



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14828-TDI/1268

**ESTUDO INTEGRADO DA PAISAGEM NO SERTÃO
PERNAMBUCANO (NE-BRASIL) COM O USO DE SISTEMAS DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E SENSORIAMENTO REMOTO**

Marcos Wellausen Dias de Freitas

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Vitor Celso de Carvalho e José Simeão de Medeiros, aprovada em
13 de Março de 2006.

INPE
São José dos Campos
2007

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14828-TDI/1268

**ESTUDO INTEGRADO DA PAISAGEM NO SERTÃO
PERNAMBUCANO (NE-BRASIL) COM O USO DE SISTEMAS DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E SENSORIAMENTO REMOTO**

Marcos Wellausen Dias de Freitas

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Vitor Celso de Carvalho e José Simeão de Medeiros, aprovada em
13 de Março de 2006.

INPE
São José dos Campos
2007

528.711.7

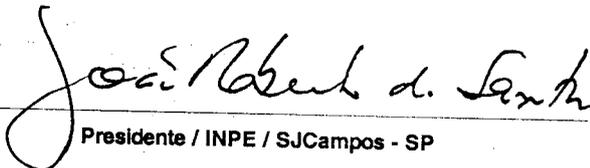
Freitas, M. W. D.

Estudo integrado da paisagem no Sertão Pernambucano (NEBRASIL) com o uso de sistemas de informação geográfica e sensoriamento remoto / Marcos Wellausen Dias de Freitas. - São José dos Campos: INPE, 2006. 191 p. ; (INPE-14828-TDI/1268)

1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG).
2. Sensoriamento remoto. 3. Paisagem. 4. Gestão ambiental.
5. Desertificação. 6. Geografia. 7. Terras áridas. I. Título.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

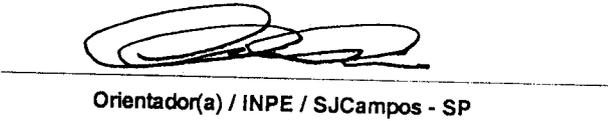
Dr. João Roberto dos Santos


Presidente / INPE / SJCampos - SP

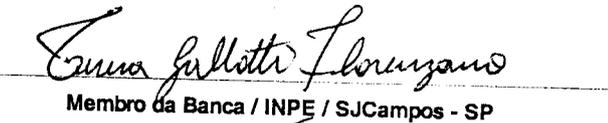
Dr. José Simeão de Medeiros


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Vitor Celso de Carvaiho


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Teresa Gallotti Florenzano


Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Roberto Verdum


Convidado(a) / UFRGS / Porto Alegre - RS

Aluno (a): **Marcos Welläusen Dias de Freitas**

São José dos Campos, 13 de março de 2006

*“Eu sou como aquele boneco,
Que apareceu no dia da fogueira,
E controla seu próprio satélite.
Andando por cima da Terra,
Conquistando seu próprio espaço,
É onde você pode estar agora.”*

CHICO SCIENCE

*A meus pais,
CLARO e
SILVIA.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Vitor Celso de Carvalho, pela orientação cuidadosa e harmoniosa com a qual aprendi muito.

Ao Prof. Dr. José Simeão de Medeiros, pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Aos pesquisadores do INPE: Dr. Márcio de Morisson Valeriano, Dr. João Roberto dos Santos, Dr^a. Tereza Gallotti Florenzano, Dr. Edison Crepani, Dr. Camilo Rennó, Dr. Nelson Jesus Ferreira que me incentivarem com sugestões e críticas durante diversas fases do trabalho.

Aos amigos do INPE (Avelino, Samuel, Arraut, Dênis, Delano, Ciro, Brenner, Raul, André, etc.), do Sul (Ricardo, Beco, Carleza, Syd, etc.), do Rio (Cris, Carola, Motta, Jorge, etc.) e todos outros que ajudaram direta ou indiretamente esta pesquisa.

Ao Francisco “Chico” Macenas pelas lições sobre a paisagem, as plantas e a gente do Sertão.

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa de mestrado, viagens a congressos nacionais e no trabalho de campo.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela utilização de sua infraestrutura e apoio ao trabalho de campo.

RESUMO

A problemática da desertificação apresenta como base fundamental para o seu conhecimento os estudos ambientais integrados com o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sensoriamento Remoto. Foi escolhida como área de estudo um local limitado do sertão pernambucano (NE do Brasil), denominado Quixaba com aproximadamente 190 km². Dentre as abordagens metodológicas desenvolvidas para estudos integrados do meio ambiente, podem-se destacar as metodologias da escola da Ecologia da Paisagem. A abordagem metodológica realizada teve como fases principais: a realização de processamento digital de imagens CBERS 2 - CCD; o Modelo Digital de Elevação (MDE), a partir de dados SRTM interpolados para 30m, e o mapeamento geomorfológico da área; a classificação da dinâmica da cobertura vegetal e uso do solo entre os anos de 1983 e 2004; os mapeamentos integrados da paisagem, com a delimitação dos geossistemas e das geofácies e com a geração do índice de vulnerabilidade à perda de solo; a avaliação e validação em trabalho de campo dos resultados obtidos; e, por fim, a análise integrada dos resultados com ênfase nos dados de campo a partir da análise de agrupamentos e de uma reflexão tendo como base a problemática da desertificação. O processamento digital de imagens teve como principais resultados a modelagem linear de mistura espectral (MLME) e a análise de componentes principais (ACP). O MDE e os produtos gerados a partir de dados SRTM se mostraram fundamentais para a realização dos mapeamentos geomorfológico e integrado da paisagem, através de uma melhoria na interpretação de variáveis ambientais importantes para a compreensão holística da paisagem. O mapa geomorfológico representou as unidades geomorfológicas identificadas com base numa classificação hierárquica das formas de relevo. A cobertura vegetal e uso do solo tiveram seu mapeamento baseado na estrutura, fisionomia e dinâmica, buscando a definição das fácies de vegetação natural e as de cunho antrópico. As unidades geossistêmicas mapeadas se basearam na hierarquia paisagística da área, através da descrição dos modelados e geossistemas, com ênfase nos fatores paisagísticos de cunho físico, ecológico e antrópico. A delimitação das geofácies foi baseada nos critérios da dinâmica da cobertura vegetal e da antropização das unidades de paisagem. O índice de vulnerabilidade à perda de solo se caracterizou como um mapeamento sintético da paisagem que apresenta subsídios à interpretação dos processos erosivos. A análise de agrupamento revelou alguns padrões que remetem a relações envolvendo fatores geomorfológicos, pedológicos e também da integração de variáveis de um mosaico paisagístico específico com a distribuição fitogeográfica da área. Por fim, este trabalho mostrou a potencialidade da aplicação dos produtos e metodologias de sensoriamento remoto e SIG em estudos paisagísticos com uma abordagem complexa e integrada.

