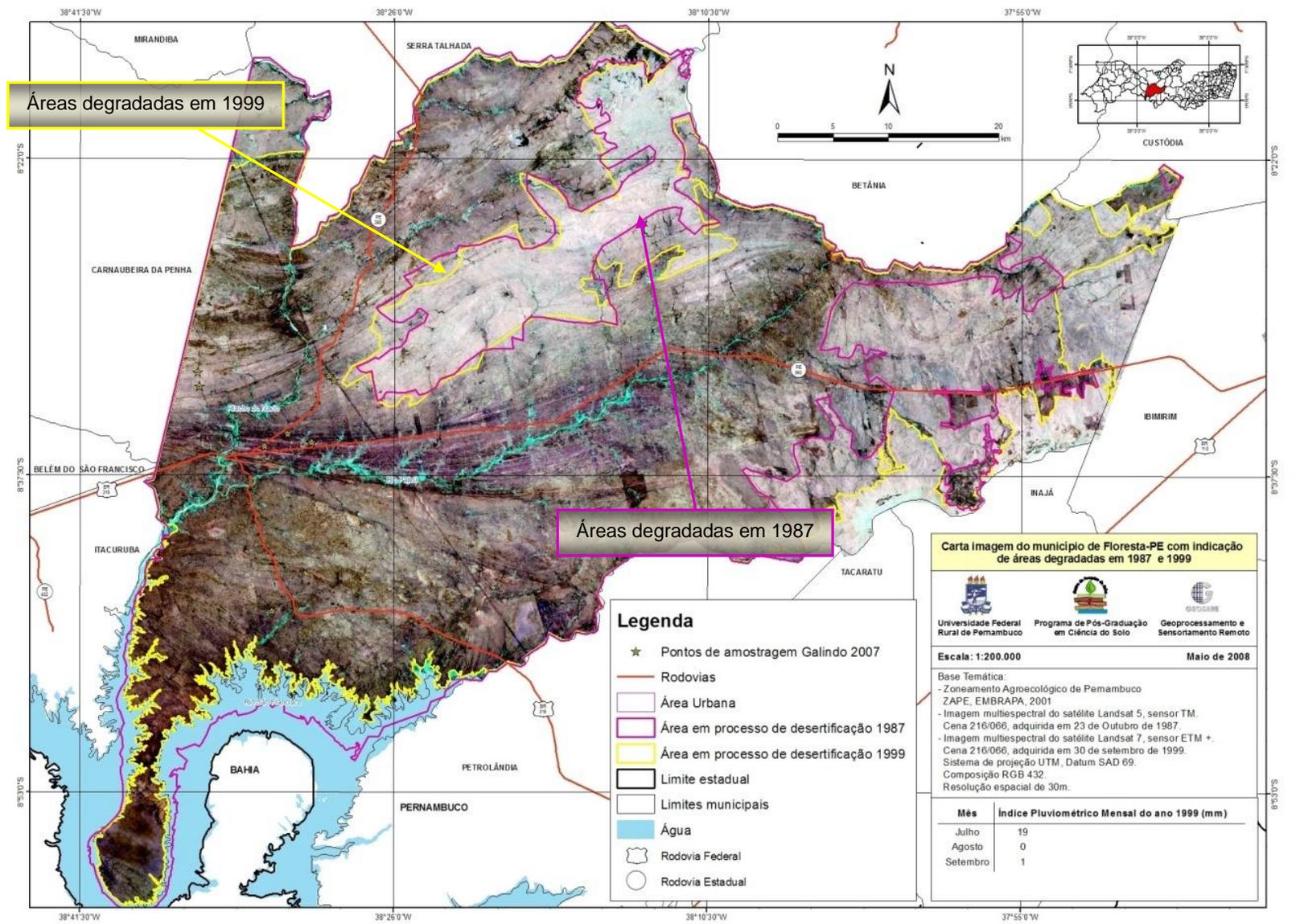


Figura 4.5. Carta Imagem NEGATIVO do município de Floresta com indicação de áreas sob processos de desertificação em 23 de outubro de 1987 e em 30 de setembro de 1999.

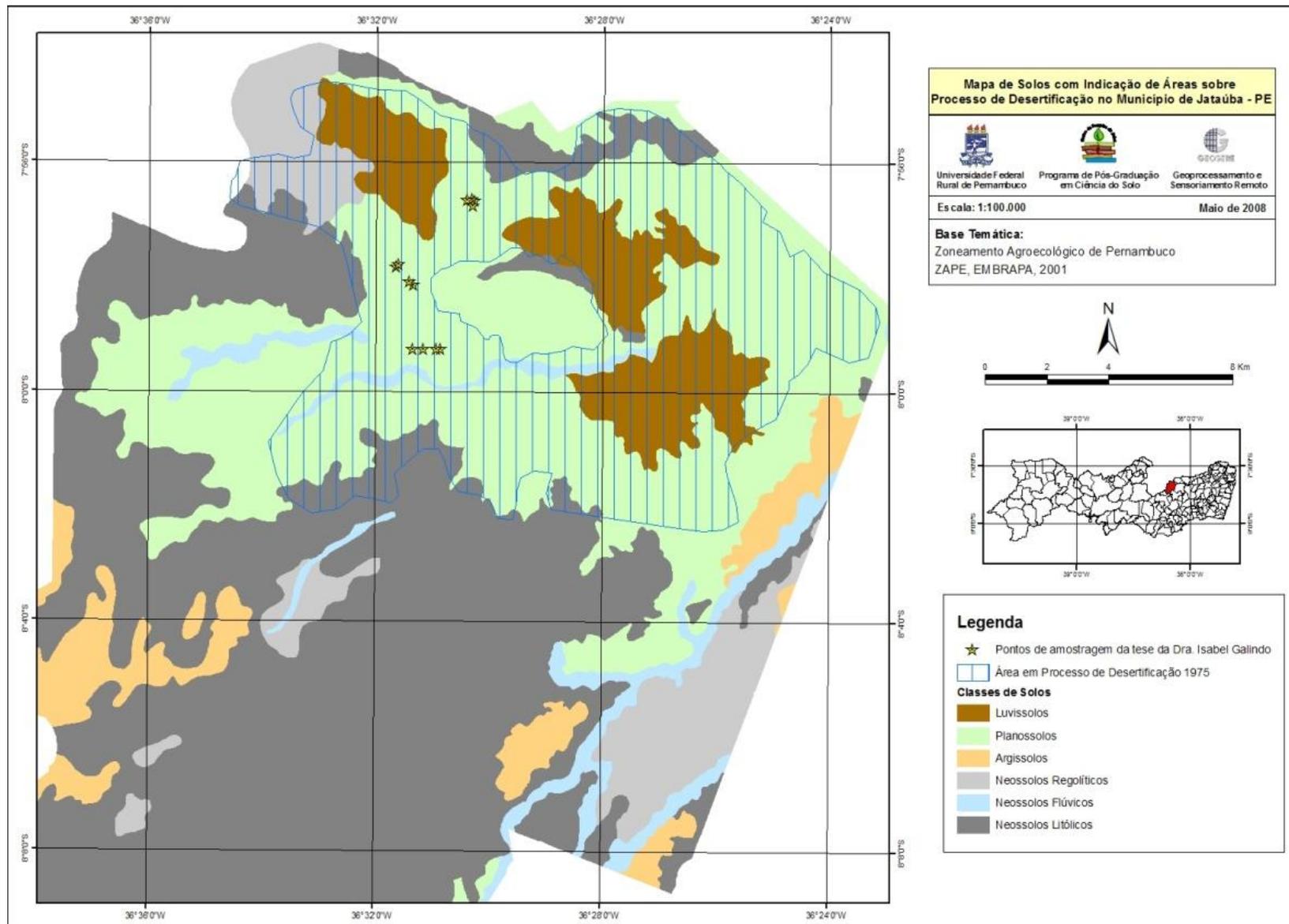


Figura 4.6a: Carta de solos de Jataúba com áreas degradadas extraídas das imagens MSS/LANDSAT adquiridas em 1975. Fonte: adaptado EMBRAPA Solos (2001).

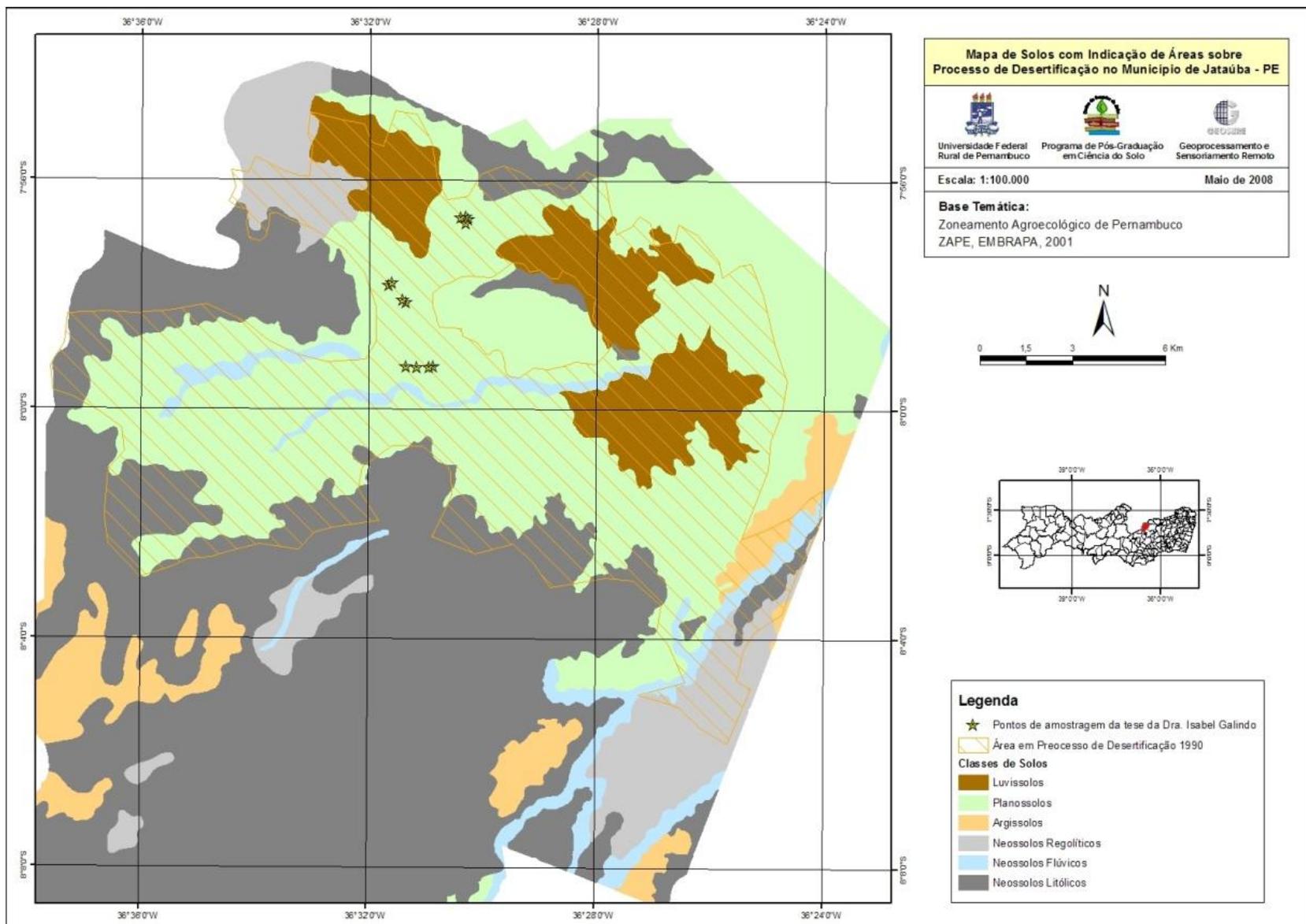


Figura 4.6b: Carta de solos de Jataúba com áreas degradadas extraídas das imagens TM/LANDSAT adquiridas em 1990. Fonte: adaptado EMBRAPA Solos (2001).

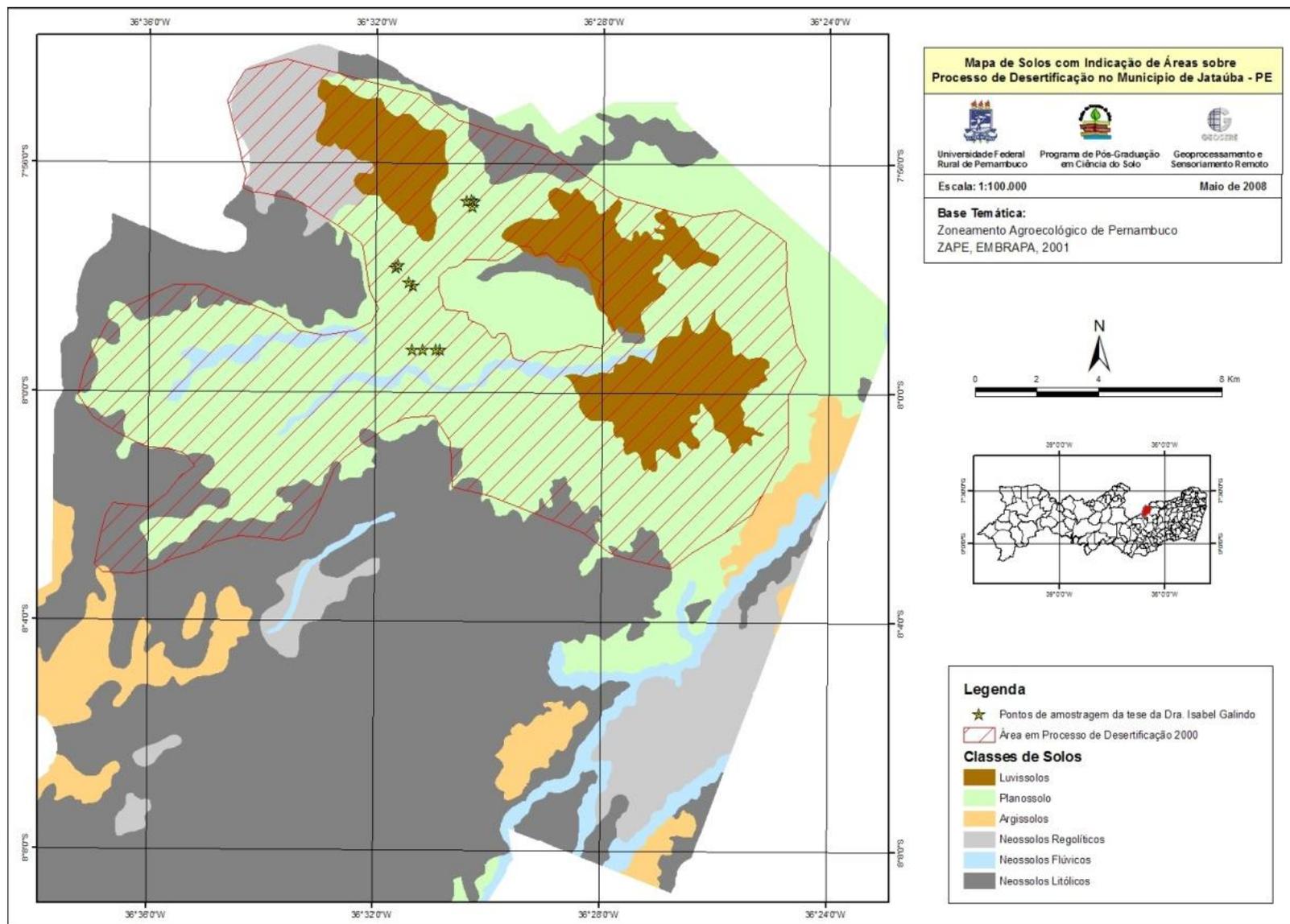


Figura 4.6c: Carta de solos do município de Jataúba com áreas degradadas extraídas das imagens ETM+/LANDSAT adquiridas em 2000.

Fonte: adaptado EMBRAPA Solos (2001).

As áreas vetorizadas estão sobre áreas ocupadas predominantemente por Planossolos e Luvisolos para as três datas de imageamento. Estes solos, pelas suas características/atributos influenciam o comportamento espectral identificado na imagem NEGATIVO.

As variações na forma e tamanho dos polígonos são devidas a diversos fatores, como as condições climáticas da área no momento de aquisição das imagens, a geometria de iluminação e a qualidade dos sensores no instante do imageamento. Contudo, a influência do tipo do solo foi constante ao longo dos 25 anos, ou seja, contribuiu para baixos valores de níveis de cinza na imagem NEGATIVO, o que corresponde a elevado albedo na imagem original.

A Figura 4.6d apresenta a carta de solos do município de Jataúba com indicação da evolução histórica das áreas sob processo de desertificação extraídas das imagens NEGATIVO/LANDSAT dos anos de 1975, 1999 e 2000.

Observa-se que no período de 1975 a 2000 houve expansão das áreas afetadas por processos de degradação. Analisando estas áreas sobre o mapa de solos, a expansão ocorreu, principalmente, em áreas ocupadas por Planossolos e Luvisolos.

Neste período de 25 anos há uma área que aparece continuamente como área degradada. Ou seja, independente da época de imageamento e condições climáticas, a área resultante da interseção dos três polígonos vetorizados. A referida área de interseção está predominantemente sobre Planossolos e Luvisolos e ocupa uma extensão territorial de aproximadamente 200 Km².

4.1.7. Carta de NDVI do município de Floresta

A Figura 4.7 apresenta a carta de NDVI do município de Floresta. Esta carta foi elaborada a partir da imagem NDVI gerada das imagens TM/LANDSAT 5 adquiridas em 23 de outubro de 1987.

Historicamente, outubro é um mês no qual o índice pluviométrico em Floresta é em média 2 milímetros (LAMEPE, 2008). Observe que a maior parte do município apresenta baixos valores de NDVI.

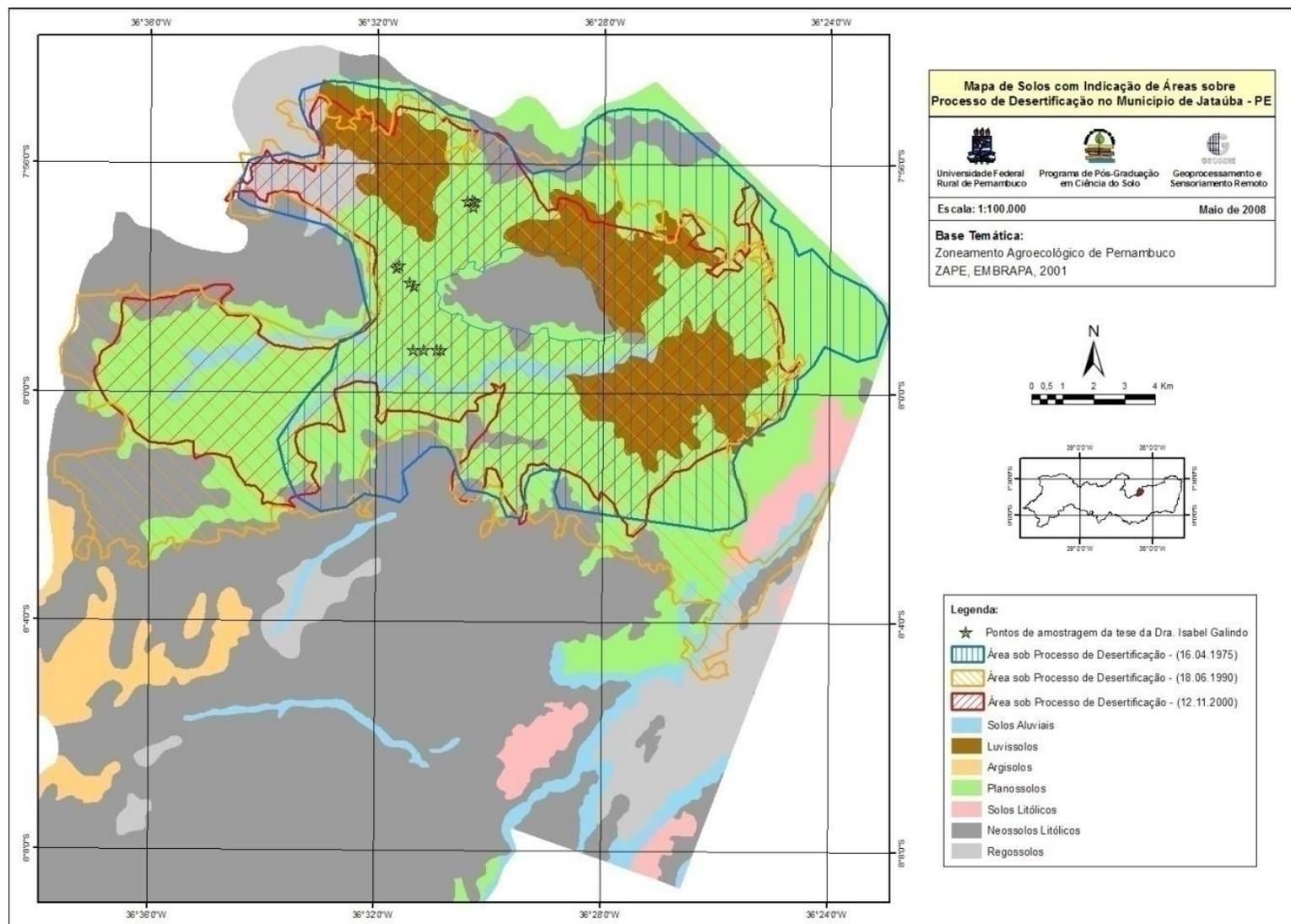


Figura 4.6d: Carta de solos do município de Jataúba com indicação da evolução histórica das áreas sob processo de desertificação extraídas das imagens NEGATIVO/LANDSAT dos anos de 1975, 1999 e 2000. Fonte: adaptado EMBRAPA Solos (2001).

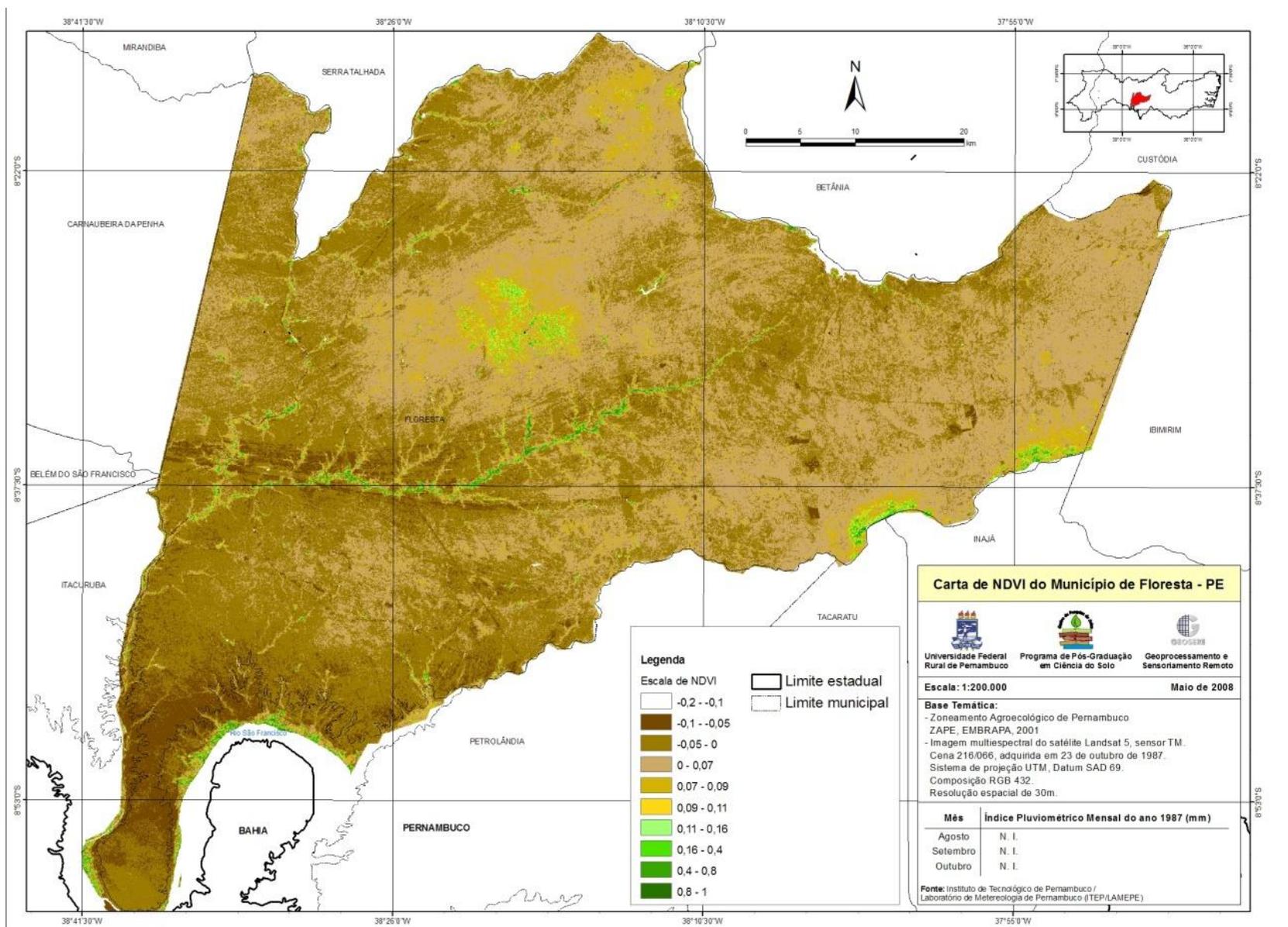


Figura 4.7. Carta de NDVI do município de Floresta a partir das imagens TM/LANDSAT 5 (outubro 1987).

4.1.8 Carta de NDVI do município de Jataúba

Esta carta de NDVI foi gerada a partir da composição colorida falsa cor 432 em RGB de imagens do sensor ETM⁺/LANDSAT 7 adquiridas em 12 de novembro de 2000 (Figura 4.8). O município localizado no Agreste pernambucano apresentou nesta época, baixo NDVI em quase toda a sua região norte.

Os pontos de coleta dos solos levantados por Galindo (2007) em Jataúba estão indicados na carta de NDVI. Estes pontos estão classificados como de baixo NDVI e aparecem também na área degradada extraída da imagem NEGATIVO/LANDSAT.

A escala de NDVI utilizada nesta carta foi um intervalo de valores de NDVI de -1 a +1 dividida em faixas de 0,25. Estes valores foram ajustados posteriormente de acordo com a região da área estudada.

O índice pluviométrico foi zero no mês de aquisição da imagem de satélite e nos meses anteriores, o que influenciou no resultado do NDVI. Os valores baixos de NDVI foram compatíveis com as condições climáticas e as classes de solos da área estudada.

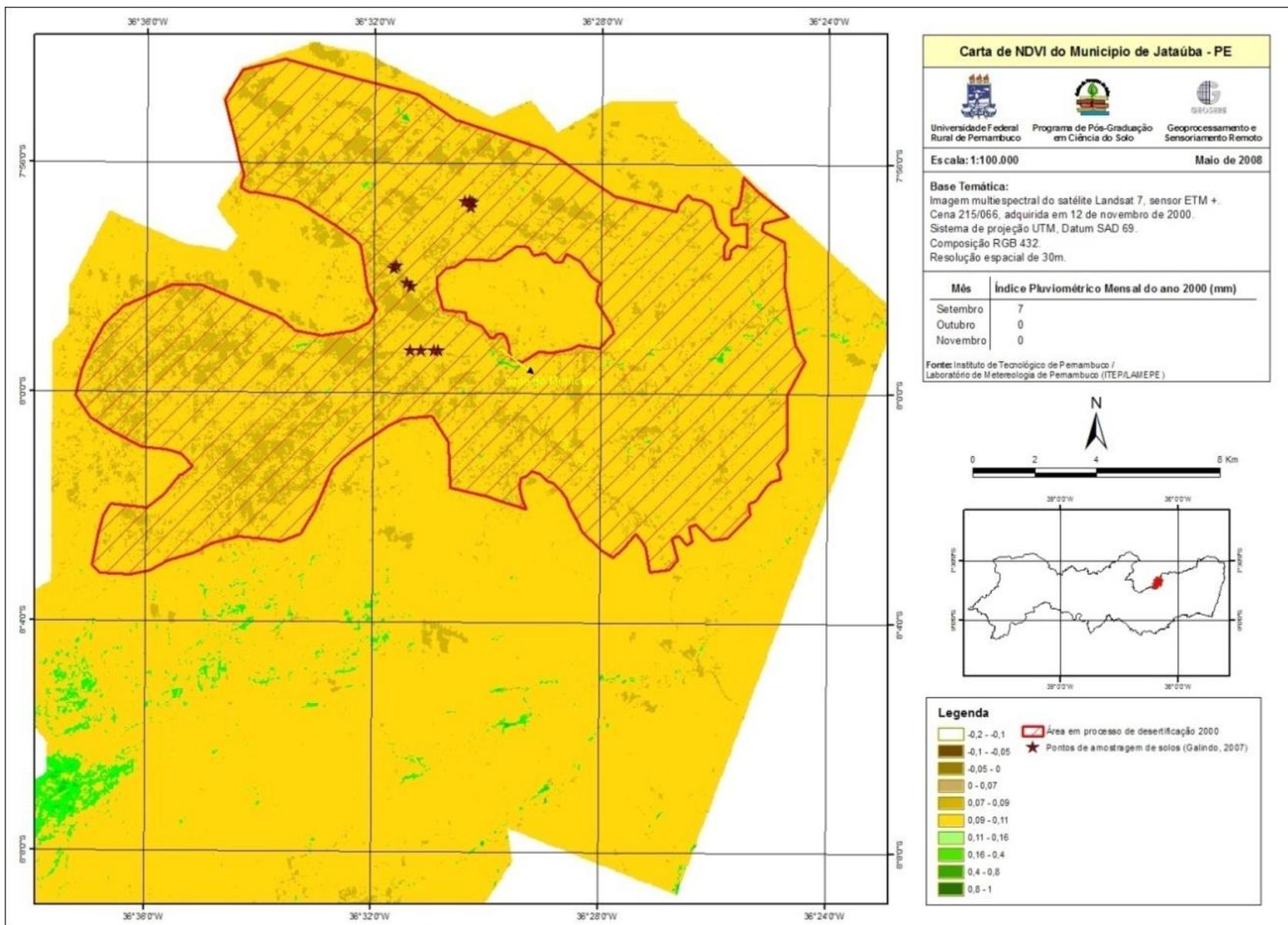


Figura 4.8. Carta de NDVI de Jataúba com indicação de áreas sob processos de desertificação extraídas de imagens NEGATIVO/TM/LANDSAT 7 adquiridas em 23 de novembro de 2000. Na cor vermelha são perfis descritos por Galindo (2007).

4.2. Áreas suscetíveis à desertificação do semi-árido de Pernambuco

Os resultados obtidos com a análise espacial das imagens de satélites, com o mapa de solos e com o NDVI das áreas piloto permitiram extrapolar a aplicação da metodologia para o semi-árido pernambucano e conseqüentemente elaborar o mapa de risco de desertificação de Pernambuco. Na análise espacial do semi-árido pernambucano foram considerados principalmente as áreas degradadas a partir das imagens NEGATIVO e os atributos dos solos suscetíveis à desertificação (LUVISSOLOS, NEOSSOLOS LITÓLICOS e PLANOSSOLOS).

Ainda nesta análise foram relacionadas às imagens de satélites e a distribuição espacial dos solos suscetíveis à desertificação, com o índice pluviométrico anual da região.

Os mapas que se seguem apresentam as informações espaciais relacionadas ao fenômeno da desertificação, retratando isoladamente resultados obtidos nas etapas da metodologia aplicada.

4.2.1. Áreas degradadas a partir das imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco

Considerando as condições climáticas e as diferenças radiométricas das imagens selecionadas, foram feitas correções radiométricas para compor o mosaico. As diferentes condições de iluminação, inclinação da superfície terrestre e aspectos das visadas do sensor afetaram a qualidade visual das imagens selecionadas, sendo necessárias as correções radiométricas na geração do mosaico.

Outra dificuldade encontrada foi a pequena disponibilidade de imagens com baixo percentual de cobertura de nuvens. Esta dificuldade forçou a utilização de imagens adquiridas em diferentes datas para geração do mosaico, ampliando a influência de diferentes radiometrias de aquisição. Dessa forma foi necessário aplicar operações de contraste. Das operações aplicadas: quadrado, logaritmo, raiz quadrada, negativo, equalização de histograma, fatiamento, linear e mínimo/máximo, a que apresentou melhor resultado foi a operação NEGATIVO no mosaico LANDSAT e foi possível gerar a imagem NEGATIVO/LANDSAT (Figura 4.9).

Este mosaico foi gerado a partir de imagens dos sensores TM/LANDSAT 5 adquiridas no período de 1990 a 2008. A composição colorida é falsa cor em RGB das bandas 432. A partir deste mosaico foram geradas imagens NEGATIVO.

No mosaico NEGATIVO/LANDSAT foram identificadas áreas com características digitais associadas à degradação. Essas características variam em intensidade e extensão.

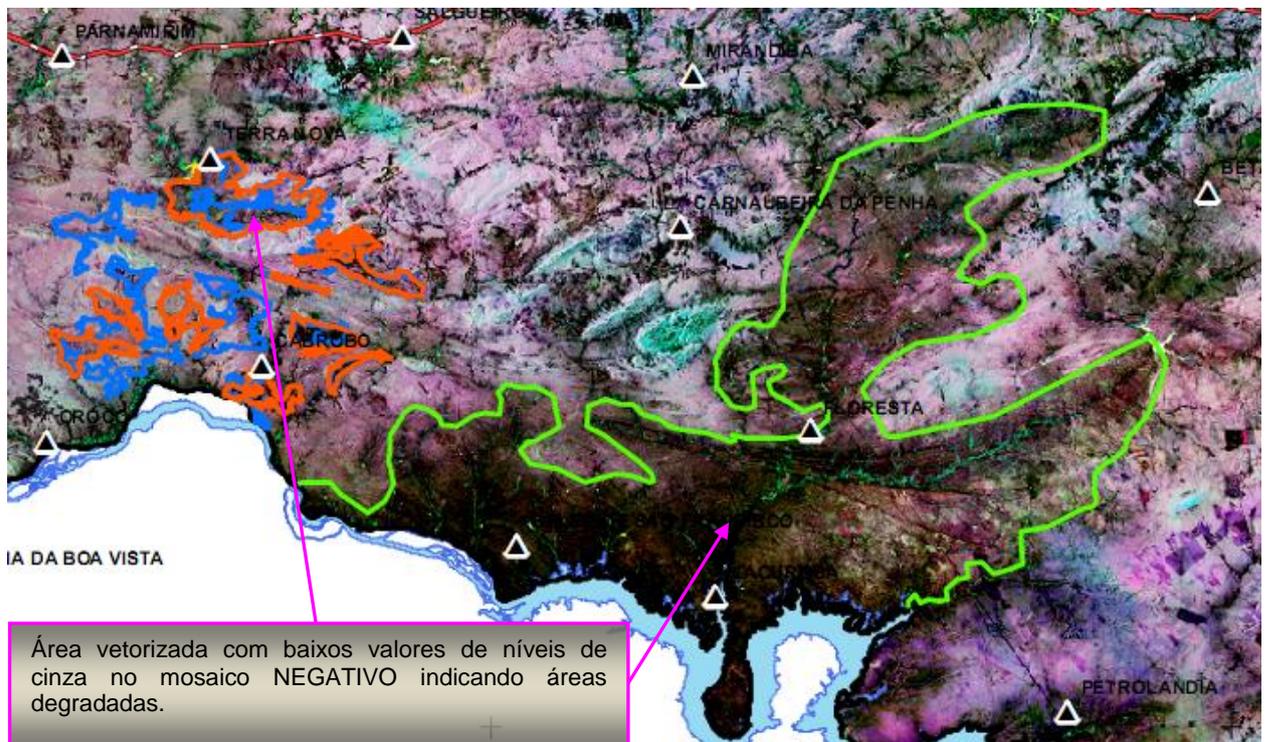


Figura 4.9: Áreas degradadas a partir das imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco.