LANDSCAPE INTEGRATED STUDY IN THE BACKLANDS OF PERNAMBUCO (NE-BRAZIL) WITH THE USE OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND REMOTE SENSING

ABSTRACT

The desertification problem presents as a research fundamental basis the integrated environmental studies with the use of Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing. In the methodological approaches created for the integrated environmental studies can be highlighted the Landscape Ecology. The study area choiced for this research is part of the semi-arid region of Brazil and is called Quixaba in Pernambuco State with 190 km² of total area. The methodological approach at had as principal rounds: the digital image processing of CBERS 2 – CCD; the Digital Elevation Model (DEM) based in SRTM data interpolated to 30m and the geomorphological mapping; the dynamic land cover and use classification between the years 1983-2004; the landscape integrated mapping, with the delimitation of geosystems and geofacies and with the application of the soil loss vulnerability index; the avaliation and validation of the results at field work; and, finally, the integrated results analisys with the cluster analisys and a reflection about the desertification question. The digital image processing had as principal results the spectral linear mixture model and the principal components analisys. The DEM and generated products with SRTM data were importants to the geomorphological and integred landscape mapping, with a better interpretation of importants environmental variables to the holistic knowledge of the landscape. The geomorphological map represented the geomorphological units identifieds in a hierarchic classification. The mapping of the dynamics of land cover and use had been based in the structure, physionomy and dynamic with the definition of natural and antropic vegetations. The geosystemic units mapeds were based in the landscape hierarchy, with the physical, ecological and social description of geomorphic models and geosystems. The geofacies delimitation were based in the land cover dynamics and anthropization of landscape units. The soil loss vulnerability index had been characterized as a synthetic landscape mapping that can help the interpretation of erosion processes. The cluster analysis revelated some phytogeographic patterns of the area related with geomorphological, pedological and integrated variables. Finally, this study showed the potentiality of the application of products and methodologies of remote sensing and GIS in a complex and integrated approach of landscape studies.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	25
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1. Fundamentos epistemológicos: os estudos da complexidade.....	29
2.2 Fundamentos metodológicos: estudos integrados da paisagem.....	32
2.2.1 Concepções básicas	32
2.2.2 Evolução da Ecologia da Paisagem.....	33
2.2.3 Principais características metodológicas	34
2.3 Avaliação dos estudos integrados de âmbito nacional.....	37
2.4 Avaliação das abordagens integradas aplicadas no nordeste brasileiro.....	42
2.5 Avaliação do potencial do Sensoriamento Remoto e SIG para aplicações em ambientes semi-áridos.....	44
2.5.1 Problemática do uso de Sensoriamento Remoto e SIG em terras secas.....	44
2.5.2 Exemplos de aplicações de Sensoriamento Remoto e SIG no bioma caatinga.....	47
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	51
3.1 Área de estudo.....	51
3.1.1 Grandes unidades ambientais	53
3.1.1.1 Zona.....	53
3.1.1.2 Unidade Litoestratigráfica	58
3.1.1.3 Domínio Morfoestrutural.....	59
3.1.1.4 Região Geomorfológica.....	59
3.1.1.5 Unidade Morfoescultural.....	60
3.1.2 Divisão em paisagens	61
3.1.2.1 Unidade de Paisagem.....	61
3.1.2.2 Unidade Geoambiental	62
3.2 Materiais.....	62
3.2.1 Sistemas de Informação Geográfica	63
3.2.2 Base cartográfica	63
3.2.3 Produtos de sensoriamento remoto.....	64
3.3 Abordagem metodológica.....	64
3.3.1 Montagem do banco de dados	65
3.3.2 Processamento digital de imagem	67
3.3.2.1 Pré-processamento.....	67
3.3.3 Modelo Digital de Elevação e mapeamento geomorfológico	72

3.3.4	Classificação da dinâmica da cobertura vegetal	76
3.3.4.1	Mapeamento da cobertura vegetal e uso da terra	76
3.3.4.2	Mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal e uso da terra	80
3.3.5	Análise e mapeamento integrado da paisagem	81
3.3.5.1	Delimitação dos geossistemas	82
3.3.5.2	Mapeamento das geofácies	84
3.3.5.3	Índice de vulnerabilidade à perda de solo	85
3.3.6	Trabalho de campo	88
3.3.7	Análise dos resultados	93
3.3.7.1	Análise de agrupamentos	94
3.3.7.2	Análise dos produtos sintéticos em relação ao processo de desertificação	94
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES		97
4.1	Técnicas de modelagem em sensoriamento remoto	97
4.1.1	Modelo linear de mistura espectral (MLME)	98
4.1.2	Análise de componentes principais (ACP)	100
4.2	Modelo Digital de Elevação (MDE)	101
4.3	Mapeamentos temáticos	104
4.3.1	Mapeamento geomorfológico	104
4.3.1.1	Modelado de tabuleiros	106
4.3.1.2	Modelado de platôs ondulados baixos	107
4.3.1.3	Modelado de relevos residuais aplainados	108
4.3.1.4	Modelado de glaciais amplos denudados	109
4.3.1.5	Modelado de glaciais amplos ondulados	110
4.3.1.6	Modelado de agradação	111
4.3.2	Mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal	112
4.3.2.1	Fácies de caatinga arbórea	116
4.3.2.2	Fácies de caatinga arbórea-arbustiva	118
4.3.2.3	Fácies de caatinga aclareirada	119
4.3.2.4	Fácies em galeria	121
4.3.2.5	Fácies antrópicas	123
4.4	Mapeamento integrado da paisagem	124
4.4.1	Mapeamento dos geossistemas	125
4.4.1.1	Geossistemas dos tabuleiros	127
4.4.1.2	Geossistemas dos platôs ondulados baixos	131
4.4.1.3	Geossistemas dos relevos residuais aplainados	132
4.4.1.4	Geossistemas dos glaciais amplos denudados	135
4.4.1.5	Geossistemas dos glaciais amplos ondulados	136
4.4.1.6	Geossistemas aluviais dos fundos de vales	137
4.4.2	Mapeamento das geofácies	138
4.4.2.1	Geofácies conservadas	141
4.4.2.2	Geofácies de recuperação	142
4.4.2.3	Geofácies de degradação	143

4.4.2.4 Geofácies de cultura	147
4.4.3 Índice de vulnerabilidade à perda de solo (IVPS)	149
4.4.3.1 Clima	149
4.4.3.2 Geologia	150
4.4.3.3 Pedologia	152
4.4.3.4 Geomorfologia.....	155
4.4.3.5 Cobertura vegetal.....	157
4.4.3.6 Declividade.....	157
4.4.3.7 Índice de vulnerabilidade à perda de solo final	159
4.5 Análise integrada dos resultados com relação ao processo de desertificação.....	162
4.5.1 Análise de agrupamento das unidades geossistêmicas	162
4.5.1.1 Análise de agrupamento dos geossistemas.....	163
4.5.1.2 Análise de agrupamento das geofácies.....	165
4.5.2 Unidades geossistêmicas, ZEE e desertificação	167
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	171
5.1 Conclusões.....	171
5.1.1 Primeiro objetivo específico: mapeamentos temáticos	171
5.1.2 Segundo objetivo específico: mapeamento integrado da paisagem	172
5.1.3 Terceiro objetivo específico: detecção de mudanças e degradação ambiental.....	173
5.1.4 Quarto objetivo específico: indicadores ambientais e desertificação.....	173
5.1.5 Objetivo geral: avaliação da dinâmica.....	174
5.2 Recomendações.....	174
5.3 Considerações finais.....	175
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177
APÊNDICE A	185
APÊNDICE B.....	189