Sobre a imagem NEGATIVO/LANDSAT foi possível vetorizar áreas (polígonos nas cores azul, vermelha e verde) que apresentam menores valores de níveis de cinza, formas e/ou tamanhos irregulares, tonalidade escura, textura digital lisa e uso e ocupação do solo que não seja agrícola ou com intervenções antrópicas (estradas, barragens, etc).

As áreas vetorizadas na imagem NEGATIVO/LANDSAT correspondem às áreas onde a resposta espectral é maior na imagem original. Ou seja, são as áreas com alta refletividade. Essa resposta espectral depende das características dos solos que ocupam as áreas vetorizadas.

A alta refletividade é característica de solos sob processo de degradação, geralmente solos de textura superficial arenosa, com menores teores de matéria orgânica, óxidos de ferro e quantidade de água. Diferentemente acontece com solos argilosos, onde o teor de matéria orgânica é maior, absorvendo mais e refletindo pouca energia eletromagnética.

A partir da identificação, vetorização e dos critérios descritos nos itens 3.3.4, 3.3.7, 3.3.8 e 4.1.1, as áreas foram classificadas como: **área moderadamente degradada, área degradada e área gravemente degradada**. Essa classificação das áreas foi definida a partir da leitura de pixels.

Na imagem NEGATIVO, os valores de níveis de cinza entre 0 e 128 foram classificados como áreas gravemente degradadas. Os valores de níveis de cinza entre 129 e 191 foram classificados como áreas degradadas. Os valores de níveis de cinza entre 192 e 255 foram classificados como áreas moderadamente degradadas. Ressalte-se que na imagem original, esses intervalos de níveis de cinza são o inverso. Ou seja, 129 a 255, 66 a 128 e 0 a 65, respectivamente.

Através da ferramenta leitura de pixels do SPRING 4.3.3 foi possível verificar o valor de nível de cinza para pontos nas imagens NEGATIVO. Os valores dos pontos P1, P2 e P3 apresentados a seguir, correspondem aos valores dos pixels presentes na imagem original, independente da escala de visualização da imagem na tela. Os valores de níveis de cinza de pixels lidos são em áreas vetorizadas correspondentes as áreas degradadas identificadas nas imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco (Figura 4.9).

Como exemplos são apresentados a seguir os pixels de uma área localizada no município de Santa Maria da Boa Vista (Figura 4.12).

Ponto P1: Imagem NEGATIVO/LANDSAT:

Long = o 39:46:49.670 Lat = s 08:46:55.642

X = 414162.5 m Y = 9029143.2 m e Col: 6090 Lin: 5864

Banda 4					Banda 3					Banda 2				
179	204	208	168	197	220	224	219	214	231	231	229	229	233	233
224	229	233	222	224	224	214	206	225	221	211	214	229	222	218
228	214	236	219	206	194	190	203	230	214	206	216	198	191	211
211	209	208	209	206	197	194	209	211	202	216	227	198	198	216
209	214	230	201	206	204	212	220	232	217	227	233	209	218	226

Ponto P2: Imagem NEGATIVO/LANDSAT

Long = o 39:49:37.061 Lat = s 08:47:7.912

X = 409049.1 m Y = 9028755.4 m e Col: 5911 Lin: 5878

Banda 4					Banda 3					Banda 2				
191	191	198	191	198	206	208	193	186	209	190	190	182	186	193
191	191	187	194	179	211	193	199	188	195	193	186	167	182	197
179	175	175	191	170	206	204	209	211	214	193	186	182	186	193
191	175	187	201	191	213	209	204	206	209	186	190	193	200	203
194	187	194	206	216	222	193	195	211	216	193	177	167	193	217

Ponto P3: Imagem NEGATIVO/LANDSAT

Long = o 39:45:15.753 Lat = s 08:46:5.897

X = 417028.9 m Y = 9030676.8 m e Col: 6191 Lin: 5811

Banda 4					Banda 3					Banda 2				
183	194	207	204	198	195	210	207	209	201	173	182	190	190	186
216	209	214	209	201	224	227	215	223	210	201	190	197	190	182
232	224	222	209	207	229	226	227	223	203	221	214	206	194	186
222	222	222	219	209	223	224	225	220	217	214	212	212	201	197
212	209	216	216	207	218	217	210	199	197	204	201	201	197	186

Análise estatística

Visando avaliar a relação entre as respostas espectrais e identificar os atributos dos solos relacionados ao comportamento espectral relacionado à suscetibilidade aos processos de degradação, foi realizada a análise de regressão.

Área moderadamente degradada

$$Y_1 = - 123,319 + 0,907X + \varepsilon$$

$R^2 = 0,85$ (Explica a variação do nível de cinza nas áreas moderadamente degradadas em 85%).

Área degradada

$$Y_2 = - 27,033 + 0,910X + \varepsilon$$

$R^2 = 0,82$ (Explica a variação do nível de cinza nas áreas degradadas em 82%).

Área gravemente degradada

$$Y_3 = 99,611 + 0,738X + \varepsilon$$

$R^2 = 0,95$ (Explica a variação do nível de cinza nas áreas gravemente degradadas em 95%).

A Figura 4.10 apresenta áreas no município de Cabrobó delimitadas no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT do sertão de Pernambuco. Pelos critérios citados essas áreas foram classificadas como moderadamente degradadas. É importante ressaltar que a delimitação dessas áreas foi feita a partir do conjunto de elementos de interpretação visual citado anteriormente.

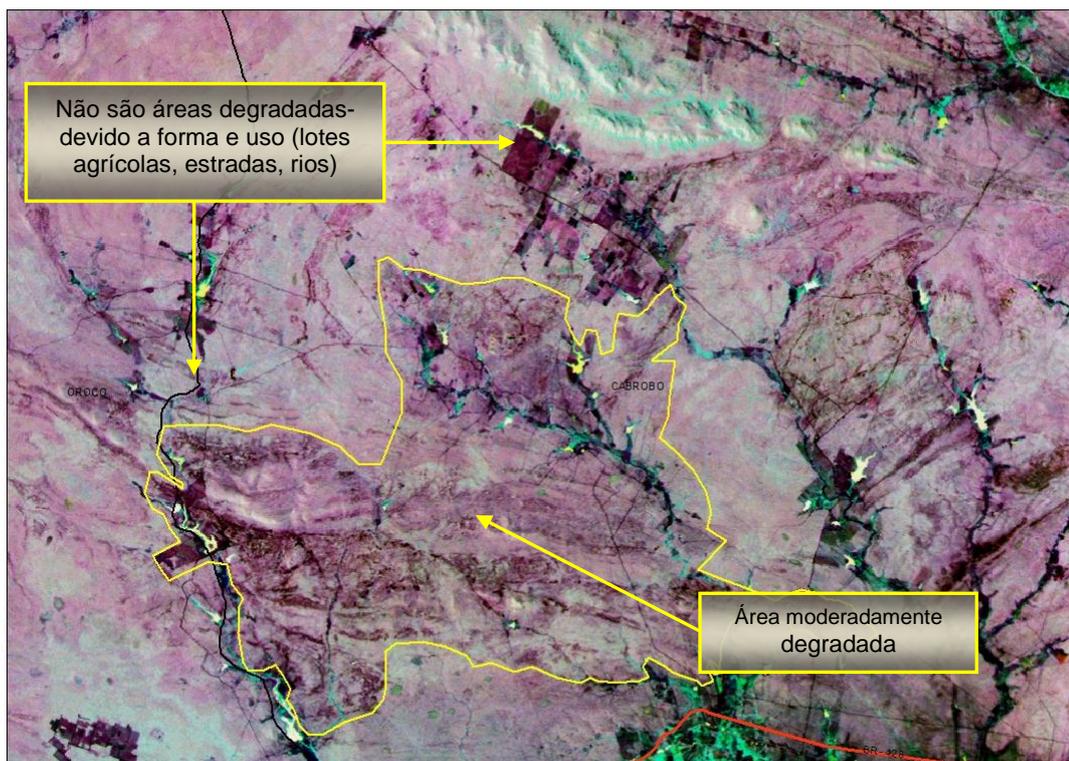


Figura 4.10: Área moderadamente degradada no município de Cabrobó delimitada no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco.

Também pelos mesmos critérios citados e considerando a variação tonal nas áreas delimitadas, a Figura 4.11 apresenta áreas moderadamente degradadas e degradadas. A interpretação visual dos alvos com tons escuros na imagem NEGATIVO requer cuidado por parte do fotointérprete.

Algumas áreas no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT apresentam comportamento espectral semelhante às áreas vetorizadas. Deve-se ter a atenção, para não confundir áreas degradadas com lotes agrícolas, áreas de pivôs centrais, rios, estradas, açudes, barragens e outros alvos que tenham baixos valores de níveis de cinza na imagem NEGATIVO. Para isso é necessário utilizar adequadamente os critérios de interpretação citados.

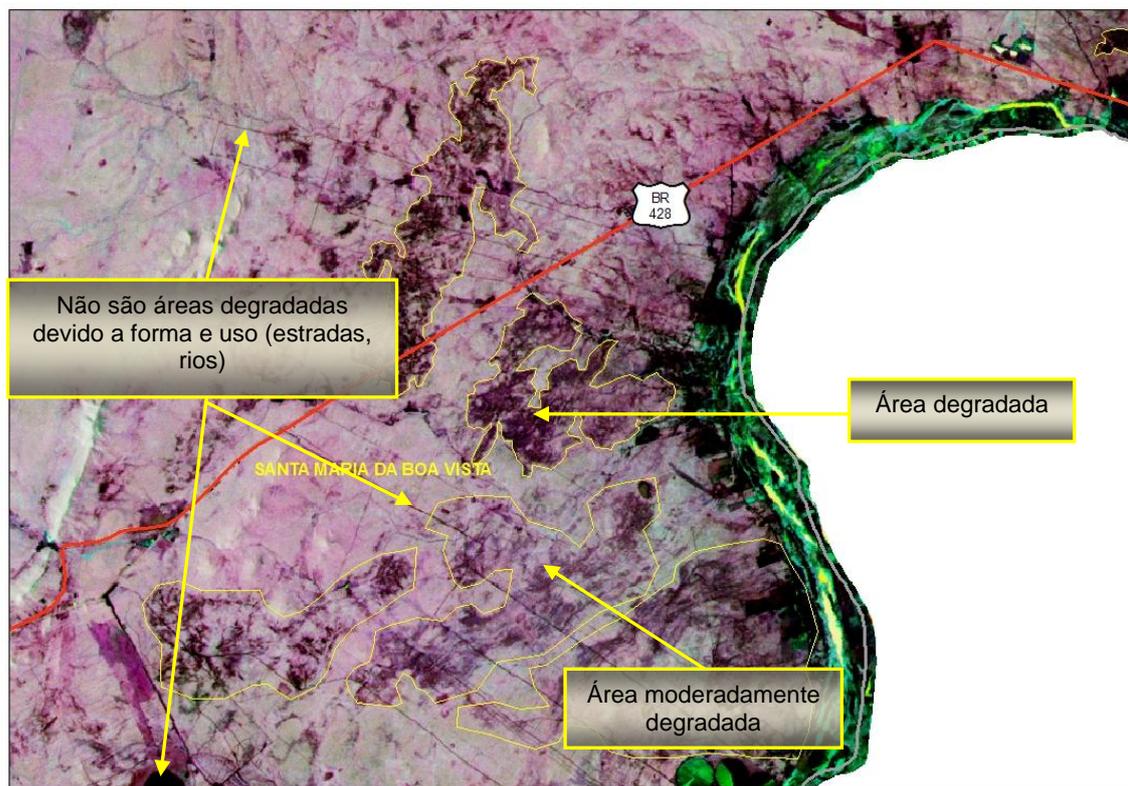


Figura 4.11: Áreas moderadamente degradadas e áreas degradadas no município de Santa Maria da Boa Vista delimitadas no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT do semi-árido de Pernambuco.

Na Figura 4.12 os polígonos delimitados pelas linhas amarelas correspondem as áreas classificadas como gravemente degradada. Observa-se a tonalidade muito escura quase que em toda a extensão do polígono delimitado. São áreas de elevado albedo que estão associadas a áreas severamente erodidas,

caracterizadas por solos rasos ou com mudança textural acentuada, com baixos teores de matéria orgânica, superficialmente arenosos ou com intensa pedregosidade superficial e com cobertura vegetal esparsa e de pequeno porte.

Estas características são típicas de solos sob processo de desertificação, onde os processos erosivos atuam mais fortemente devido à alta suscetibilidade do solo.

Os pontos P1, P2 e P3 correspondem aos pontos tomados como exemplo de leitura de pixels na imagem NEGATIVO. Os valores encontrados nestas leituras foram apresentados anteriormente.

Considerando que as imagens do mosaico foram adquiridas no período de 1987 a 2001 e que os processos erosivos do solo continuam se expandindo na região, as partes do polígono que aparecem em tons mais claros, possivelmente hoje, já estão num estágio mais avançado de degradação. Portanto, em uma imagem atual essas partes poderão aparecer em tons mais escuros.

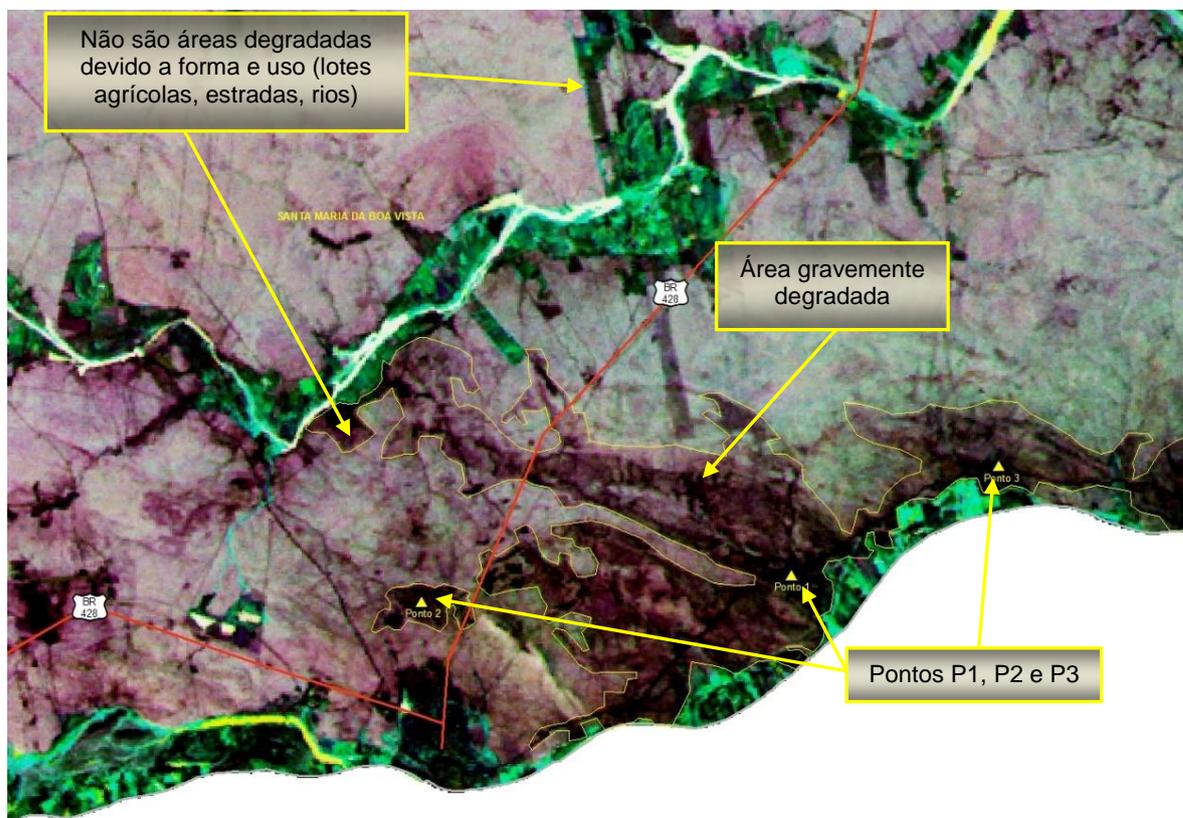


Figura 4.12: Áreas gravemente degradada no município de Santa Maria da Boa Vista delimitadas no mosaico NEGATIVO/LANDSAT do sertão de Pernambuco.

4.2.2 Mapa de solos do semi-árido de Pernambuco

O mapa gerado a seguir (Figura 4.13) foi adaptado do mapa de solos elaborado pela EMBRAPA Solos (2001). Neste mapa foram inseridas as divisões estaduais e municipais, sistema viário e sedes municipais. Este mapa foi referência para a geração de outros mapas desta pesquisa. Neste mapa está representado o semi-árido de Pernambuco com uma extensão territorial de aproximadamente 75.000 Km².

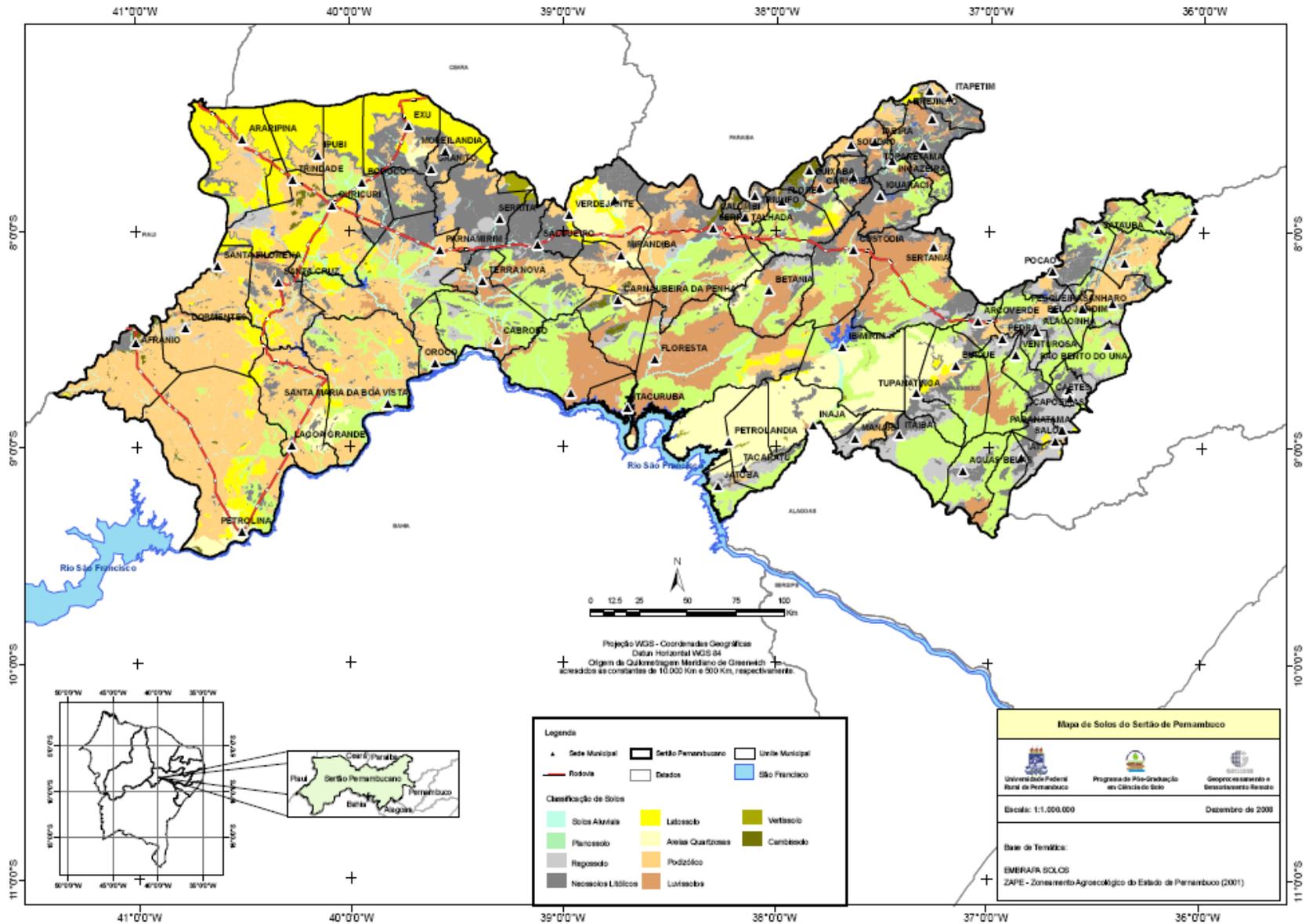


Figura 4.13. Mapa de solos do semi-árido de Pernambuco de acordo com EMBRAPA Solos (2001).
 Fonte: adaptado EMBRAPA Solos (2001).

Na Legenda, além dos elementos cartográficos, foram colocados os principais solos de interesse desta Pesquisa. A legenda com as classes de solos utilizadas foi a seguinte:



4.2.3. Mapa de vulnerabilidade dos solos à degradação

Com base nas unidades de mapeamento da EMBRAPA e considerando as características/atributos dos solos na área de estudo, apresenta-se a seguir o mapa de vulnerabilidade dos solos do semi-árido de Pernambuco (Figura 4.14). Levou-se em consideração principalmente os atributos dos solos que são afetados pela degradação, o relevo, o risco à erosão e a presença de solos suscetíveis a desertificação na unidade.

Este mapa foi gerado a partir do mapa de solos do semi-árido de Pernambuco (Figura 4.13). Neste mapa foram associadas às classes de solos, níveis de vulnerabilidade em função das características de suscetibilidade aos processos de desertificação. De acordo com a Fundamentação Teórica, os solos do semi-árido que apresentam características de maior suscetibilidade aos processos de desertificação são LUVISSOLOS, PLANOSSOLOS e NEOSSOLOS LITÓLICOS. Estes solos e suas associações foram selecionados no mapa de solos de Pernambuco (EMBRAPA Solos, 2001) formando polígonos designados como solos suscetíveis à desertificação (SSD).

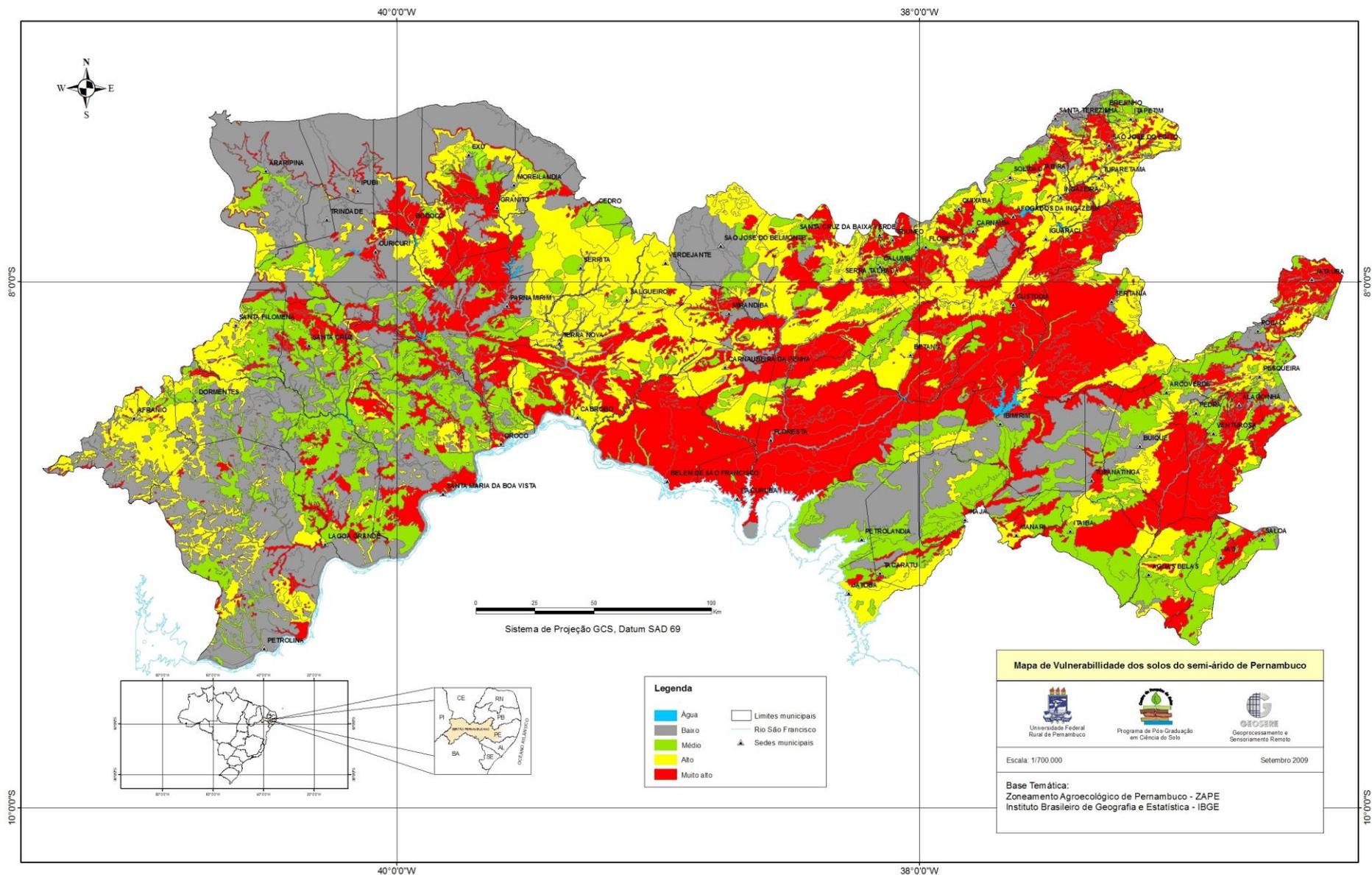


Figura 4.14. Mapa de vulnerabilidade de solos do semi-árido de Pernambuco.

Observa-se neste mapa que estes solos suscetíveis ocupam a maior parte dos municípios do semi-árido pernambucano. O grupo de SSD ocupa aproximadamente 376 quilômetros quadrados do território sertanejo.

Foram classificadas em função da vulnerabilidade à degradação, 301 unidades de mapeamento de solos. Na Tabela 6 está a relação dessas unidades.

Tabela 06. Vulnerabilidade de solos à degradação no semi-árido de Pernambuco

Unidade de mapeamento de solo	Classe de solo dominante	Vulnerabilidade à degradação
A2	Solos aluviais	Baixo
A4	Solos aluviais	Baixo
A6	Solos aluviais	Médio
A7	Solos aluviais	Baixo
A9	Solos aluviais	Baixo
A10	Solos aluviais	Baixo
A11	Solos aluviais	Baixo
A12	Solos aluviais	Baixo
A13	Solos aluviais	Médio
A15	Solos aluviais	Baixo
AQ2	Areias quartzosas	Médio
AQ3	Areias quartzosas	Baixo
AQ4	Areias quartzosas	Baixo
AQ5	Areias quartzosas	Baixo
AQ6	Areias quartzosas	Baixo
AQ7	Areias quartzosas	Médio
AQ8	Areias quartzosas	Médio
AQ9	Areias quartzosas	Médio
AQ10	Areias quartzosas	Médio
AQ11	Areias quartzosas	Médio
AQ12	Areias quartzosas	Baixo
AQ13	Areias quartzosas	Baixo
AQ14	Areias quartzosas	Baixo
AQ15	Areias quartzosas	Médio
AQ16	Areias quartzosas	Médio
AQ17	Areias quartzosas	Médio
C1	Cambissolo	Médio
C2	Cambissolo	Alto
C3	Cambissolo	Alto
C4	Cambissolo	Alto
C5	Cambissolo	Médio
C6	Cambissolo	Alto
C7	Cambissolo	Alto
C8	Cambissolo	Médio
C9	Cambissolo	Alto
C10	Cambissolo	Médio
C11	Cambissolo	Alto

C13	Cambissolo	Alto
C14	Cambissolo	Médio
C15	Cambissolo	Alto
C15	Cambissolo	Alto
C16	Cambissolo	Alto
G6	Gleissolo	Baixo
LA'1	Latossolos amarelo	Baixo
LA'4	Latossolos amarelo	Baixo
LA'5	Latossolos amarelo	Baixo
LA'6	Latossolos amarelo	Baixo
LA'7	Latossolos amarelo	Baixo
LA'8	Latossolos amarelo	Baixo
LA'9	Latossolos amarelo	Baixo
LA'10	Latossolos amarelo	Baixo
LA'11	Latossolos amarelo	Baixo
LA'12	Latossolos amarelo	Baixo
LA'13	Latossolos amarelo	Baixo
LA'14	Latossolos amarelo	Baixo
LA'15	Latossolos amarelo	Baixo
LA15	Latossolo amarelo	Baixo
LA16	Latossolo amarelo	Baixo
LA17	Latossolo amarelo	Baixo
LA17	Latossolo amarelo	Baixo
LA19	Latossolo amarelo	Baixo
LA20	Latossolo amarelo	Baixo
LA21	Latossolo amarelo	Baixo
LA22	Latossolo amarelo	Baixo
LA23	Latossolo amarelo	Baixo
LA24	Latossolo amarelo	Baixo
NC2	Luvissolo	Muito alto
NC4	Luvissolo	Médio
NC5	Luvissolo	Alto
NC6	Luvissolo	Muito alto
NC7	Luvissolo	Médio
NC8	Luvissolo	Muito alto
NC9	Luvissolo	Muito alto
NC12	Luvissolo	Alto
NC13	Luvissolo	Muito alto
NC14	Luvissolo	Muito alto
NC15	Luvissolo	Muito alto
NC16	Luvissolo	Muito alto
NC17	Luvissolo	Muito alto
NC13A	Luvissolo	Muito alto
NCPL6	Luvissolo	Muito alto
PA17	Podzólico amarelo	Baixo
PA'15	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'18	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'19	Podzólicos amarelo	Médio

PA'21	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'22	Podzólicos amarelo	Médio
PA'23	Podzólicos amarelo	Médio
PA'24	Podzólicos amarelo	Médio
PA'25	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'26	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'27	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'28	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'29	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'30	Podzólicos amarelo	Alto
PA'31	Podzólicos amarelo	Alto
PA'33	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'34	Podzólicos amarelo	Médio
PA'35	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'36	Podzólicos amarelo	Médio
PA'37	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'38	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'39	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'40	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'41	Podzólicos amarelo	Médio
PA'42	Podzólicos amarelo	Médio
PA'43	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'44	Podzólicos amarelo	Médio
PA'45	Podzólicos amarelo	Médio
PA'46	Podzólicos amarelo	Médio
PA'47	Podzólicos amarelo	Alto
PA'49	Podzólicos amarelo	Alto
PA'23A	Podzólicos amarelo	Médio
PA'29A	Podzólicos amarelo	Médio
PA'43A	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'P1	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'P2	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'P3	Podzólicos amarelo	Baixo
PA'P4	Podzólicos amarelo	Médio
PA'P5	Podzólicos amarelo	Baixo
PE5	Podzólico vermelho-escuro	Médio
PE6	Podzólico vermelho-escuro	Médio
PE7	Podzólico vermelho-escuro	Médio
PE8	Podzólico vermelho-escuro	Muito alto
PE9	Podzólico vermelho-escuro	Baixo
PE11	Podzólico vermelho-escuro	Alto
PE12	Podzólico vermelho-escuro	Médio
PL1	Planossolo	Muito alto
PL6	Planossolo	Médio
PL9	Planossolo	Alto
PL20	Planossolo	Médio
PL24	Planossolo	Alto
PL25	Planossolo	Médio

PS1	Planossolo e solonetz solodizado	Muito alto
PS3	Planossolo e solonetz solodizado	Alto
PS4	Planossolo e solonetz solodizado	Alto
PS5	Planossolo e solonetz solodizado	Alto
PS6	Planossolo e solonetz solodizado	Muito alto
PS7	Planossolo e solonetz solodizado	Muito alto
PS8	Planossolo e solonetz solodizado	Muito alto
PS9	Planossolo e solonetz solodizado	Muito alto
PS10	Planossolo e solonetz solodizado	Alto
PS11	Planossolo e solonetz solodizado	Alto
PS12	Planossolo e solonetz solodizado	Alto
PS13	Planossolo e solonetz solodizado	Muito alto
PS14	Planossolo e solonetz solodizado	Alto
PS15	Planossolo e solonetz solodizado	Muito alto
PS16	Planossolo e solonetz solodizado	Muito alto
PV12	Podzólico Vermelho-Amarelo	Alto
PV15	Podzólico Vermelho-Amarelo	Alto
PV17	Podzólico Vermelho-Amarelo	Médio
PV28	Podzólico Vermelho-Amarelo	Médio
PV31	Podzólico Vermelho-Amarelo	Médio
PV36	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV39	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV43	podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV44	Podzólico vermarlho-amarelo	Alto
PV46	Podzólico vermarlho-amarelo	Alto
PV47	Podzólico vermarlho-amarelo	Muito alto
PV49	Podzólico vermarlho-amarelo	Baixo
PV50	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV51	Podzólico vermarlho-amarelo	Alto
PV52	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV53	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV54	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV55	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV56	Podzólico vermarlho-amarelo	Baixo
PV57	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV58	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV59	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV60	Podzólico vermarlho-amarelo	Alto
PV61	Podzólico vermarlho-amarelo	Alto
PV62	Podzólico vermarlho-amarelo	Médio
PV63	Podzólico vermarlho-amarelo	Alto
PV64	Podzólico vermarlho-amarelo	Alto
PV'1	Podzólicos vermelho-amarelo	Médio
PV'2	Podzólicos vermelho-amarelo	Baixo
PV'3	Podzólicos vermelho-amarelo	Baixo
PV'4	Podzólicos vermelho-amarelo	Médio
PV'5	Podzólicos vermelho-amarelo	Médio
PV'6	Podzólicos vermelho-amarelo	Alto
PV'7	Podzólicos vermelho-amarelo	Baixo
PV'8	Podzólicos vermelho-amarelo	Baixo