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Ordens de dimensão taxo-corológicas dos geossistemas conforme S. Preobrajenski..	36
3.1 - Localização da área de estudo.....	52
3.2 - Esquema dos padrões de circulação em larga-escala do Atlântico: A) Período seco; B) Período chuvoso.....	56
3.3 - Diagrama ombrotérmico da área de Quixaba.....	57
3.4 - Fluxograma com etapas da abordagem metodológica.....	65
3.5 - Fluxo metodológico da montagem de banco de dados em ambientes Spring 4.1.2 e Terra View 3.0.3.....	66
3.6 - Fluxograma metodológico geral do processamento de imagens digitais.....	67
3.7 - Fluxograma da etapa de pré-processamento de imagem CBERS 2 – CCD.....	68
3.8 - Resultados da calibração atmosférica nos dados CBERS 2-CCD: (A) antes da calibração e (B) após a calibração.....	68
3.9 - Fluxograma da etapa de técnicas de modelagem em sensoriamento remoto.....	69
3.10 - Gráfico com os <i>endmembers</i> utilizados no MLME com CBERS 2 – CCD (4 bandas) representando as frações solo, vegetação fotossinteticamente ativa e água/sombra.	71
3.11 - Fluxo metodológico da modelagem digital de elevação e mapeamento geomorfológico.....	73
3.12 - Fluxo do tratamento de dados SRTM para geração de MDE.....	74
3.13 - Fluxograma da classificação semi-automática da dinâmica da cobertura vegetal.....	77
3.14 - Esquema metodológico da análise e mapeamento integrado da paisagem.....	82
3.15 - Abordagem metodológica da delimitação dos geossistemas.....	83
3.16 - Esquema metodológico do mapeamento das geofácies.....	85
3.17 - Esquema metodológico da produção em SIG do índice de vulnerabilidade à perda de solo.....	87
3.18 - Pontos amostrados no trabalho de campo.....	89
3.19 - Planilha de trabalho de campo.....	90
3.20 - Planilha de campo para observação de características geomorfológicas, geológicas e de formação superficial.....	92
3.21 - Planilha de campo para fácies agrícolas.....	93

4.1 - Imagens-fração do MLME: (A) vegetação fotossinteticamente ativa, (B) solo, (C) água/sombra.	99
4.2 - Uso de ACP com a composição colorida R(CP3)G(CP2)B(B3).	101
4.3 - MDE da área de estudo gerados a partir de dados SRTM por convolução cúbica (A e C) e por tratamento geoestatístico (B e D) em geral e em detalhe.....	103
4.4 - Mapa geomorfológico da área de estudo com divisão hierárquica de modelados e segmentos de vertentes.....	105
4.5 - Mapeamento dinâmico da cobertura vegetal no período 1983-2004.	114
4.6 - Foto de transecto representativa de fácies de caatinga arbórea na área de estudo.	116
4.7 - Perfil da cobertura vegetal de fácies de caatinga arbórea.	117
4.8 - Foto de transecto representativa de fácies de caatinga arbórea-arbustiva.....	118
4.9 - Perfil da vegetação de fácies de caatinga arbórea-arbustiva.....	119
4.10 - Foto de transecto representativa de fácies de caatinga aclareirada.	120
4.11 - Perfil da cobertura vegetal de fácies de caatinga aclareirada.....	121
4.12 - Foto de transecto representativa de fácies em galeria.....	122
4.13 - Perfil da fácies em galeria.....	122
4.14 - Foto de fácies de cultura, no caso pastagem.	124
4.15 - Mapa dos geossistemas da área de estudo.....	127
4.16 - Mapa das geofácies da área de estudo.....	140
4.17 - Desmatamento por corte seletivo de aroeira na área de estudo.....	142
4.18 - Uso antrópico em atividade agropecuária, é possível observar a presença de processos erosivos lineares (ravinamento).....	144
4.19 - Atividade carvoeira com degradação da cobertura vegetal.....	144
4.20 - Atividade de extração de rochas na área de estudo.....	145
4.21 - Área degradada para construção de estrada na área de estudo.....	145
4.22 - Processos erosivos relacionados ao escoamento difuso (denominados como pedestais).....	146
4.23 - Processo erosivo linear ou em sulco (voçoroca) na área de estudo.	147
4.24 - Geofácies de cultura da área de estudo localizada no geossistema aluvial Da(VIa).	148
4.25 - Geofácies de cultura da área de estudo no geossistema de platôs Dp(IIa).....	148
4.26 - Mapa geológico da área de estudo.	151

4.27 - Mapa pedológico das associações de solos da área de estudo.	153
4.28 - Mapa de declividades da área de estudo gerado a partir de MDE.	158
4.29 - Mapa final do Índice de Vulnerabilidade à Perda de Solo.	160
4.30 - Dendrograma representativo do agrupamento das geofácies conservadas dos geossistemas da área de estudo.	164
4.31 - Dendrograma representativo do agrupamento das geofácies da área de estudo.	166

LISTA DE TABELAS

3.1 - Hierarquia taxo-corológica dos primeiros níveis de grandeza	53
3.2 – Coeficientes de calibração absoluta da câmara CCD/CBERS-2 (CCn).....	69
3.3 – Valores de elevação solar no topo da atmosfera ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$)	69
3.4 - Matriz de correlação das bandas CBERS 2 – CCD.	71
3.5 - Matriz de covariância das bandas CBERS 2 – CCD.....	72
3.6 - Matriz de autovetores das bandas CBERS 2 – CCD.....	72
3.7 - Autovalores e porcentagem da informação das bandas originais das componentes principais.	72
3.8 - Chave de interpretação das classes de cobertura vegetal (CBERS 2 – CCD).....	78
3.9 - Chave de interpretação da dinâmica da cobertura vegetal entre 1983 e 2004.	81
4.1 – Valores de área das unidades geomorfológicas, em km^2 e % da área total.	106
4.2 – Áreas absolutas e relativas das fácies de cobertura vegetal mapeadas.....	115
4.3- Características paisagísticas dos modelados e geossistemas da área de estudo.....	129
4.4 – Áreas das geofácies absolutas (km^2), em relação aos geossistemas (%) e total em relação à área de estudo.	141
4.5 - Escala de erodibilidade da chuva e valores de vulnerabilidade à perda de solo conforme Crepani et al. (2001).....	150
4.6 - Valores de vulnerabilidade à perda de solo das unidades litológicas, adaptado de Crepani et al. (2001).....	152
4.7 - Valores de vulnerabilidade à perda de solos das associações de solo da área de estudo, adaptado de Crepani et al. (2001).	154
4.8 - Valores de vulnerabilidade à perda de solo em relação aos modelados e segmentos de vertentes, adaptado de Crepani et al. (2001).	156
4.9 - Valores de vulnerabilidade à perda de solos das fácies de cobertura vegetal, adaptado de Crepani et al. (2001).	159

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A problemática da desertificação, ou seja, a perda de terras cultiváveis pelo processo de degradação de terras em zonas áridas, semi-áridas e subúmidas secas, deixou de ocupar o ponto focal das atenções mundiais e, sobretudo, nacional. Apesar disto, este processo continua no seu ritmo acelerado, comprometendo a vida no planeta Terra e, em particular, no semi-árido brasileiro. No estudo desta problemática, é fundamental uma abordagem ambiental integrada com o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sensoriamento Remoto. A realização desses estudos é uma necessidade que se impõe à conservação e uso sustentável do meio ambiente, estando diretamente relacionada com as pesquisas e ações de planejamento e gestão ambientais, como o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE). Muitos esforços neste sentido já foram realizados, mas o Brasil ainda carece de estudos semidetalhados no bioma Caatinga, típico deste domínio semi-árido brasileiro.

Dentre as abordagens metodológicas desenvolvidas para estudos integrados do meio ambiente, pode-se destacar a metodologia da escola francesa da Ecologia da Paisagem, especialmente a proposta por Bertrand e Bertrand (2002). Esta se destaca pela busca de uma visão sistêmica interdisciplinar preocupada em captar as interações entre o potencial ecológico (combinação de dados do contexto físico), a exploração biológica (representando as comunidades bióticas ligadas aos primeiros) e a utilização antrópica (o impacto das atividades antrópicas sobre a combinação de fatores bióticos e abióticos). Em síntese, tal metodologia busca uma visão taxonômica, tipológica e dinâmica da paisagem (Rougerie e Beroutchachvili, 1991; Monteiro, 2001; Ab'Sáber, 2003; Freitas e Cunha, 2003).