PV'9	Podzólicos vermelho-amarelo	Médio
PV'10	Podzólicos vermelho-amarelo	Baixo
PV'11	Podzólicos vermelho-amarelo	Baixo
PV'12	Podzólicos vermelho-amarelo	Alto
PV'13	Podzólicos vermelho-amarelo	Médio
PV'14	Podzólicos vermelho-amarelo	Alto
PV'15	Podzólicos vermelho-amarelo	Médio
PV'16	Podzólicos vermelho-amarelo	Médio
PV'17	Podzólicos vermelho-amarelo	Alto
PV'18	Podzólicos vermelho-amarelo	Muito alto
PV'19	Podzólicos vermelho-amarelo	Médio
R1	Solos litólicos	Muito alto
R2	Solos litólicos	Muito alto
R4	Solos litólicos	Muito alto
R5	Solos litólicos	Muito alto
R6	Solos litólicos	Alto
R8	Solos litólicos	Alto
R9	Solos litólicos	Alto
R10	Solos litólicos	Médio
R11	Solos litólicos	Alto
R12	Solos litólicos	Muito alto
R14	Solos litólicos	Muito alto
R17	Solos litólicos	Muito alto
R18	Solos litólicos	Alto
R19	Solos litólicos	Muito alto
R21	Solos litólicos	Muito alto
R22	Solos litólicos	Muito alto
R23	Solos litólicos	Muito alto
R24	Solos litólicos	Alto
R25	Solos litólicos	Muito alto
R26	Solos litólicos	Muito alto
R28	Solos litólicos	Alto
R29	Solos litólicos	Muito alto
R30	Solos litólicos	Alto
R31	Solos litólicos	Muito alto
R32	Solos litólicos	Muito alto
R33	Solos litólicos	Muito alto
R34	Solos litólicos	Muito alto
R35	Solos litólicos	Muito alto
R36	Solos litólicos	Médio
R37	Solos litólicos	Alto
R38	Solos litólicos	Muito alto
R39	Solos litólicos	Muito alto
R40	Solos litólicos	Alto
R41	Solos litólicos	Muito alto
R42	Solos litólicos	Muito alto
R43	Solos litólicos	Muito alto
R45	Solos litólicos	Alto

R46	Solos litólicos	Alto
R47	Solos litólicos	Alto
R48	Solos litólicos	Alto
R49	Solos litólicos	Alto
R50	Solos litólicos	Muito alto
R51	Solos litólicos	Alto
R52	Solos litólicos	Alto
R53	Solos litólicos	Alto
R54	Solos litólicos	Muito alto
R55	Solos litólicos	Muito alto
R56	Solos litólicos	Muito alto
R57	Solos litólicos	Muito alto
R58	Solos litólicos	Alto
R59	Solos litólicos	Muito alto
R60	Solos litólicos	Muito alto
R61	Solos litólicos	Alto
R62	Solos litólicos	Muito alto
R63	Solos litólicos	Muito alto
R64	Solos litólicos	Alto
R65	Solos litólicos	Alto
R66	Solos litólicos	Alto
R67	Solos litólicos	Alto
R68	Solos litólicos	Alto
R69	Solos litólicos	Alto
R70	Solos litólicos	Alto
R71	Solos litólicos	Alto
R72	Solos litólicos	Muito alto
R73	Solos litólicos	Muito alto
R74	Solos litólicos	Alto
R75	Solos litólicos	Muito alto
R10A	Solos litólicos	Médio
R40A	Solos litólicos	Muito alto
R47A	Solos litólicos	Alto
R56A	Solos litólicos	Alto
R56B	Solos litólicos	Alto
R60B	Solos litólicos	Muito alto
R20N	Solos litólicos	Alto
R34N	Solos litólicos	Muito alto
RE3	Regossolo	Baixo
RE7	Regossolo	Baixo
RE8	Regossolo	Médio
RE12	Regossolo	Médio
RE13	Regossolo	Médio
RE14	Regossolo	Alto
RE15	Regossolo	Médio
RE16	Regossolo	Baixo
RE17	Regossolo	Baixo
RE19	Regossolo	Médio

RE20	Regossolo	Alto
RE21	Regossolo	Médio
RE22	Regossolo	Alto
RE23	Regossolo	Alto
RE24	Regossolo	Médio
RE25	Regossolo	Médio
RE26	Regossolo	Médio
RE27	Regossolo	Médio
RE5N	Regossolo	Baixo
RE'1	Regossolo	Baixo
RE'2	Regossolo	Alto
RE'3	Regossolo	Médio
RE'4	Regossolo	Baixo
RE'5	Regossolo	Baixo
RE'6	Regossolo	Médio
RE'7	Regossolo	Médio
RE'3A	Regossolo	Médio
V4	Vertissolo	Médio
V5	Vertissolo	Baixo
V7	Vertissolo	Médio
V8	Vertissolo	Médio
VG	Vertissolo	Baixo

Verificou-se que há municípios no semi-árido de Pernambuco que apresentam LUVISSOLOS em suas unidades de mapeamento de solos semelhantes às unidades das áreas piloto estudadas.

A unidade de mapeamento NC14 é a mais predominante seguida da NC17 nos municípios da área de interesse. A unidade NC14 corresponde à associação de LUVISSOLOS vértico e não vértico mais NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutrófico, textura média com cascalho a cascalhau, ambos A moderado, caatinga hiperxerófila relevo plano a suave ondulado (na proporção 65-35%). A unidade NC17 corresponde a associação de LUVISSOLOS Vértico mais PLANOSSOLOS Solonetz solodizado mais NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutrófico, textura média com cascalho a cascalhau, todos com A moderado, caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado e plano (na proporção 50-25-25%).

Verificou-se que municípios no semi-árido de Pernambuco apresentam NEOSSOLOS LITÓLICOS e PLANOSSOLOS em unidades de mapeamento semelhantes às unidades das áreas estudadas. A unidade de mapeamento PS15 é a mais predominante seguida da PS11 nos municípios do semi-árido pernambucano. A unidade PS15 corresponde à associação PLANOSSOLOS SOLONETZ solodizado

mais NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutrófico, textura média com cascalho a cascalhau, ambos A fr. e moderado, caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado e plano (na proporção 55-45%). A unidade PS11 corresponde a associação PLANOSSOLOS e SOLONETZ SOLODIZADO mais REGOSSOLO Eutrófico e Distrófico solodizado e não solodizado mais NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutrófico, textura arenosa e média com cascalho a cascalhau, todos com A fr e moderado, caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado e plano (na proporção 50-30-20%).

Os solos suscetíveis à desertificação ocupam uma extensão territorial do semi-árido de Pernambuco aproximadamente igual a 33.214 Km² (trinta e três mil duzentos e quatorze quilômetros quadrados). No semi-árido pernambucano a resposta espectral é bastante dependente dos atributos dos solos. A maior parte das informações pedológicas não é identificada diretamente nas imagens, mas sim de informações associadas aos atributos dos solos. Dessa forma foi possível conferir a suscetibilidade dos Luvisolos, Planossolos e Neossolos Litólicos através das áreas indicadas como degradadas nas imagens NEGATIVO.

4.2.4. Mapa de pluviosidade com as áreas degradadas extraídas do mosaico de NEGATIVO/LANDSAT

Este mapa foi adaptado do mapa de pluviosidade de Pernambuco elaborado pelo CPTEC/INPE a partir da média pluviométrica do ano de 2006, representativa para os últimos 15 anos. A média anual da precipitação pluviométrica no sertão de Pernambuco não é maior que 500 mm. No Agreste, a média é 700 mm, dependendo do clima, pode ser menor. Estes baixos índices se concentram no verão. Estes índices contribuem significativamente para o déficit hídrico dos solos da região e conseqüentemente para a degradação dos solos. As chuvas caem de forma rápida e intensa. A força das gotas de água da chuva facilita a erosão hídrica nos solos do Sertão. Este fenômeno contribui para a remoção do horizonte A do perfil do solo.

A Figura 4.15 apresenta este mapa. Os polígonos nas cores vermelha, amarela e magenta correspondem as áreas degradadas extraídas a partir do mosaico de Imagens NEGATIVO/LANDSAT. Observa-se que a maior parte das áreas degradadas estão numa região de baixo índice pluviométrico, variando de 100 a 600 milímetros anuais.

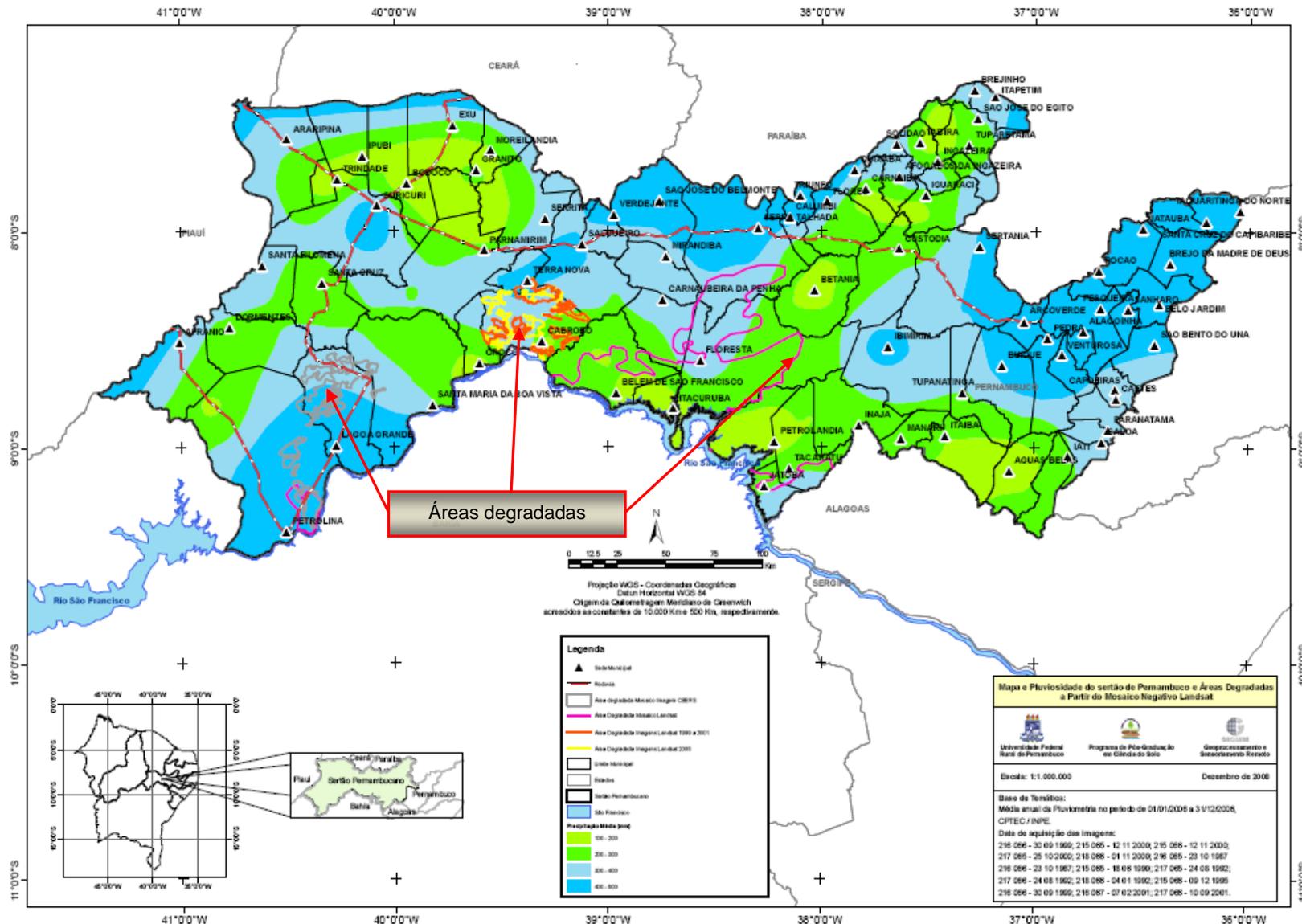


Figura 4.15: Mapa de pluviosidade com as áreas degradadas extraídas do mosaico de NEGATIVO/LANDSAT. Fonte: Adaptado CPTEC/INPE (2006).

Este cruzamento de informações também indica baixo índice pluviométrico em solo degradado que favorece ao déficit hídrico na região, contribuindo para a diminuição de umidade na cobertura vegetal, levando as plantas ao stress hídrico.

Se considerarmos a degradação do solo, tem-se como principal problema a remoção da camada superficial do solo a partir de chuvas concentradas e intensas. Dessa maneira, está sendo retirada a camada mais rica em matéria orgânica. Logo, o solo perde em fertilidade, capacidade de retenção de água e cada vez mais a água da chuva escoar no lugar de infiltrar no solo.

Sendo assim, o solo fica desprotegido, vai sendo erodido, e vai ficando cada vez mais "selado" à infiltração da água. Ou seja, forma uma camada de impedimento à infiltração.

Diante desta situação, tem-se um solo menos fértil, com menor infiltração e retenção da água provocando a diminuição do vigor e da cobertura vegetal. Isto é observado pela maior refletividade do solo identificada nas imagens de satélites.

O solo também ficará ainda mais desprotegido em relação ao impacto das gotas de chuva, que desagregam o solo pela erosão hídrica.

Com a diminuição da cobertura vegetal, a rugosidade da superfície diminuirá, visto que as plantas impedem que a água ganhe muita velocidade. Devido à menor cobertura do solo, ocorre maior evaporação, que implica em menor quantidade de água disponível reduzindo ainda mais a quantidade de plantas por área. Se a quantidade de plantas por área é menor, resulta em mais erosão e mais perdas relacionadas às propriedades físicas e químicas.

Ou seja, é um ciclo que pode ter como o ápice a desertificação. Este ciclo pode ocorrer em regiões onde o clima for seco e o regime de chuvas tiver distribuição irregular como no sertão de Pernambuco.

4.2.5. Mapa de NDVI do semi-árido de Pernambuco a partir de imagens LANDSAT

O NDVI foi calculado a partir das imagens da composição colorida falsa cor bandas 432 em RGB do sensor TM/LANDSAT 5 adquiridas no período de 1990. Os procedimentos realizados para o cálculo do NDVI estão descrito no item 3.3.5.

Na Figura 4.16, ao longo da margem do rio São Francisco aparecem áreas de baixo NDVI. As manchas na cor branca correspondem à nebulosidade que não foi

eliminada devido à quantidade de imagens utilizadas para o cálculo. O NDVI foi calculado para imagens adquiridas em diferentes datas. As manchas na cor verde correspondem às áreas calculadas com alto NDVI. Ou seja, áreas que estão ocupadas por uma maior densidade de cobertura vegetal.

Os pixels com valores de NDVI entre -0.1 e +0.07 receberam tonalidades decrescentes de marrom, variando do mais escuro para o mais claro, representando áreas sem vegetação. Para os pixels com valores entre +0.07 e +0.11 foram adotadas diferentes tonalidades da cor amarela representando áreas inférteis (vegetação verde muito esparsa) e/ou cobertura não sadia (sobre algum déficit hídrico).

Neste mapa os municípios de Cabrobó, Belém do São Francisco, Santa Maria da Boa Vista, Itacuruba, Lagoa Grande, Floresta, Petrolândia, Ouricuri, Santa Filomena, Dormentes, Jatobá, partes de Ibimirim e Inajá apresentam áreas de baixo NDVI. Estas áreas correspondem a áreas possivelmente com cobertura vegetal não sadia, cobertura vegetal com déficit hídrico, áreas inférteis, solos descobertos ou solos rochosos.

O baixo NDVI será cruzado com outros parâmetros relacionados aos processos de degradação visando a geração do mapa de risco de desertificação.

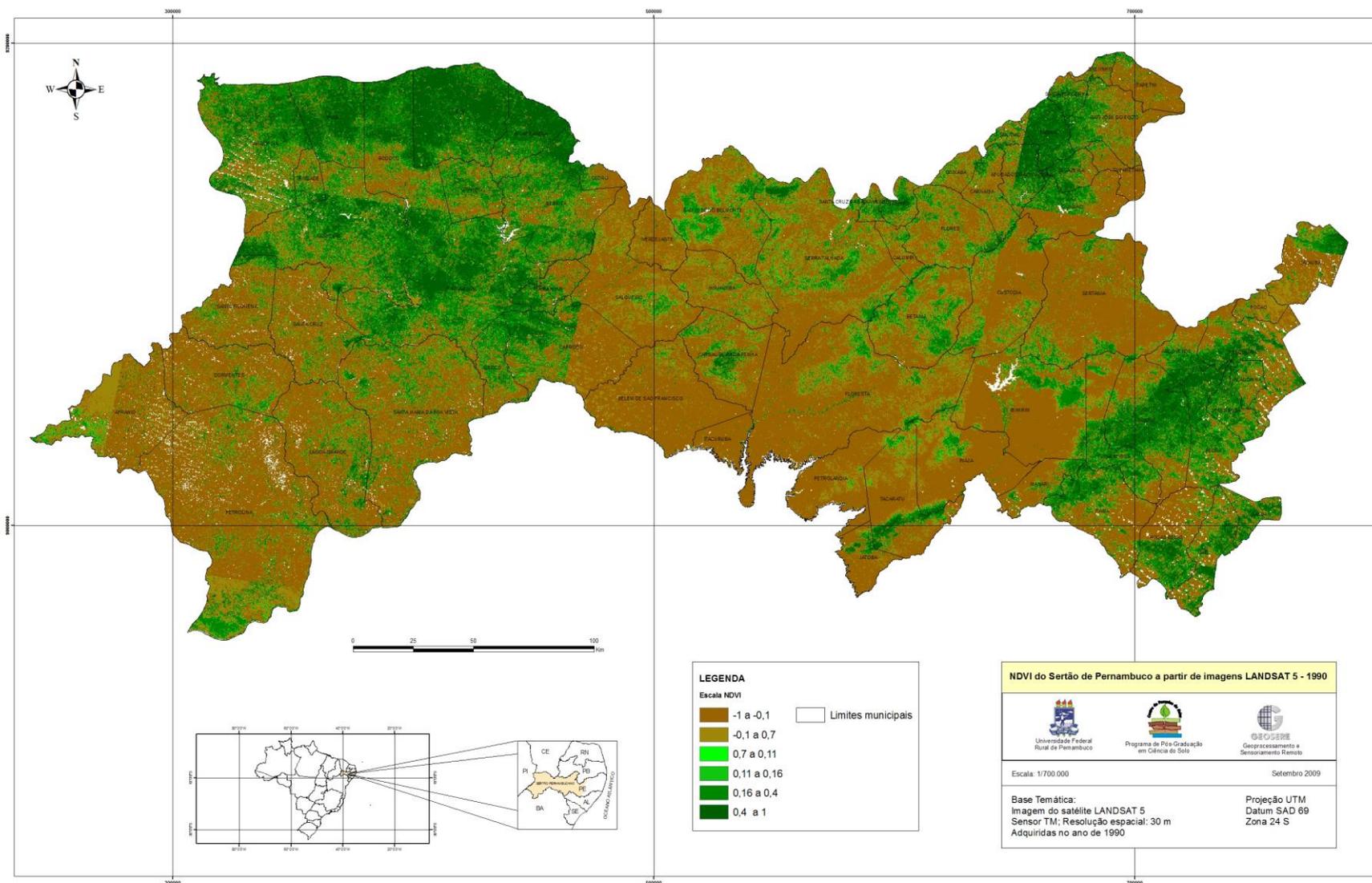


Figura 4.16. Mapa do NDVI a partir do mosaico de imagens LANDSAT 5 do semi-árido de Pernambuco - 1990. Fonte: GEOSERE/UFRPE (2008).

4.2.6. Áreas degradadas a partir de imagens NEGATIVO/LANDSAT com NDVI do semi-árido de Pernambuco

A partir do mosaico NEGATIVO/LANDSAT e do NDVI foi gerado a imagem de áreas degradadas com NDVI do semi-árido de Pernambuco. Os polígonos hachurados em verde correspondem às áreas de alto NDVI e os polígonos hachurados em amarelo correspondem as áreas de baixo NDVI.

Na Figura 4.17, as áreas de baixo NDVI coincidem com as áreas degradadas extraídas do mosaico NEGATIVO/LANDSAT.

É possível verificar que as áreas degradadas extraídas das imagens NEGATIVO/LANDSAT estão sobre áreas de baixo NDVI. Ou seja, as áreas degradadas coincidem com a região de baixo NDVI. Normalmente as áreas de baixo NDVI são áreas que apresentam solos com pouca cobertura vegetal ou solos com déficit hídrico.

Na análise espacial para geração do mapa de risco, o NDVI será cruzado com a pluviosidade. Segundo Braga (2003) tanto pela análise individual de NDVI e das precipitações como pela conjunta NDVI versus precipitação, verifica-se que a resposta da vegetação está bastante associada aos regimes pluviométricos da região Nordeste do Brasil.

Analogamente ao mapa do NDVI e solos suscetíveis a desertificação, as áreas degradadas extraídas do mosaico NEGATIVO/LANDSAT também estão sobre os solos considerados mais suscetíveis à desertificação.

Estas áreas foram separadas das áreas de alto NDVI e identificadas para valores de -0,1 a +0,11 como baixo NDVI.

Isto se deve principalmente pela menor cobertura vegetal e tipo de solos que ocorrem nessas áreas. Conseqüentemente ocorre maior exposição do solo a incidência da radiação solar. Daí resulta maior reflectância do solo aumentando o albedo na área imageada.

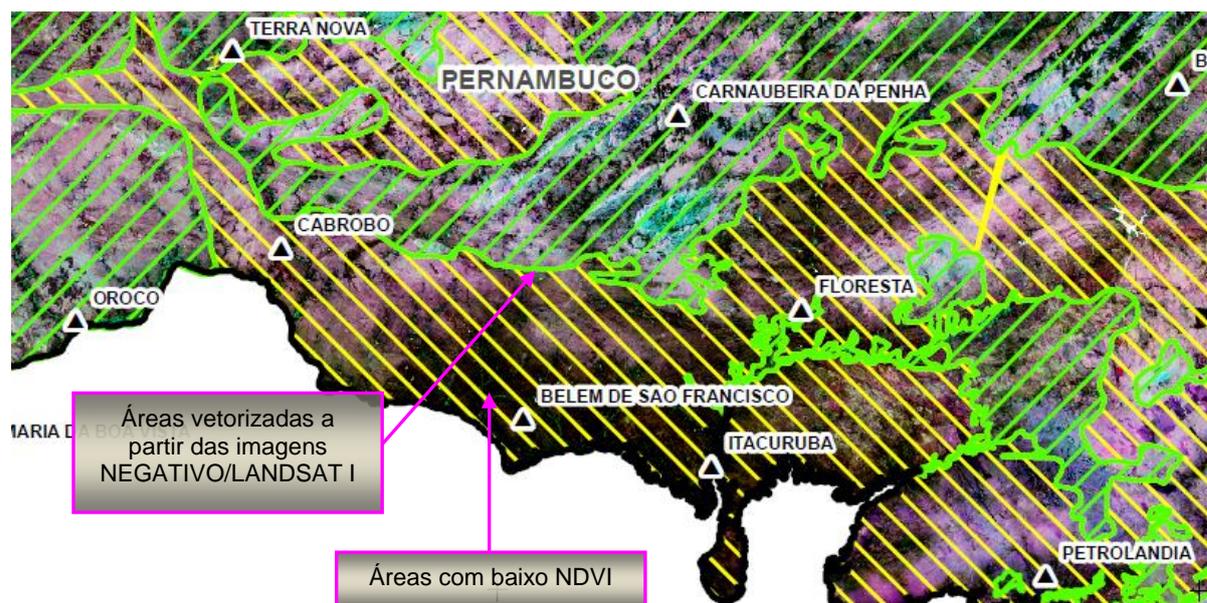


Figura 4.17. Áreas degradadas a partir de imagens NEGATIVO/LANDSAT com NDVI do semi-árido de Pernambuco.

Fonte: GEOSERE/UFRPE (2008).

4.2.7. Mapa de risco de desertificação do Estado de Pernambuco

Este mapa compila o resultado final desta pesquisa. As informações contidas nos mapas apresentados anteriormente foram utilizadas na elaboração do mapa de risco.

Inicialmente foi realizado o cruzamento das informações do mapa de vulnerabilidade de solos do semi-árido de Pernambuco e do mapa das áreas degradadas a partir do mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT. Das bandas espectrais que compõem o mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT foi utilizada a banda 3 para este cruzamento. Esta seleção foi em função das aplicações desta banda espectral (Tabela 3 na Fundamentação Teórica).

Foram realizadas operações de união e interseção espacial na seqüência dos cruzamentos. O primeiro cruzamento resultou da filtragem espacial entre as informações do mapa de vulnerabilidade de solos do semi-árido e dos mapas das áreas degradadas a partir dos mosaicos de imagens NEGATIVO/LANDSAT. O resultado corresponde a extensão territorial do semi-árido de Pernambuco que apresenta áreas degradadas identificadas no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT e nas áreas dos solos suscetíveis à desertificação.

Em seguida, essas informações foram cruzadas com o mapa de pluviosidade. Considerando que a média do índice pluviométrico anual do semi-árido pernambucano é 600 mm. Para esta análise espacial foi considerado essa média. Ressalta-se que este não é um parâmetro determinante da desertificação, mas que contribui com os processos erosivos.

Concomitantemente, a partir de imagens LANDSAT de 1990 e das imagens LANDSAT de 2008, foram gerados mapas de NDVI dos anos de 1990 (Figura 4.16) e 2008 (Figura 4.18). Realizou-se o cruzamento entre os NDVI para extração das áreas que apresentaram baixo NDVI nos períodos imageados. Deste cruzamento resultaram áreas de baixo NDVI.

Para esta análise espacial, foram considerados valores de -0,1 a +0,11 como baixo NDVI. As áreas com solos rasos, rochosos, ou solo exposto, ou áreas inférteis, ou áreas de cultivo em pousio, ou cobertura vegetal não sadia foram consideradas como baixo NDVI. O baixo NDVI também é um reflexo dos processos de degradação na região.

Dependendo da época do imageamento, o comportamento espectral da cobertura vegetal é influenciado pelo solo. Sendo assim, os NDVIs calculados foram influenciados pela época de aquisição das imagens.

Em seguida foi realizado o cruzamento do NDVI com as informações espaciais (áreas degradadas na imagem NEGATIVO/LANDSAT, vulnerabilidade, pluviosidade) obtidas anteriormente.

Assim, utilizaram-se na filtragem espacial, as áreas degradadas no mosaico de imagens NEGATIVO/LANDSAT, o mapa de vulnerabilidade dos solos, o mapa de pluviosidade e o NDVI do semi-árido de Pernambuco. Dessa forma foi possível relacionar características/atributos e ambientes dos solos suscetíveis à desertificação com o comportamento espectral desses solos.

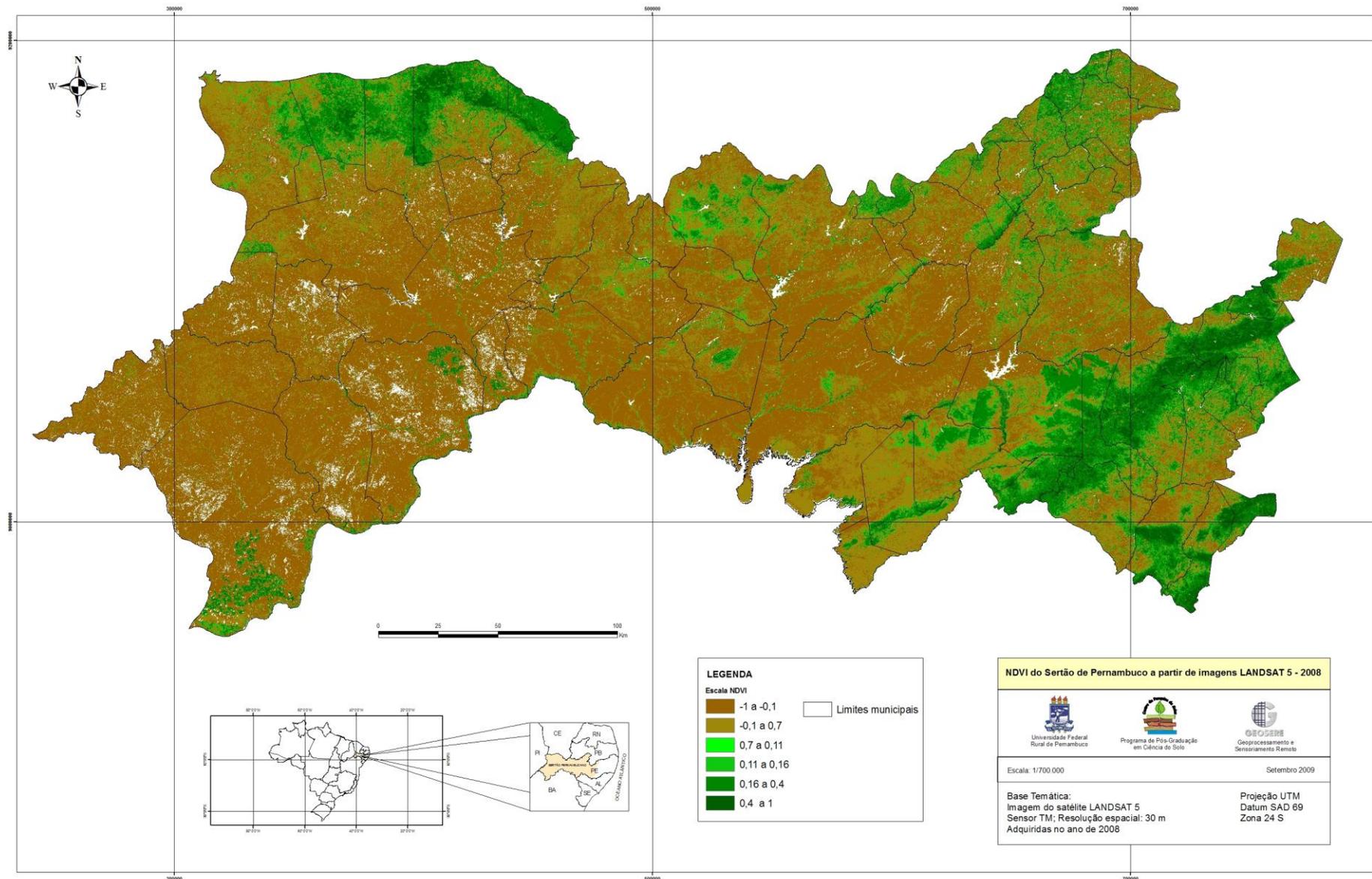


Figura 4.18: Mapa de NDVI do semi-árido de Pernambuco – NDVI a partir das imagens LANDSAT 5 - 2008
Fonte: GEOSERE/UFRPE

A partir dos cruzamentos realizados anteriormente foi possível elaborar o mapa de risco de desertificação do estado de Pernambuco. Os cruzamentos foram realizados dentro do SIGSOLODESERT utilizando as funções de análise espacial do ArcGIS 9.3.

Na elaboração do mapa de risco de desertificação (Figura 4.19) foram definidas classes de risco à desertificação. Estas classes de risco de desertificação estão indicadas por cores na representação temática.

Legenda

Classe	
	R1 – Risco Baixo
	R2 – Risco Médio
	R3 – Risco Alto
	R4 – Risco Muito Alto

Classe R1 – áreas que apresentam risco baixo de desertificação.

Classe R2 – áreas que apresentam risco médio de desertificação.

Classe R3 – áreas que apresentam risco alto de desertificação.

Classe R4 – áreas que apresentam risco muito alto de desertificação.

Classe R1 – áreas que apresentam risco baixo de desertificação: Esta classe foi criada para abranger as áreas onde os processos de desertificação ainda não se manifestaram, considerando que todo semi-árido é uma região onde há risco de desertificação, mesmo em solos de baixa suscetibilidade.

Classe R2 – áreas que apresentam risco médio de desertificação: Nesta classe de risco as áreas contemplam solos com baixo nível de degradação. São áreas classificadas nas imagens NEGATIVO como moderadamente degradadas. Nestas áreas os solos já foram submetidos a processos erosivos que, mesmo em pequena intensidade, ocasionaram perdas em sua constituição como a redução da espessura do horizonte superficial quando comparados à dos solos em áreas da

classe de risco R1. Estas áreas abrangem áreas de solos suscetíveis mais protegidas, ou com solos menos suscetíveis mal manejados.

Classe R3 – áreas que apresentam risco alto de desertificação: Esta classe de risco contempla áreas onde os solos estão em processo de degradação, menos acentuado. São áreas classificadas nas imagens NEGATIVO como degradadas. Os solos desta classe de risco podem apresentar horizonte superficial mais reduzido do que os solos da classe R2, com erosão moderada a severa laminar e em sulcos. Envolvem, geralmente solos suscetíveis como Luvisolos, Planossolos e Neossolos Litólicos.

Classe R4– áreas que apresentam risco muito alto de desertificação: Esta classe abrange áreas onde os solos são altamente suscetíveis à desertificação, como Luvisolos Vérticos e Planossolos Nátricos e áreas onde os processos de desertificação já estão consolidados. São áreas classificadas nas imagens NEGATIVO como gravemente degradadas. Nesta classe de risco os solos já podem ser encontrados com a sua espessura bastante reduzida e o horizonte A completamente reduzido, com erosão severa a muito severa laminar e em sulcos e voçorocas muito frequentes.

No mapa de risco de desertificação do estado de Pernambuco observa-se que o risco à desertificação é mais intenso nas regiões dos municípios de Floresta, Belém do São Francisco, Cabrobó. Essas áreas são ocupadas por solos suscetíveis à desertificação, e continuamente estão sob fortes processos de degradação. Como é o caso das áreas piloto de Floresta e Jataúba que se localizam no sertão e agreste respectivamente

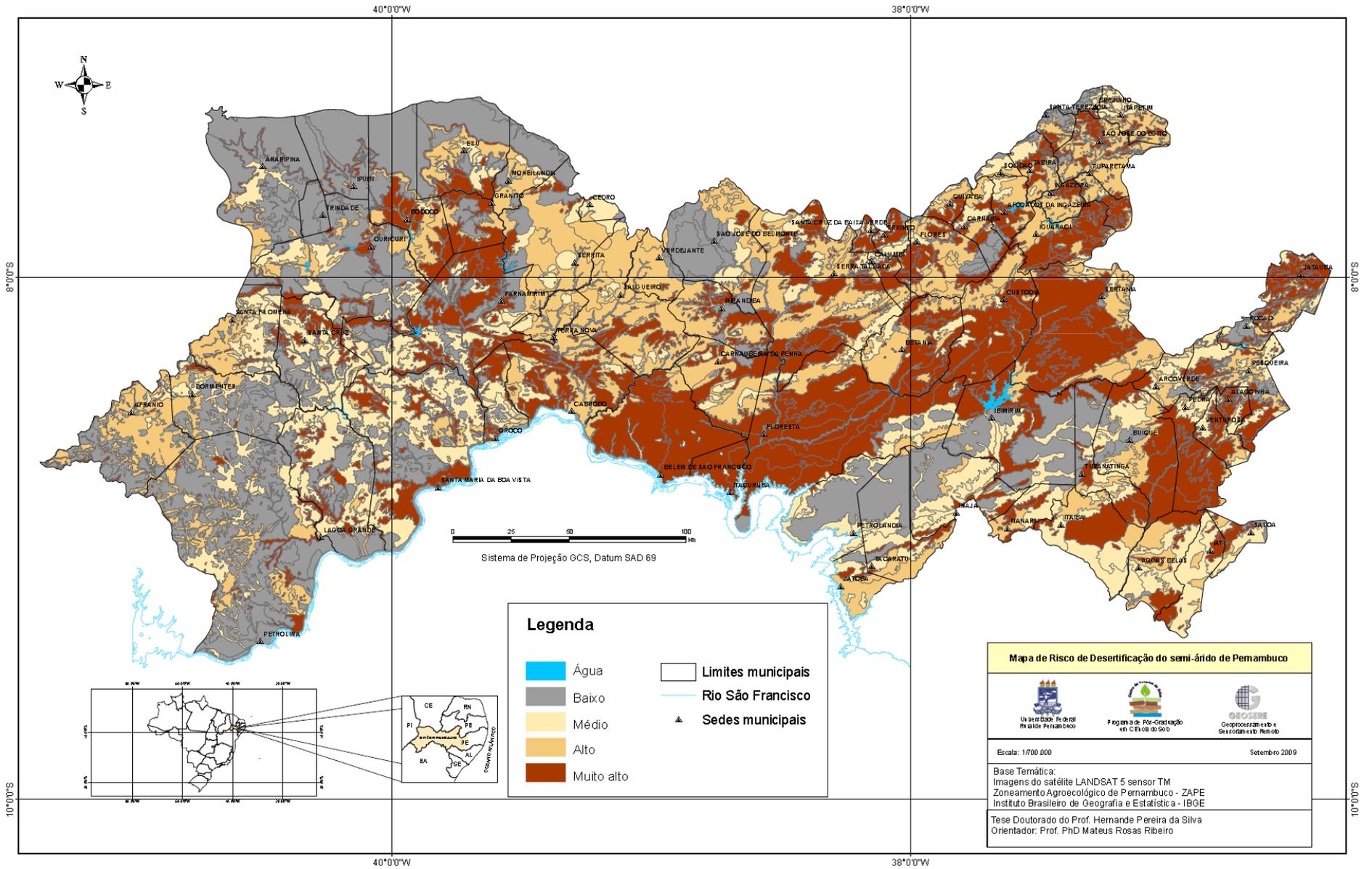


Figura 4.19. Mapa de risco de desertificação de Pernambuco

Ainda através do SIGSOLODESERT foi possível calcular a extensão territorial ocupada por cada classe de risco no semi-árido de Pernambuco. Na avaliação deste cálculo, deve-se levar em consideração o período da Pesquisa. Ou seja, os valores calculados estão fortemente relacionados as datas de aquisição das imagens de satélites.