Neste contexto, cabe mencionar que as características e a dinâmica do processo de desertificação variam de acordo com as características ambientais de cada local em particular, devido à condição de mosaico paisagístico complexo relacionada com o domínio

das caatingas (Ab'Sáber, 2003). Desta forma, o uso de uma abordagem holística da paisagem, em particular, em nível de geossistema, é fundamental para compreender este processo.

Como parte desta busca de conhecimento, o monitoramento das variáveis ambientais é uma parte essencial da pesquisa, porém o número dessas variáveis é muito elevado conforme a localização. Assim, torna-se necessário limitar o universo amostral para viabilizar um experimento bastante limitado no tempo, no espaço e nos recursos disponíveis. Diante do que foi até aqui colocado, a questão fundamental deste trabalho é:

- Tendo em vista o estágio atual da evolução tecnológica e metodológica, até que ponto é possível o uso integrado das técnicas de Sensoriamento Remoto e dos Sistemas de Informações Geográficas, para realizar estudos com uma abordagem integrada da paisagem, numa escala de espaço e tempo localizados e limitados?

Para isso propôs-se como objetivo geral desta dissertação, avaliar através da dinâmica de um período de aproximadamente 20 anos, as variáveis ambientais que possam ser utilizadas como indicadores do processo de desertificação em nível de semidetalhe numa análise integrada da paisagem. Esta pesquisa se fez com o uso integrado de produtos de sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas e abordagem geossistêmica ou complexa da paisagem, tendo como área-piloto um local limitado do sertão pernambucano (NE do Brasil), denominado Quixaba. Devido ao tempo de pesquisa e à própria natureza da ferramenta utilizada de Sensoriamento Remoto e SIG, tal abordagem holística teve foco nos aspectos físicos e ecológicos, sendo o aspecto social considerado de forma indireta na análise da cobertura vegetal e uso do solo. Para se atingir este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Avaliar, ajustar, completar e atualizar os mapeamentos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e da cobertura vegetal da área-piloto, através dos

produtos cartográficos e de sensoriamento remoto compatíveis, gerenciados num sistema de banco de dados disponível e atualizado;

2) Mapear os geossistemas da área-piloto, através da abordagem geossistêmica e integrada dos produtos gerados e de outros dados disponíveis no banco de dados mencionado;

3) Avaliar a possibilidade de detectar mudanças significativas indicadoras de processos de degradação ambiental, através da análise da dinâmica de amostras representativas, com o uso de mapas, imagens CBERS 2 – CCD disponíveis e levantamento de campo para o mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal e do uso do solo;

4) Identificar as variáveis ambientais que possam ser utilizadas como indicadoras do processo de desertificação para a área-piloto, através da aplicação da metodologia do ZEE de índice de vulnerabilidade à perda de solo.

A ênfase desta pesquisa foi centrada no uso das geotecnologias em abordagens de cunho integrador e complexo da paisagem, sem esquecer o papel de análises setoriais, também fundamentais na realização de tal tipo de estudo. Assim, o enfoque principal se deu na avaliação da potencialidade de ferramentas e técnicas de Sensoriamento Remoto para aplicações em ambientes semi-áridos, em especial na sua cobertura vegetal, envolvendo a análise de mistura espectral e a análise de componentes principais com dados CBERS 2 – CCD. Também foi enfatizado o desenvolvimento de modelos digitais de elevação do terreno e técnicas de geoprocessamento como base para o mapeamento e a caracterização geomorfológica. Bem como, para finalizar, na utilização conjunta de tais produtos através de instrumental de SIG para o mapeamento integrado da paisagem e suas unidades geossistêmicas.

Com este trabalho foi dada continuidade a essa linha de pesquisa do INPE, bem como, foram fornecidos subsídios às propostas institucionais de caráter sistêmico que guiam o

planejamento territorial no Brasil, como o ZEE. Como produto final deste trabalho foi apresentado um banco de dados geográficos, que possibilita às instituições envolvidas no planejamento e gestão ambiental da área de estudo um instrumento para tais atividades.

A estrutura da dissertação segue a disposição em capítulos que apresentam a seguinte organização: introdução, fundamentação teórica, abordagem metodológica, resultados e discussões, e conclusões. Assim, neste primeiro Capítulo, são apresentados o tema, a hipótese e os objetivos deste estudo. O Capítulo 2 foi dedicado à fundamentação teórica da pesquisa, com a apresentação e a avaliação dos principais referenciais epistemológicos e de outros estudos aplicados no ambiente semi-árido com base na abordagem utilizada com ênfase no bioma Caatinga. No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia, tendo-se como foco a descrição da abordagem metodológica, enfatizando o uso de técnicas e métodos de Sensoriamento Remoto e de geoprocessamento. Já no Capítulo 4, são mostrados e discutidos os principais resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 5 relaciona as principais conclusões e recomendações que foram possibilitadas pela realização deste estudo em função de seus objetivos e da sua abordagem de caráter integrado e complexo da paisagem.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica da pesquisa realizada. Primeiramente, foram analisados com relativa profundidade os seus fundamentos epistemológicos, aos quais se denomina de estudos da complexidade, e os seus fundamentos metodológicos, que aqui foram denominados como estudos integrados da paisagem. Em seguida, fez-se uma avaliação desses estudos integrados, no âmbito nacional e, mais especificamente, no Nordeste brasileiro. E, para finalizar; realizou-se uma avaliação do potencial do uso de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica em paisagens semi-áridas.

2.1. Fundamentos Epistemológicos: os Estudos da Complexidade

A principal característica ressaltada nos estudos da paisagem é a sua complexidade. Esta complexidade determina uma grande dificuldade para a sua abordagem e a necessidade de uma visão integrada ou holística das suas variáveis ambientais. Tal característica serve de base para novos estudos que buscam um novo paradigma nas ciências que aqui se denomina estudos da complexidade. Esses estudos apresentam resultados que muitas vezes remetem às concepções milenares de sociedades orientais e indígenas que se baseavam numa visão holística da relação natureza e sociedade. Mesmo na gênese do pensamento ocidental, na Grécia Antiga, a concepção entre sociedade e natureza era integrada através do conceito de *physis* que representava a ligação indissolúvel entre o natural e o social.

Os estudos da complexidade estão preocupados com uma abordagem anti-reducionista. Por seu intermédio procura-se uma interpretação holística de caráter interdisciplinar aplicável a sistemas caóticos e complexos, longe da estabilidade. Trata-se de uma corrente científica com representantes nos mais diversos campos científicos que se baseia nos últimos avanços da ciência em áreas como a Física Quântica, a Biologia Molecular, a Cibernética e a

Informática, a Matemática de base fractal, entre outras tantas contribuições das mais diversas áreas.

As primeiras contribuições a tais estudos vieram, principalmente, da Teoria Geral dos Sistemas e da Cibernética. A primeira foi concebida por Bertalanffy (1975) trazendo a noção de sistemas abertos e uma visão holística integradora dos campos científicos, além de ser contra o mecanicismo de cunho positivista. O desenvolvimento de tal teoria contou com o forte apoio da Cibernética, criada por Wiener (1968), que desenvolveu o conceito de retroalimentação (*feedback*). Tal conceito trouxe uma nova noção de auto-regulação, aplicada por Wiener na sua Teoria da Informação, que buscava uma concepção dos mais variados sistemas baseada na interação entre a entropia desorganizadora e os *feedbacks* de caráter informacional e organizador.