No quadro abaixo é quantificado a distribuição espacial das classes de risco de desertificação no semi-árido pernambucano considerando a extensão territorial de aproximadamente 74.262,20 Km².

Classe de Risco	Área (Km²)	Área (%)
R1	11.254	15,43
R2	46.355	62,70
R3	6.025	8,25
R4	11.400	15,62

Ao comparar o mapa de solos com este mapa de desertificação de Pernambuco, a classe R1 ocorre em áreas ocupadas por solos não classificados como SSD (solos suscetíveis à desertificação). São áreas ocupadas por Latossolos e outras associações de solos.

A classe de risco R2 aparece no extremo oeste do Estado em áreas ocupadas por associações com predominância de Argissolos, provavelmente submetidas à intensa utilização agrícola. De acordo com a classificação da EMBRAPA Solos (2001), nessas associações ocorrem também, Luvisolos, Planossolos e Neossolos Litólicos em percentuais menores é o que justifica a suscetibilidade destas associações.

Esta classe de risco ocupa a maior parte (62,70%) da área de estudo, evidenciando que os solos submetidos aos processos de desertificação estão em um grau moderado de degradação. O que pode ser combatido dentro de um conjunto de ações que contribuam para a desaceleração ou estagnação do processo

A classe de risco R3 ocupa apenas 8,25% da área estudada. Este resultado ratifica a análise supracitada em relação à classe de risco R2. Demonstra também

que a suscetibilidade dos solos estudados é alta e a degradação ocorreu de forma rápida e intensa dentro da análise espaço-temporal. Desta forma pode-se esperar que as áreas classificadas na classe R3 passem para a classe R4 mais rapidamente.

Considerando a maior ocorrência da classe R4 em áreas geograficamente distantes entre si e o mapa de solos do estado de Pernambuco, verifica-se que a ocorrência desta classe de risco é em áreas ocupadas por Planossolos, Luvisolos e Neossolos Litólicos. Isto ratifica o que vários autores afirmaram em relação a estes solos. Ou seja, que estes solos são bastante suscetíveis à desertificação.

Pode-se afirmar que um dos fatores mais importantes no mapeamento da desertificação em Pernambuco é a classe de solos. Isto se verifica na distribuição espacial das classes de risco de desertificação.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos a partir da metodologia aplicada foi possível chegar às seguintes conclusões:

- 1 Os produtos e as técnicas de sensoriamento remoto se mostraram adequadas para estudos sobre desertificação no semi-árido pernambucano.
- 2 Mesmo com diferentes resoluções espaciais, as imagens dos sensores TM/LANDSAT 5, ETM⁺/LANDSAT 7 (30 metros) podem compor uma série histórica de imagens visando estudos de análise temporal, pois as faixas espectrais destes sensores/satélites são bastante similares..
- 3 A cobertura de nuvens ainda é a maior dificuldade em pesquisas que necessitam de uma série histórica de pelo menos 10 anos de observação da terra. Os sensores multiespectrais que trabalham nas faixas do visível e infravermelho próximo estão sujeitos a esta limitação da natureza
- 4 Considerando que solos sob processos erosivos normalmente apresentam elevado albedo, o que torna a imagem “carregada” de brilho dificultando a discriminação dos alvos, a aplicação da operação de contraste NEGATIVO permitiu discriminar melhor digitalmente as áreas de interesse, do que outras operações de contraste testadas. As imagens NEGATIVO discriminaram bem as feições digitais relativas aos processos de degradação do solo, permitindo a classificação das áreas em moderadamente degradada, degradada e gravemente degradada.
- 5 Considerando independentemente os diferentes relevos e diferentes índices pluviométricos para cada região (agreste e sertão), os processos de degradação foram identificados nas duas áreas piloto (Floresta e Jataúba), ratificando a influência do tipo de solo no processo de desertificação.
- 6 Mesmo em regiões diferentes, as áreas piloto de Floresta (Sertão) e Jataúba (Agreste) apresentaram expansão do processo de desertificação no período considerado.

7 Os atributos dos Luvisolos e Planossolos contribuem para uma alta refletância espectral. São solos rasos com pouco grau de desenvolvimento pedogenético, mudança textural abrupta, mal drenados, com baixa infiltração, predominância de horizontes superficiais pouco espessos, textura arenosa ou média, reduzido teor de matéria orgânica, alto nível de dispersão e estrutura pouco desenvolvida em superfície. Apresentam também, em sua composição presença de minerais de alta refletância espectral como o quartzo.

8 As características espectrais resultantes da análise espacial das imagens das áreas ocupadas por Luvisolos, Planossolos e Neossolos Litólicos levam a conclusão de que estes solos são suscetíveis à desertificação.

9 O cruzamento das informações de NDVI, índice pluviométrico permitiu referendar as áreas vetorizadas nas imagens NEGATIVO como áreas ocupadas por solos submetidos as condições ambientais favoráveis aos processos de desertificação.

10 O sistema de informações geográficas utilizado nesta pesquisa, o SIG'SOLODESERT, foi uma ferramenta poderosa na armazenagem de dados, geração e manipulação de informações relacionadas ao tema da pesquisa. 1

11 O resultado final desta pesquisa, o mapa de risco à desertificação do estado de Pernambuco, permite a indicação de áreas para desenvolvimento de estudos mais detalhados visando gerar informações em nível de campo sobre os processos de desertificação.

12 Uma informação que pode acurar mais os resultados na geração do mapa de risco é o cálculo do NDVI. Tendo-se imagens de satélites diárias poderão ser geradas composições mensais. Isto diminui a influência da cobertura de nuvens e conseqüentemente maior confiabilidade no NDVI.

13 A metodologia desenvolvida nesta pesquisa pode ser aplicada para outras áreas do semi-árido nordestino, desde que sejam observados os critérios de interpretação utilizados e a disponibilidade de imagens de satélites com a menor cobertura de nuvens possível e radiometrias similares.

BIBLIOGRAFIA

- ACCIOLY, L. J. O.; OLIVEIRA, M. A. J. Indicadores de processos de desertificação. In: Romeiro, A. R. (Ed.). **Avaliação e Contabilização de Impactos Ambientais**. Campinas: Editora Unicamp, 2004. p. 123-141.
- ACCIOLY, L. J. O. ; COSTA, T. C. C. ; OLIVEIRA, M. A. J. ; SILVA, F. H. B. B. ; BURGOS, N. O Papel do Sensoriamento Remoto na Avaliação e no Monitoramento dos Processos de Desertificação do Semi-Árido Brasileiro In: I Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aracaju/SE **Anais...** Aracaju, 17 e 18 de outubro de 2002.
- ACCIOLY, J. L. O.; OLIVEIRA, M. A. J.; SILVA, F. H. B. B.; BURGOS, M. Avaliação de mudanças no albedo do núcleo de desertificação do Seridó através de Imagens do LANDSAT TM. X SBRS, Foz do Iguaçu/PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2001.
- ACCIOLY, L. J. O. Degradação do solo e desertificação no Nordeste do Brasil. **Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 25, n. 1, p.23-25, 2000.
- AHLRICH, J. S.; BAUER, M. E. Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. **Agronomy Journal**, v. 75, p. 987-993, 1983.
- ALSDORF, D.E.; MELACK, J.M.; DONNE, T.; MERTES, L.A.K.; HESS, L.L.; SMITH, L.C. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. **Nature**, v. 404, letters, p. 174-177, 2000.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. de. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Agriambi**, Campina Grande, v. 5, n.1, p. 124-130, 2001.

AOUAD, M. S. ; CONDORI, R. V. Desertificação no Estado da Bahia: levantamento preliminar de áreas vulneráveis. In: Seminário sobre Desertificação no Nordeste, 1986, Brasília/DF. **Anais...** Brasília: Ministério do Desenvolvimento.

ARAÚJO FILHO, J. A. de, SOUSA, F. B. de, SILVA, N. L. da, BEZERRA, T. S. Avaliação de leguminosas arbóreas para recuperação de solos e repovoamento em áreas degradadas, Irauçuba-CE. Rev. **Bras. de Agroecologia**. Vol.2 Nº 2, 2007.

ARAÚJO FILHO, J. C. de; SILVA, A. B. da; SILVA, F. B. R. e; LEITE, A. P. **Diagnóstico Ambiental do Município de Floresta, Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2001. Disponível em:
<<http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/pdfs/circular tecnica10diagambfloresta.pdf>>.
Acesso em 10 de julho de 2007.

ARAÚJO FILHO, J. C. de; *et. al.* Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. In: Cintra, F. L. D.; Anjos, J. L. dos; Ivo, W. M. P. (org.) Workshop Coesão em Solos dos Tabuleiros Costeiros, 2001, Aracaju/SE. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001, p.123-139.

ARAÚJO, Q. R.; ARAÚJO, M. H. S.; SAMPAIO, J. O. **Análise do risco de erosão em microbacias hidrográficas: estudo de caso das bacias hidrográficas dos rios Salomé e Areia, sul da Bahia**. In: Schiavetti, A.; Camargo, A. F. M. (Org.) Conceito de bacias hidrográficas: Teorias e aplicações. Ilhéus: EDITUS, 2002. p.163-177.

ARAÚJO, T. L. & DI PACE, F. T. Determinação da temperatura instantânea da superfície terrestre da cidade de Maceió-Al, com base em imagens TM - LANDSAT 5. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis/SC, **Anais...** Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3717-3724.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- BARDALES, N. G.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F. do; MELO, A. W. F. de; ARAÚJO, E. A.; ROSADO, J. F. Uso de imagens SRTM na elaboração de mapas de solos na região do vale do baixo Rio Iaco, Acre, Brasil. **XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – Conquistas e Desafios da Ciência do Solo Brasileira**. Serrano Centro de Convenções, Gramado-RS. De 05 a 10 de agosto de 2007.
- BARRON, V.; TORRENT, J. Use of the Kulbelka-Munk theory to study the influence of iron oxide on soil color. **Journal of Soil Science**, Ottawa, v.37, p.449-510, 1986.
- BASTIAANSEN, W. & BAKKER, M. **Use of satellite data in agricultural water management**. EMBRAPA semi-árido. 2000.
- BAUER, M. E.; DAUGHTRY, C. S. T.; VANDERBILT, V. C. Spectral –agronomic relationships of maize, soybean, and wheat canopies. In: Proc. Int. Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Avignon, 1981. **Anais...** 1981, p. 261-272.
- BAUMGARDNER, M.F. et al. **Effects of organic matter on the multispectral properties of soils**. Proceedings Indiana Academy of Science, Brookville, v.79, p.413-422, 1970.
- BEN-DOR, E. et al. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400- 2500) during a controlled decomposition process. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.1-15, 1997.
- BERTOL, D. LEITE, J. C. GUADAGNIN & S. R. RITTER. Erosão hídrica em um nitossolo háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. II – perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:1045-1054, 2004.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone Editora, 3 ed. 1990. 355p.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- BEZERRA, M. V. C. **Balço de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto**. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2004.
- BRAGA, C. C.; de BRITO, J.I; SANSIGOLO, C.A e RAO, T.V.R. Tempo de Resposta da Vegetação às Variabilidades Sazonais da Precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, n.1, p.149-157, 2003.
- BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**,n.32, p. 385- 415, (2000).
- BOGNOLA, I. A. et al. **Caracterização dos Solos do Município de Carambeí, PR**. Rio de Janeiro; Embrapa – Solos, 2002. 75p. – (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 8).
- BOWERS S. A. & HANKS R. J. Reflectance radiant energy from soils. **Soil Science**. Baltimore, v 100, p 130 – 138, 1965.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. "SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling" **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.
- CÂMARA, G. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica .Pg157-183, In: **IV Conferência Latinoamericana sobre Sistemas de Informação Geográfica**, São Paulo, p. 157-183, 1993.
- CARVALHO, S. R. de; FILHO, S. T. C.; ARONOVICH, S.; PALMIERI, F.; DIAS, P. F.;SILVA, J.N da. **Recuperação de áreas degradadas**. Boletim de pesquisa. 18ª. Embrapa Solos, 2000.
- CARVALHO, V.C. **Structure et dynamique de la vegetation en milieu tropical semi-aride. La Caatinga de Quixabá (Pernambouc, Brésil) du terrain a**

SILVA, H.P.

Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites

l'analyse des données MSS/LANDSAT. São José dos Campos. 332p. (INPE-4049-RPE/524). Tesis (Doctorat) - Université de Toulouse-Le Mirail. INPE, 1986.

COLEMAN, T.L. et al. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. **Soil Science**, Baltimore, v.151, p.355-361, 1991.

COLEMAN, T.L.; MONTGOMERY, O.L. Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristics of selected vertisols and alfisols in Alabama. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v.53, p.1659- 1663, 1987.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. **Diagnóstico do município de Floresta, estado de Pernambuco** / Organizado [por] João de Castro Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Junior, Manoel Julio da Trindade G. Galvão, Simeones Neri Pereira, Jorge Luiz Fortunato de Miranda. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

DALMOLIN, R.S. D., GONÇALVES C. N., KLAMT E., DICK D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.2, p.481-489, ISSN 0103-8478 mar-abr, 2005.

DALMOLIN, R. S. D. KLAMT, E.; PEDRON, F. de A. et al. Relação entre as características e o uso das informações de levantamentos de solos de diferentes escalas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1479 – 1486, 2004.

DEMATTÊ, J.A.M. et. al. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soil. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.187-200, 2004a.

DEMATTÊ, J.A.M. et al. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdam, v.121, p.91-112, 2004b.

DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.327- 342, 1999.

DI PACE, F. T. **Estimativa do balance de radiação a superfície terrestre utilizando imagens TM-LANDSAT-5, modelo de elevação digital.** 2004. Tese (Doutorado). DCA/UFCG. Campina Grande.

DREGNE, H. E. Desertification of arid lands. **Harwood Academic Publishers.** New York, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo.** São José dos Campos: INPE, 1992. 132p. (INPE-5424-PRP/172).

ESCADAFAL, R. et al. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of LANDSAT MSS and TM data. **Remote Sensing Environment**, New York, v.27, p.37-46, 1989.

FAO - **Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Penman-Monteith** - 1998. 78 p.

FERNANDES, A. **Fitogeografia brasileira.** Fortaleza: Multigraf Editora. 1998.

FERNANDEZ, R.N.; SCHULZE, D.G. Calculation of soil color from reflectance spectra. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.1277-1282, 1987.

FERRAZ, J. S. F.; ALBUQUERQUE, U. P. de; MEUNIER, I. M. J. Valor de uso e estrutura da vegetação lenhosa às margens do riacho do navio, Floresta, PE, Brasil. São Paulo: **Acta Bot. Bras.** Vol. 20 n. 1, 2006.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- FERREIRA, D.G.; MELO, H.P.; NETO, F.R.R.; NASCIMENTO, P.J.S.; RODRIGUES, V. Avaliação do quadro da desertificação no Nordeste do Brasil: diagnósticos e perspectivas. **Anais da Conferência Nacional da Desertificação**, Fortaleza, 1994. Brasília, Fundação Esquel Brasil. p.7-55. 1994.
- FILHO, J. C. de Araújo et al. **Diagnóstico Ambiental do Município de Floresta, Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2001. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/pdfs/circular tecnica10diagambfloresta.pdf>>. Acesso em 10 de novembro de 2007.
- FORMAGGIO, A.R. et al. Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.467-474, 1996.
- FRANCO, A. A; CAMPELO, E. F.; SILVA, E. M. R. da; FARIA, S. M. de. **Revegetação de solos degradados**. Comunicado técnico número 9, CNPAB EMBRAPA. 1992.
- FUNCEME, CEARÁ. **Cobertura Vegetal e Antropismo do Estado do Ceará: Uma Abordagem Utilizando Imagens T.M – LANDSAT**. Fortaleza. 1993.
- GALINDO, I.C.L. **Relação solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no estado de Pernambuco**. 2007. 255f. Tese de Doutorado em Ciência do Solo. UFRPE. 2007.
- GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.19, p.1969-1979, 1998.
- GAUSMAN, H. W.; GERBERMANN, A. H.; WIEGAND, C. L.; LEAMER, R. W.; RODRIGUEZ, R. R.; NORIEGA, J. R. Reflectance differences between crop residues and bare soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 39, n. 4, p. 752-755, 1975.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- GHERARDI, B.; FARIA, L.E.O. de.; COOPER, M.; VALIANTE, T.C. 2005. **Caracterização dos Solos da Estação Experimental Agrozootécnica Hildegard Georgina Von Pritzelwits com o uso de imagens orbitais e aéreas.** Universidade de São Paulo – USP/ESALQ, Piracicaba-SP. p. 1-8.
- 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.
- HARTMANN, D.L. **Global Physical Climatology**, San Diego, CA, Academic Press. 1994.
- HENDERSON, T.L. et al. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.865-872, 1992.
- HENDERSON, T.L. et al. Spectral band selection for classification of soil organic matter content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.1778-1784, 1989.
- HOFFER, R.M.; JOHANNSEN, C.J. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: JOHNSON, P.L. (Ed.). **Remote sensing in ecology**. Athens : University of Georgia Press, 1969. p.1-19.
- HOLBEN, B.N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.7, n.11, p. 1417-1434, mês. 1986.
- HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.
- HUETE, A. R.; JACKSON, R. D.; POST, D. F. Spectral Response of a Plant Canopy with Different Soil Background. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, p. 37-53, 1985.

JACOMINE, P. K. T. Solos sob caatingas – características e uso agrícola In: ALVAREZ, V.H.; FONTES, L.E.F; FONTES, M.P.F. (eds). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG. SBCS; UFV, DPS, 1996. p. 95-111.

JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; BURGOS, N. & PESSOA, S. C. P. **Levantamento explanatório – reconhecimento de solos do estado de Pernambuco**. Recife, MA/DNPEA – SUDENE/DRN, 1973. v.1. (Boletim Técnico, 26).

JATOBÁ, L. Geologia e recursos minerais. In: **Atlas escolar pernambucano: espaço geo-histórico e cultural**. Andrade, M. C. de O (coordenador). João pessoa: Grafset, 2003. 160p.

JENSEN, J R. **Introductory digital image processing**. Englewood Cliffs: Prentice - Hall, 1986. 51 p.

KASSAR, M.C.M. **Ciência e senso comum no cotidiano das classes especiais**. Campinas: Papirus, 1995.

KRISHNAN, P. et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.1282-1285, 1980.

LAMEPE - **Laboratório de Meteorologia de Pernambuco**. Disponível em: <<http://www.itep.br/LAMEPE>>. Acesso: 20 jun. 2008.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos, RiMa. São Paulo. 529p-531p. NIMER, E. 1977. Clima. Pp 47-48 in: IBGE. Geografia do Brasil; região Nordeste. Rio de Janeiro. 2000.

LAW, B.E. Estimation of leaf area index and light intercepted by shrubs from digital videography. **Remote Sensing Environment**, v.51, n.2, p. 276-280, 1995.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- LEITE, F.R.B.; SOARES, A.M.L.; MARTINS, M.L.R. Áreas degradadas susceptíveis aos processos de desertificação no Estado do Ceará. Conferência Nacional da Desertificação, Fortaleza. Brasília/DF, **Anais...** Brasília, Fundação Esquel Brasil. p.73-78. 1994.
- LEPRUN, J.C. **Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo no Nordeste brasileiro (1982 - 1983)...** Recife-PE: SUDENE-DRN, 1986. 271p.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation.** John Wiley & Sons, Inc. Second Edition. New York. 1987.
- LIMA, H.V.; LIMA, C.L.R.; LEÃO, T.P.; COOPER, M.; SILVA, A.P. & ROMERO, R.E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. Revista: **Brasileira Ciência do Solo**, 29:677-684, 2005.
- MASCARENHAS, J. C.; et al. (Org). **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Diagnóstico do município de Floresta, estado de Pernambuco.** Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.
- MATALLO JÚNIOR, H. **Indicadores de desertificação: histórico e perspectiva.** Brasília: Unesco, 2001.
- MATHEWS, H. L. et al. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.37, p.421-424, 1973a.
- MATTIKALLI, N. M. Soil color modeling for the visible and near-infrared bands of LANDSAT sensors using laboratory spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.59, p.14-28, 1997.
- MENDES, B.V. Desertificação do semi-árido. In: SEMINÁRIO SOBRE DESERTIFICAÇÃO NO NORDESTE. Fortaleza/CE, 1986. **Anais...** Fortaleza, 1986. p.111-115.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC**. Brasília. 2000. 32 p.
- MORAN, M. S., R. D. Jackson, G. F. Hart, P. N. Slater, R. J. Bartell, S. F. Biggar, D. I. Gellman, and R. P. Santer, **Obtaining surface reflectance factors from atmospheric and view angle corrected SPOT-1 HRV data**, Rem. Sens. Env., 1990.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. São José dos Campos: Ed. Com Deus, 2001. 250 p.
- NERY J. T., FACHINI M. P., TANAKA L. K., PAIOLA L. M., MARTINS M. L. O. F., BARRETO L. E. G. S., TANAKA I. Caracterização das precipitações pluviométricas mensais para os Estados de Alagoas, Pernambuco e Sergipe. ISSN 1415-6814. **Acta Scientiarum** 20(4):515-522, 1998.
- NICHOLSON, S. E.; DAVENPORT, M. L; MALO, A. R.; A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and east Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR, **Climatic Change**, 17, pag. 209-241, 1990.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: SUPREN: IBGE, 1979.
- NOBRE, C. A.; MASSAMBANI, O.; LIU, W. T. Variabilidade climática na região semi-árida do Brasil e monitoramento de secas através de satélite. In: Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semi-Áridas – ICID, 1992, Fortaleza/CE. **Anais...** Fortaleza: ICID, 1992. p.3159-3195.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 1989.

- PACHECO, A. P.; FREIRE, N. C. F. F. & BORGES, U. da N. **Aplicador do Sensoriamento Remoto para Identificação de Áreas Passíveis de desertificação numa Porção do Semi-Árido Brasileiro**. Recife: Geodésia online, março de 2006. Disponível em:
<http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/2006/03.1/PFB-2006.htm#5> acesso em: 10 de julho de 2007.
- PAN-BRASIL - **Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca: PAN-Brasil**. – Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos, 2004. 242p.
- PIRES, L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo** - Tese de Doutorado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA). USP. 2006.
- POST, D.F. et al. Relations between soil color and LANDSAT reflectance on semiarid rangelands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1809-1816, 1994.
- POST, D.F. et al. Correlations between field and laboratory measurements of soil color. In. BIGHAM, J.M.; CIOLKOSZ, E.J. **Soil Color**. Madison : SSSA, p.35-49. (Special Publication, 31). 1993.
- RAJOT, J. L., ALFARO, S. C., GOMES, L., and GAUDICHET, A.: **Influence of sandy soil crusting on horizontal and vertical wind erosion fluxes**, *Catena*, 53(1), 1–16, 2003.
- REINERT, D. J. e REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo**. Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria. 2006.
- RESENDE, M. **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil**. 1976. 237f. Thesis (PhD in Soil Science) – Purdue University.1976.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- RIBEIRO, M. T. **Fácies microclásticas de um sistema lacustre oligocênico do sudeste do Brasil (Formação Tremembé, Bacia de Taubaté)**. 2004. 122f. Programa de Pós-graduação. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2004.
- RICHÉ, G.R.; SÁ, I.B.; FOTIUS, G.A. **Zoneamento das áreas em processo de degradação ambiental no trópico semi-árido do Brasil. Brasília-DF. PROJETO ARIDAS**, Secretaria do Planejamento da Presidência da República, SEPLAN, PR. 1994. GTI – Recursos Naturais e Meio Ambiente, Vol. 1.2 – Condições do uso e perspectiva de uso sustentável dos geoambientes do Semi-Árido.
- RIBEIRO, M.R.; FREIRE, F.J.; MONTENEGRO, A.A.A. **Solos halomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável**. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. (eds) Tópicos em ciência do solo. Viçosa MG, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2003. v.3, p.165-208.
- RIBEIRO, M.R.; SANTOS, M.C.D. & FERREIRA, M.G.V.X. Caracterização e gênese de Podzólicos Vermelho-Amarelos do sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:75-81, 1991.
- ROBINOVE, C. J.; CHAVEZ, P. S.; GEHRING, D.; HOLMGREN, R. Arid Land Monitoring Using LANDSAT Albedo Difference Images. **Remote Sensing of Environment**. v. 11, p. 133-156. 1981.
- RODAL, M. J. N. SAMPAIO, E. V. S. B. **A vegetação do Bioma Caatinga**. In: SAMPAIO, E. V. S. B. GIULIETTI, A. M. VÍRGINIO, J. GAMARRA-ROJAS, C. F. L. Vegetação e Flora da Caatinga. Recife: APNE/CNIP, 2002. p.11-24.
- RODRIGUES, V.; MATALLO JÚNIOR, H.; LINHARES, M.C.; GALVÃO, A.L.C.; GORGÔNIO, A.S. **Avaliação do quadro de desertificação no Nordeste do Brasil: diagnóstico e perspectivas**. In Gomes, G.M.; Souza, H.R.; Magalhães, A.R. Desenvolvimento sustentável no Nordeste. Brasília, IPEA. 1995.

- RODRIGUES, W. **Pesquisa dos estudos e dados existentes sobre desertificação no Brasil**. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Combate à Desertificação. PROJETO BRA 93/036. 1997. 65p.
- VIANA, M.; RODRIGUES, M. Um índice interdisciplinar de propensão à desertificação (IPD): instrumento de planejamento. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 30, n. 3, p.264-294, jul.-set. 1999.
- SÁ, I. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, A. S. Desertificação na região de Cabrobó-PE: a realidade vista do espaço. In: Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 3. 2006, Aracaju/SE. **Anais...** Aracaju: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr3/artigos_pdf/038_t.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2008.
- SÁ, I. B.; SÁ, I. I. da S.; SILVA, A. de S. Desertificação na Região de Cabrobó-PE: A Realidade Vista do Espaço. In: III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aracaju/SE, **Anais...** Aracaju, 25 e 27 de outubro de 2006.
- SÁ, I.B.; RICHÉ, G.R.; FOTIUS, G.A. Degradação ambiental e reabilitação no trópico semi-árido brasileiro. **Anais da Conferência Nacional da Desertificação**, Fortaleza, 1994. Brasília, Fundação Grupo Esquel Brasil. p.310-331. 1994.
- SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, M. do S. B. Desertificação no Nordeste do Brasil. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30. 2005. Recife. **Palestra**. Recife: UFPE/SBCS, 2005. CD-ROM.
- SAMPAIO, E. V. S. B.; SAMPAIO, Y. Documento 1. **Desertificação: conceitos, causas, conseqüências e mensuração in Avaliação de Tecnologias Atuais e Alternativas em Áreas em Processo de Desertificação no Semi-árido Nordestino Brasileiro**. FINEP. Recife. 2002.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- SCHÄFER, M. J.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; CASSOL, E. A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2, p. 431- 441, abr./jun. 2001.
- SCHULZE, D.G. et al. Significance of organic matter in determining soils colors. In. BIGHAM, J.M.; CIOLKOSZ, E.J. **Soil Color**. Madison : SSSA, p.71-90. (Special Publication, 31).1993.
- SCHOWENGERDT, R. A. **Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. University of Arizona. 1983. 249p.
- SCHWERTMANN, U. Relations between iron oxides, soil color and soil formation. In. BIGHAM, J.M.; CIOLKOSZ, E.J. **Soil Color**. Madison: SSSA, p.51-69. (Special Publication, 31). 1993.
- SILVA, F. B. R.; SANTOS, J. C. P. ;SILVA, A. B. *et al.* **Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco**. Embrapa Solos. Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento - UEP Recife, 2001. (CD-ROM).
- SILVA, H. P., SANTOS, F. M. S., MEDEIROS, R. C., SILVA, A. P. N; RIBEIRO, M. R. **Dados correlacionados de pluviometria e temperatura da superfície do solo no município de Floresta, Pernambuco visando estudo de desertificação. III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto – Geonordeste**. Aracaju, 2006.
- SILVA, L. F. **Radiation and instrumentation in remote sensing**. In: Swain, P. H.; Davis, S. M. McGraw-Hill. Remote sensing: the quantitative approach. New York, McGraw-Hill, 1978.
- SILVA, J. R. C.; SILVA, F. J. da. Produtividade de um solo litólico associado ao controle de erosão por cordões de pedra em contorno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.435-440, 1997b.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- SLATER, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1980.
- SOARES, A.M.L.; LEITE, F.R.B.; LEMOS, J. de J.S.; MARTINS, M.L.R.; MAYORGA, R.D.; OLIVEIRA, V.P.V. de. Áreas degradadas susceptíveis aos processos de desertificação no estado do Ceará – Brasil. In: Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semi-Áridas – ICID, 1992, Fortaleza/CE. **Anais...** Fortaleza: ICID, 1992. p.1-24.
- SOBRINHO, J. V. **Identificação de processo de desertificação no polígono das secas do Nordeste brasileiro**. Recife, SEMA/SUDENE, Departamento de Desenvolvimento Local, Divisão de Saneamento Geral, 1978.
- SOBRINHO, J. V. **Processos de desertificação ocorrentes no Nordeste do Brasil: Sua gênese e sua contenção**. Recife, SEMA/SUDENE, 1982. 101p.
- STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C.; GAMA, F. F. Radiometria Óptica Espectral. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 8., 1996, Salvador/BA. **Anais...** Salvador: INPE, 1996.
- STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. **Radiometria Espectral. In: Tutorial em Radiometria**. VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10-14 de Maio, 1993, Curitiba, Brasil.
- STONER, E.R. et al. Discriminação espectral de Latossolos do Planalto Central brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, p.1599-1606, 1991.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Data acquisition through remote sensing. In: BEATTY, M.T. et al. Planning the uses and management of land. Madison : Soil **Science Society of America**, 1986. p.159-185.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.45, p.1161-1165, 1981.
- STONER, E.R. et al. **Atlas of soil reflectance properties**. West Lafayette : Purdue University, 1980. 75p.
- STONER, E.R. **Physicochemical, site and bi-directional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils**. 1979. 132p. Thesis (PhD in Soil Science) - Purdue University. 1979.
- The UN - Convention to Combat Desertification (UNCCD): Possible Ways of Combating Global Land Degradation**. [On-line]. Disponível em: <www.gtz.de/de/dokumente/en-unccd-combating-land-degradation.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2008
- THOMAS, D.S.G.; MIDDLETON, N.J. Salinization: news perspectives on a major desertification issue. **Journal of Arid Environments**, 24: 95-105, 1993.
- THOMAS, I. L.; CHING, N. P.; BENNING, V. M.; DÁGUANNO, J. A. A review of multi-channel indices of class separability. **International Journal Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 331-350. 1987.
- THORNES, J.B. Vegetation cover as a control on the impact of global climate change at the regional and local scales: models and their data requirements. In: ENNE, G.; PETER, D.; POTTIER, D. (Eds.). **Desertification Convention: data and information requirements for interdisciplinary research**. European Commission, 2001. 374p.
- THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. The water balance. Publication in Climatology, **Laboratory of Climatology**, Centerton, v. 8, n. 1, p. 1-14, 1955.
- THORNTHWAITE, C. W. In approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TIESSEN, H.; SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H. Organic matter turnover and management in low input agriculture of Northeast Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 61:99-103, 2001.

TORRENT, J. et al. Quantitative relationships between soil color and hematite content. **Soil Science**, Baltimore, v.136, p.354- 358, 1983.

TORRICO, E.M. **Uso atual e perspectiva de uso potencial sustentável dos recursos naturais renováveis do nordeste**. Brasília, Projeto Áridas. 211p. Uma estratégia de desenvolvimento sustentável para o Nordeste. 1994.

TUCKER et al.; Expansion and contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990, **Soil Science**. v. 253 (1991), pp. 299–301.

TUCKER, C.J.; TOWNSHEND, J.R.G.; GOFF, T.E. African landcover classification using satellite data. **Science**. v. 227, p. 369-375, 1985.

UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COMMISSION FOR ASIA AND THE PACIFIC. **Green Growth at a Glance: The Way Forward for Asia and the Pacific**. Bangkok: 2006.

UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COMMISSION FOR ASIA AND THE PACIFIC. **Green Growth at a Glance: The Way Forward for Asia and the Pacific**. Bangkok: 2006.

VALERIANO, M. M.; ABDON, M. M. Aplicação de Dados SRTM a Estudos do Pantanal (*SRTM Data Applied to Pantanal Studies*). **Revista Brasileira de Cartografia** v.63. No 59/01, Abril, 2007. (ISSN1808-0936).

VAN DE GRIEND, A. A.; Owe, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal of Remote Sensing**. v. 14, n. 6, p. 1119-1131, 1993.

- SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semi-árido de Pernambuco a partir de imagens de satélites
- VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Metodologia para identificação de processo de desertificação: Manual de Indicadores Recife**, SEMA/SUDENE, 1978.
- VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Núcleos de Desertificação no Polígono das Secas**. In: ICB. Universidade Federal de Pernambuco, 1971, Recife/PE **Anais...** Recife. pp. 69-73.
- VIANA, V.M. Ecologia de populações florestais colonizadoras e recuperação de áreas degradadas. In: Simpósio sobre ecossistemas da costa sul e sudeste: síntese dos conhecimentos. São Paulo/SP **Anais...** São Paulo. 1987. Vol. 1 p.29-39.
- VIANA, M.O.L. & RODRIGUES, M.I.V. Um índice interdisciplinar de propensão à desertificação (IPD): instrumento de planejamento. **Revista Econômica do Nordeste**, 30(3): 264-294, 1999.
- VITORELLO, I.; GALVÃO, L.S. Spectral properties of geologic materials in the 400 to 2500 nm range: Review for applications to mineral exploration and lithologic mapping. In: POUGET, M.J.; GUYOUT, G. Spectral properties and remote sensing of soils and rocks. **Photo interpretation**. Paris : Eska, V.34, p.77- 96. (Special issue). 1996.
- VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. & STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28: 763-774, 2004.