Pode-se ainda destacar a primeira descrição de sistemas auto-organizadores ou complexos do físico-químico russo Ilya Prigogine e sua teoria das “estruturas dissipativas”, interessada no comportamento de sistemas termodinâmicos afastados do equilíbrio e não-lineares (Prigogine e Stengers, 1991; Capra, 2000). Bem como, os estudos a respeito da cognição em organismos vivos, chegando à teoria da auto-organização aplicável a todos os sistemas vivos, com enfoque no conceito de *autopoiese* dos biólogos chilenos Maturana e Varela (2001). Como ainda, a “hipótese de Gaia” do químico inglês, com Doutorado em Medicina e Higiene Tropical, James Lovelock que considera a Terra como um sistema vivo auto-regulador, reunindo conteúdos das mais diversas disciplinas científicas como a Geologia, Microbiologia, Química Atmosférica e outras (Capra, 2000). Para finalizar este parágrafo, cabe ainda destacar a contribuição da Matemática a partir do estudo de sistemas não-lineares ou dinâmicos, tendo como resultado atratores como o de Lorenz, explicando o “efeito borboleta”, e a geometria fractal do matemático francês Benoit Mandelbrot, estudando a geometria de uma ampla variedade de fenômenos naturais irregulares (Moreira, 1999).

A partir das décadas de 1960 e 70, os estudos da complexidade assumem um grande desenvolvimento nas mais variadas áreas da ciência, principalmente na análise de sistemas caóticos e complexos, da auto-organização e das redes componentes e caracterizadoras dos sistemas. A interdisciplinaridade e a abordagem holística também são características fundamentais desta nova concepção científica da complexidade. Os estudos atuais sobre a complexidade seguem cada vez mais interdisciplinares e avançam no estudo de sistemas caóticos e sistemas complexos adaptativos, chegando ao estudo da criticalidade auto-organizada que seria um estado crítico auto-organizado numa região de fronteira ordem/caos. Tais contribuições são fundamentais como base epistemológica de uma pesquisa voltada à abordagem sistêmica ou integrada da paisagem, sendo ainda fundamentais ao desenvolvimento das pesquisas de modo geral em sensoriamento remoto e geoprocessamento também (Nussenzveig, 1999; Capra, 2000).

Como principais contribuições epistemológicas dos estudos da complexidade pode-se destacar Morin (2002). Este autor define as bases metodológicas para um pensar complexo, dialógico e holístico. Ele questiona a ciência dos cortes e separações realizados pelo reducionismo clássico, com destaque para a necessidade de um pensar que integre os elementos físicos, biológicos e antropossociais, através de um método complexo preocupado com as interações, interdependências e interconectividades entre estes elementos. Feyerabend (1989) funda o anarquismo metodológico que se opõe às atitudes reducionistas, como a procura de um método único de investigação da realidade, típico da ciência clássica. Outra característica do pensamento de Feyerabend é a crítica frente aos princípios de paradigma e ciência normal de Kuhn. Para ele a evolução da ciência deve ser considerada não a partir de períodos com um paradigma dominante (ciência normal) e períodos de crise paradigmática, mas sempre conforme padrões novos e a quebra de tradições rígidas (revolução permanente). Estas contribuições epistemológicas são fundamentais ao tema principal da pesquisa, os estudos integrados da paisagem, que exigem capacidade de integração, apreensão da complexidade e ação interdisciplinar para a sua abordagem holística.

2.2 Fundamentos Metodológicos: Estudos Integrados da Paisagem

Em relação aos fundamentos metodológicos da pesquisa são apresentados neste item: algumas noções da origem das concepções principais (como paisagem, ecologia da paisagem e geossistemas); o desenvolvimento de tal ramo científico; e as principais características da escola dos geossistemas.

2.2.1 Concepções Básicas

A procura por concepções da paisagem e de sua complexidade capazes de integrar a natureza (com seus elementos físicos e ecológicos) e a sociedade (com seus aspectos econômicos, políticos e culturais) remonta a origens longínquas, não sendo um assunto propriamente novo. O enfoque nesta análise se encontra nas noções de geossistemas e paisagem, ambas diretamente influenciadas pelo desenvolvimento da ciência e do pensamento geográfico a partir do século XIX, com suas diferentes concepções em lugares e tempos diferentes.

O conceito de paisagem tem a sua origem na escola geográfica alemã que desenvolveu a base da Ecologia da Paisagem (*Landschaftökologie*), criada por Carl Troll em 1939, como uma “[...] *vontade interdisciplinar de trabalhar*” (Fournier, 2001, p.105) e que deu origem aos estudos de geoeologia e às análises da paisagem envolvendo a Geografia e Ecologia. Esta escola tem relação com as teorias de Sorre (geógrafo tradicional francês) que resgata a importância dos estudos da escola francesa inspirada em La Blache e também em Ratzel, ressaltando a relação destes estudos com a análise ecológica e ambiental. Sorre deixa clara a complexidade das relações ambientais no que denominou de ecúmeno em sua realidade humana, biológica e física extremamente interconectada, propondo uma Geografia de cunho global, com estes elementos integrados através da unidade do ecúmeno planetário (Sorre, apud Megale, 1985). Bem como da escola russa, que tem a noção de paisagem como um dos conceitos principais, tendo assumido tanta importância que se tornou a Ciência da Paisagem (*Landschaftovédénie*) de caráter essencialmente integrativo e

interdisciplinar. Desta escola pode-se destacar o geógrafo russo Vernadsky que criou no início do século XX a concepção de biosfera, sempre procurando a integração com as outras esferas do planeta. “... questionando o papel que desempenha a energia solar nos processos terrestres, ele introduz, nas ciências naturais, o estudo dos intercâmbios de matéria e de energia” (Frolova, 2001). Além da concepção de biosfera, Vernadsky desenvolveu nos anos 1930-40 a teoria da noosfera que integra a esfera do simbólico e do pensamento às outras esferas da realidade.

Ainda na Geografia russa, Sochava, influenciado por geógrafos como Vernadsky, criou a concepção de geossistema em 1963 (Rougerie; Beroutchachvili, 1991). Entre os elementos fundamentais para a diferenciação dos geossistemas, Sochava colocava relevo nas características dinâmicas e na evolução das paisagens estudadas. Entre as principais características estudadas por Sochava estavam a geomorfologia, a hidroclimática, a pedologia e a botânica, sem esquecer os estudos geoquímicos a respeito dos fluxos de energia e matéria. A diferenciação em relação ao conceito de ecossistema dos ecólogos e biogeógrafos vem do caráter estritamente biológico dos ecossistemas, considerados como uma entidade que exprime a evolução e distribuição das comunidades vivas e suas relações com os outros fatores ambientais em especial através da caracterização das cadeias alimentares, e ainda sem uma caracterização de escala espacial. Em relação aos ecossistemas, os geossistemas estariam preocupados com uma análise global da paisagem e de seu conjunto inter-relacionado de variáveis, além de serem relacionados com porções do espaço bem definidas e diretamente cartografáveis (Bertrand, 1974, Bertrand e Bertrand, 2002).

2.2.2 Evolução da Ecologia da Paisagem

A escola da Ecologia da Paisagem evolui principalmente na França e na Alemanha (onde passa a ser chamada de geocologia) por autores como Bertrand, Tricart, Dansereau (este canadense), Troll, Neef e outros que buscavam as relações entre os elementos da paisagem sob uma perspectiva ecológica (Rougerie e Beroutchachvili, 1991). Bertrand (1972)

caracteriza os geossistemas como formados pelo potencial ecológico (a combinação de fatores físicos: geomorfológicos, climáticos e hidrológicos), pela exploração biológica (combinação dos fatores bióticos: vegetação, solo e fauna) e pela ação antrópica, que apresentam uma dinâmica integrada e relacionada diretamente aos efeitos de biostasia e resistasia, conforme descritos por Erhart (1962 e 1966). Quanto à sua concepção de paisagem, Bertrand deixa clara a abrangência e integração deste conceito: *“A paisagem não é a simples adição de elementos geográficos disparatados. É, numa determinada porção do espaço, o resultado da combinação dinâmica, portanto instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução. [...] É preciso frisar bem que não se trata somente da paisagem ‘natural’ mas da paisagem total integrando todas as implicações da ação antrópica”* (Bertrand, 1972, p.2).

2.2.3 Principais Características Metodológicas

Bertrand (1974) deixa claro que o estudo integrado das paisagens é uma questão essencialmente metodológica, onde a pesquisa se caracteriza pela procura de um método caracterizado tanto pelo conteúdo analítico quanto sintético. Porém ele não é um bloco monolítico e único que funciona por si só, sendo caracterizado por processos sucessivos preocupados com a análise do movimento vivo de uma reflexão aberta. Esta característica ocorre devido à própria complexidade dos geossistemas que necessitam de diferentes metodologias para a sua compreensão: *“Determina-se muito o estudo do território. Nenhuma classificação é absoluta; é necessário modificá-la, aperfeiçoá-la. Especialmente no que se refere à fixação de geomos e aos seus subordinados da dimensão topológica dos geomos, exigindo, para uma absorção no estudo da estrutura do geossistema, inúmeros métodos”* (Sochava, 1978, p.8-9).

No estudo dos geossistemas e sua metodologia, Bertrand (1972, 1974) coloca a necessidade de uma visão taxonômica-corológica, tipológica e dinâmica da paisagem. Tal metodologia servindo para a caracterização do espaço geográfico enquanto fenômeno espacial

caracterizado por estruturas que se inscrevem no espaço (localização e distância, superfícies e volumes, isomorfismos e descontinuidades), e enquanto fenômeno de contato onde forma um sistema integrado em que interagem os elementos físicos, ecológicos e sociais. Tal concepção serve ainda diretamente aos mecanismos de planejamento e gestão do espaço, em especial em relação à conservação dos recursos naturais e à gestão dos espaços agrícolas.

1) Taxonômica-corológica:

Existem duas principais taxonomias ou hierarquias escalares relacionadas aos geossistemas: a da escola russa e a da escola francesa. Conforme os russos (Figura 2.1), os geossistemas apresentam uma hierarquia estrutural que vai do nível planetário ao regional e daí até o nível topológico. Em termos corológicos estes geossistemas seriam divididos em relação à sua interdependência em geômeros (que apresentam uma estrutura homogênea) e geócoros (apresentando estruturas diferenciadas). Entre as unidades principais dos geômeros, abaixo do nível planetário, estão os geomos (de nível regional), as fácies e a unidade elementar (biogeocenose, equivalente à ecossistema elementar). Entre os geócoros, eles propõem várias diferenciações escalares de microgeócoros até zonas físico-geográficas regionais (Sochava, 1978).

ORDENS DE DIMENSÃO				
GEÔMEROS	EPIGEOSFERA			GEÓCOROS
Série de tipos de meios ambientes naturais (séries de paisagens)	UNIDADES DITAS TAXONÔMICAS	Planetária	Cartografia 1/1.000.000	Áreas físico-geográficas
Tipos de meios ambientes naturais (tipos de paisagens)				Grupos de regiões
Classes de geomias				Divisões continentais
Subclasses de geomias		Regional	Regiões físico-geográficas zonais ou altitudinais	
Grupo de Geomas			Grupo de províncias ou zona natural	
Subgrupo de geomias			Províncias ou subzona	
Geomas (Landschaft) (ligados aos tipos de relevos)	UNIDADES DITAS MORFOLÓGICAS	Unidades inferiores	Escalas cartográficas 1/100.000	Mácrogeócoros (grupo de sítios, alguns Ha)
Classes de fácies (mesnost) associação ligadas a um relevo		paisagem	1/25.000	Topogeócoros
Grupo de fácies (Ourotchitche) associação ligada a uma forma topográfica elementar		ou	1/10.000	Mesogeócoros (grupo de sítios, alguns Ha)
Fácies (combinação tipológica primária)		topológicas	1/1.000	Microgeócoros
Fácies elementar, fácies individual, homogêneo se for biogeocenose			Espaço elementar (heterogêneo se for cadeia de biogeocenoses)	
TAXONOMIA				CRONOLOGIA

FIGURA 2.1 - Ordens de dimensão taxo-corológicas dos geossistemas conforme S. Preobrajenski.

FONTE: Christofolletti (2002, p.43).

Em relação a taxo-corologia francesa, Bertrand (1972, 1974) estabelece o geossistema, as geofácies e os geótopos como unidades taxonômicas inferiores, estando “[...] na 4ª, 5ª ou 6ª grandezas temporo-espaciais de Tricart e Cailleux (1956), escala esta mais compatível com a humana, em que a dinâmica desses geossistemas, modificada ou não, poderia expressar a dinâmica social” (Rodrigues, 2001, p.74). Os geossistemas, geofácies e geótopos seriam unidades taxonômicas inferiores às três primeiras grandezas taxonômicas: zona, domínio e região. O geossistema seria o quarto nível de grandeza, onde é acentuado o complexo geográfico e a dinâmica de conjunto de todos os fatores; a geofácies sublinharia as características fisionômicas de áreas com fases de evolução relacionadas às do geossistema a que pertence; e o geótopo seria o último nível de grandeza, apresentando

características extremamente localizadas e diferentes do geossistema em que está inserido (por exemplo: o fundo de um vale que não recebe a influência de raios solares).

2) Tipológica:

Já a tipologia das paisagens seria relacionada ao modo principal de classificação e denominação dos geossistemas, tendo Bertrand preferido uma tipologia dinâmica preocupada com três elementos principais: o sistema de evolução, o estágio de evolução em relação ao clímax e o sentido geral de tal dinâmica (progressivo, regressivo ou estável); conforme a teoria bio-resistática de Erhart (1962, 1966). Os geossistemas são divididos em dois conjuntos principais (geossistemas em biostasia e em resistasia), com subdivisões relacionadas aos estágios de evolução (climáticos, paraclimáticos ou degradados), à dinâmica regressiva ou progressiva e ao papel da atividade antrópica na dinâmica do geossistema (Bertrand, 1974).

3) Dinâmica da paisagem:

A dinâmica dos geossistemas seria caracterizada por um sistema de evolução global das paisagens determinado pela interação dialética entre todas as formas de energia complementares ou antagônicas que formam os processos nos geossistemas. De uma forma analítica, o autor separa três conjuntos do sistema geral: o sistema geomorfogenético (em especial a dinâmica erosiva), a dinâmica biológica (como os mecanismos de adaptação) e o sistema de exploração antrópico (relacionado às modificações da paisagem impostas pelo uso do solo). Tais conjuntos servem ao pesquisador para o estabelecimento de uma classificação inicial da paisagem em função dos fatores dominantes no sistema de evolução das paisagens (Bertrand, 1974).

2.3 Avaliação dos Estudos Integrados de Âmbito Nacional

O estudo integrado do meio ambiente no Brasil tem diferentes contribuições como as de Ab'Sáber (1969, 2003), Christofolletti (1979, 2002), e Monteiro (2001) que buscam adequar

teorias e influências do exterior à compreensão da realidade geográfica brasileira. Tais contribuições são importantes para a utilização de forma adaptada às diferentes condições paisagísticas existentes na realidade do Brasil de uma análise ambiental integrada. A avaliação destes estudos integrados brasileiros foi realizada em conjunto com projetos ambientais como o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) que buscam a aplicação de tais perspectivas.

Ab'Sáber (1969) desenvolve uma metodologia voltada aos estudos geomorfológicos sobre o Quaternário, composta de três partes integradas: a compartimentação topográfica, a estrutura superficial e a fisiologia da paisagem. A fisiologia da paisagem, parte fundamental da pesquisa que pressupõe as duas primeiras, procura desenvolver um entendimento da funcionalidade ou organização da paisagem através do conhecimento do “[...] *papel de cada elemento do quadro ambiental, no processo de funcionamento da paisagem – como os fluxos de energia e matéria que fazem funcionar dinamicamente a paisagem*” (Ross, 2000, p.39). Quanto aos processos da dinâmica das paisagens, Ab'Sáber se baseia na teoria bioresistática de Erhart (1962), enquanto processos fisiográficos e ecológicos: “*O correto uso dos conceitos de biostasia e resistasia – engendrados pelo pedólogo Henri Erhart (1966) – tornou possível captar a potencialidade dos processos erosivos e denudacionais que incidem sobre o mosaico de geossistemas, ao sabor de mudanças climáticas e ecológicas radicais*” (Ab'Sáber, 2001, p.81).

Ab'Sáber (2003) utiliza o conceito de geossistema no sentido dado por Bertrand (1972), relacionado com a divisão taxonômica da escola geográfica francesa exposta no item anterior, salientando que entre os outros conceitos geográficos “[...] *o mais original e de aplicabilidade relativa foi com certeza geossistema*” (Ab'Sáber, 2003, p.139). Os geossistemas seriam mosaicos paisagísticos refletindo ecossistemas com “ar de família”, dentro dos domínios morfoclimáticos adotados pelo autor; como exemplo: “*No Brasil Atlântico, ecossistemas de florestas altamente biodiversas, variando de composição e estrutura, em nível altitudinal e espacial e se embaralhando em mosaicos sub-regionais de*

geossistemas” (Ab’Sáber, 2003, p.140). As geofácies caracterizariam os contrastes ecossistêmicos (redutos, enclaves, psabiomas, helobiomas) dentro dos geossistemas. Os redutos de ecossistemas totalmente diversos das características principais do geossistema são denominados de rupestrebiomas ou geótopos, uma situação de tal tipo é ao se “[...] *atingir os campos de cimeira e os redutos de araucárias dos altiplanos serranos, estamos em presença de redutos de ecossistemas totalmente diferentes do mundo real das florestas tropicais*” (Ab’Sáber, 2003, p.140).

Christofoletti (1979) foi um dos principais divulgadores da geografia teórico-quantitativa, sendo fundamental o seu papel na difusão dos estudos e análises de cunho cibernético e sistêmico, além da preocupação com a modelagem. Quanto à concepção de geossistemas, Christofoletti (2002) equipara-os a sistemas ambientais físicos, de características abertas e representadas por complexos paisagísticos: *“Os sistemas ambientais físicos representam a organização espacial resultante da interação dos elementos componentes físicos da natureza (clima, topografia, rochas, água, vegetação, animais, solos) possuindo expressão espacial na superfície terrestre e representando uma organização (sistema) composta por elementos funcionando através dos fluxos de energia e matéria, dominante numa interação areal. As combinações de massa e energia, no amplo controle energético ambiental, podem criar heterogeneidade interna no geossistema, expressando-se em mosaico paisagístico. Ao lado dos fluxos verticais de matéria e energia, em função dos diversos horizontes estruturais dos ecossistemas, há os fluxos na dimensão horizontal conectando as diversas combinações paisagísticas internas do geossistema”* (Christofoletti, 2002, p.42).

Finalmente, o terceiro destaque, Monteiro (2001a e b), analisa a busca da noção de geossistemas como um conceito integrador na Geografia. Em relação aos aspectos taxonômicos, Monteiro adaptou a concepção de hólón de Koestler (1981) aos estudos geossistêmicos, preferindo caracterizar as unidades geossistêmicas como estruturas intermediárias ou subsistemas na ordem hierárquica, conceito de cunho holístico e complexo (Monteiro, 2001a). As possibilidades do uso da categoria de geossistema se

relacionam a três fatos: a sua relevância para os estudos da relação homem-natureza, nas avaliações de qualidade ambiental e na aplicação da Geografia ao planejamento (Monteiro, 2001a). Outra questão fundamental nos estudos dos geossistemas é a preocupação com os ritmos e a dinâmica processual dos geossistemas.

Em relação à metodologia científica dos geossistemas, Monteiro (2001a) se posiciona favoravelmente ao anarquismo metodológico de Feyerabend (1989) em relação ao posicionamento da ciência normal e dos paradigmas de Kuhn (1989). No debate epistemológico recente ele destaca: *“Nada indica que se haja firmado no conceito de ‘geossistema em PARADIGMA para a Geografia, nem mesmo para a Geografia Física. Vários pesquisadores de diferentes ramos do conhecimento, de diferentes lugares, muito mais por convergência de interesses do que por transferência linear, procuram aproximar-se do âmago da complexidade de que se revestem os fenômenos. Se nos ativermos ao campo do ‘geossistema’ vemos que a procura despertou o interesse e emergiu como programa de investigação em diferentes lugares, em diferentes geografias. Mais de trinta anos se passaram sem que se possa falar em formulação cabal deste conceito que, continua abstrato e irreal, disputando lugar com vários outros congêneres: ecossistema, geoeossistema, paisagem, unidade espacial ‘homogênea’, etc., etc. Impossível será confirmar a hipótese de um ‘consenso’ já que a procura, a variedade de caminhos, o inacabamento dos produtos alcançados, exibem mais um período ‘revolucionário’ do que um período ‘normal’”* (Monteiro, 2001a, pp.103-104).

Este posicionamento sintetiza a importância da liberdade disciplinar e de concepções científicas necessárias para o estudo dos geossistemas, nenhuma concepção determinista ou unilateral será capaz de apreender a realidade dos geossistemas. A concepção de geossistemas permite aliar as mais variadas teorias e disciplinas científicas (antigas ou atuais) com aspectos culturais e artísticos (mitológicos ou de nosso cotidiano), sendo um estímulo para ultrapassar o período que alguns denominam de crise e um importante instrumento para a Geografia que teria o papel de unir o estritamente científico ao

cotidiano. Em tal sentido: *“Tudo parece indicar que a complexidade do mundo será cada vez maior. Se a cada crise se identificar uma mutação, a Geografia em vez de uma sucessão de ‘Novas Geografias’ substituindo-se umas às outras, haverá antes uma Geografia permanentemente sacudida e agitada. Os geógrafos estão condenados àquilo que o poeta Drummond de Andrade chamava de ‘sentimento do mundo’. O verdadeiro geógrafo deverá ser alguém dotado de sensibilidade para captar o espírito do tempo, o Zeitgeist dos filósofos alemães”* (Monteiro, 2001a, p.105).

Uma das metodologias atuais, desenvolvida pelo INPE em convênio com a Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, para a análise integrada do meio ambiente e da sociedade do ponto de vista institucional no Brasil é o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE). Tal metodologia foi adotada pelo Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal como instrumento de planejamento e ordenamento do território brasileiro (Crepani et al., 2001).

Como elemento fundamental do ZEE podem-se destacar as unidades territoriais básicas, ou unidades de paisagem, que são as células elementares de informação e análise para um zoneamento ecológico-econômico. Como em um ser vivo, cada célula contém um conjunto de informações fundamentais à manutenção e à reprodução da vida e compõe um tecido que desempenha determinadas funções em seu desenvolvimento. Uma unidade territorial básica é uma entidade geográfica que contém atributos ambientais que permitem diferenciá-la de suas vizinhas, ao mesmo tempo em que possui vínculos dinâmicos que a articulam a uma complexa rede integrada por outras unidades territoriais.

A análise morfodinâmica das unidades de paisagem natural é feita a partir dos princípios da Ecodinâmica (Tricart, 1977) que estabelece diferentes categorias morfodinâmicas resultantes dos processos de morfogênese e pedogênese. Nesta análise quando predomina a morfogênese prevalecem os processos erosivos ou resistáticos, modificadores das formas de relevo como as ações antrópicas, e quando predomina a pedogênese prevalecem os processos formadores de solos ou de biostasia. Tais processos caracterizam as unidades de

paisagem segundo tais padrões ou meios, como apresentado por Tricart (1977), e por Crepani et al. (2001).

Assim, a partir da aplicação desta metodologia, é possível gerar cartas de vulnerabilidade natural à perda de solo para subsidiar o ZEE. Tal análise envolve a integração de dados de geologia, geomorfologia, fitogeografia, pedologia, clima, cobertura vegetal e uso da terra. Estudos deste tipo já foram adotados na região amazônica (Palmeira, 2004) e também na região nordeste (Gomes, 2005), como será visto a seguir.

2.4 Avaliação das Abordagens Integradas Aplicadas no Nordeste Brasileiro

Os estudos integrados da paisagem na região nordeste ainda não foram explorados em toda a sua potencialidade. Porém já existem exemplos de trabalhos com este enfoque em diferentes áreas da região, alguns com bastante antiguidade. Entre tais aplicações serão avaliadas aquelas análises de cunho histórico, de estudos geossistêmicos e de aplicações do ZEE.

Dentre os estudos pioneiros de uma abordagem integrada na região pode ser citado o trabalho de Vasconcelos Sobrinho (1971). Ele realizou uma análise das regiões naturais do Nordeste com ênfase nos aspectos físicos, ecológicos e sociais, contemplando boa parte dos seus problemas e características ambientais ocorrentes no período do seu estudo. Outro que merece destaque é aquele de Duque (1980), que buscava o entendimento integrado dos diferentes ambientes, existentes na Região Nordeste desde as matas de cocais, passando pela caatinga, até o sertão.

Dentre as abordagens geossistêmicas baseadas nos princípios metodológicos de Bertrand (1972), pode-se destacar aquela realizada por Monteiro (1988). Ele relacionou o estudo dos geossistemas com o papel da sociedade no processo de desertificação na região Nordeste. Outra análise pioneira com o uso desta abordagem foi a de Oliveira et al. (1987). Aqueles autores se basearam em dados de Sensoriamento Remoto e de campo, com a devida análise numérica de agrupamento, para a identificação de unidades de paisagem com uma

hierarquia taxo-corológica. Outro tipo de análise integrada da paisagem, aplicada no Nordeste Seco, foi realizada por Florenzano (1986). Ela se baseou na metodologia da escola australiana do CSIRO para a identificação de unidades de paisagem com base nas características morfográficas da paisagem, além da aplicação de métodos paramétricos e da morfodinâmica de Tricart (1977).

Dentre os estudos mais recentes, Souza e Oliveira (2003) caracterizaram os aspectos ambientais fundamentais no Estado do Ceará, através de uma compartimentação geoambiental desta área. Oliveira et al. (2003) realizaram um estudo sistêmico e integrado na busca de unidades geoecológicas e da suscetibilidade à degradação no município de Tauá-CE. Este estudo envolveu técnicas de Sensoriamento Remoto e de SIG, associados ao levantamento de dados integrados, possibilitando estratégias ao uso da terra e à gestão da paisagem de modo integrado e sustentável.

Um mapeamento das unidades de paisagem em nível de geossistema em três áreas do semi-árido brasileiro foi realizado por Carvalho e Pinheiro Junior (2004) e Carvalho e Freitas (2005) com a metodologia relacionada ao uso de sensoriamento remoto e de geoprocessamento. O propósito maior desta aplicação foi subsidiar a atividade **MAPBDG - Mapeamento fitogeográfico em nível de semidetalhe da cobertura vegetal atual em três áreas prioritárias localizadas nos estados do Ceará-Piauí (Serra das Almas), Paraíba (Curimataú Oriental) e Pernambuco (Betânia)**. Atividade inserida num dos subprojetos (BIOCAAT) do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO/PRONABIO/MMA).

Gomes (2005) realizou pesquisa que contempla a área de estudo desta pesquisa com a aplicação da metodologia do ZEE, em especial do índice de vulnerabilidade à perda de solo através da integração de dados ambientais existentes com o uso do Sensoriamento Remoto e de técnicas de geoprocessamento. Tal pesquisa apresentou como principal objetivo testar a metodologia do ZEE na região nordeste brasileira que ainda carece de maiores iniciativas de estudos ambientais integrados.

Freitas et al. (2005) geraram uma carta de vulnerabilidade natural à perda de solo a fim de subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico de parte da Região Nordeste do país com o uso de Sensoriamento Remoto e SIG. Este estudo aprofundou o mapeamento e a caracterização dos geossistemas (unidades de paisagem) de parte de uma das áreas-piloto investigadas no subprojeto visto anteriormente, chamada Serra das Almas (fronteira CE/PI). Em tal estudo foram utilizadas, de forma complementar, a metodologia de análise geográfica integrada dos Geossistemas ou Ecologia da Paisagem (Bertrand, 1972; Bertrand e Bertrand, 2002) e de Zoneamento Ecológico-Econômico - ZEE (Crepani et al., 2001).

2.5 Avaliação do Potencial do Sensoriamento Remoto e SIG para Aplicações em Ambientes Semi-Áridos

Existem poucos estudos e aplicações de métodos espectrais em relação ao Nordeste Seco do Brasil, sendo ainda raras as aplicações de técnicas de sensoriamento remoto e SIG nessa região. A seguir são apresentadas algumas das questões referentes à problemática do uso de tais técnicas, além de aplicações de Sensoriamento Remoto e SIG no bioma caatinga.

2.5.1 Problemática do Uso de Sensoriamento Remoto e SIG em Terras Secas

O estudo de paisagens semi-áridas com tecnologias e metodologias de sensoriamento remoto, em especial as regiões com condições ambientais mais diversificadas como o Nordeste Seco, representa uma grande problemática. Esta decorre principalmente da dificuldade de distinção de alvos em áreas de baixa cobertura vegetal e do papel dos solos no comportamento espectral de tais paisagens. Outro problema é referente à participação da vegetação não-fotossintetizante que, especialmente nos períodos secos, dificulta a interpretação do comportamento espectral de tais paisagens.

Os estudos de sensoriamento remotos aplicados aos ecossistemas e paisagens semi-áridos têm sua evolução relacionada tanto ao desenvolvimento de tais técnicas quanto à habilidade de interpretar as amplas e complexas interações entre os fatores determinantes do comportamento espectral dos dosséis vegetais e outros fatores paisagísticos, como a

variabilidade climática e o uso da terra. Tais fatores são muito variados e complexos envolvendo as propriedades fisionômicas e estruturais da vegetação, como as diferentes características ópticas dos tecidos vegetais (folhas, troncos e liteira), atributos biofísicos e bioquímicos dos dosséis, reflectância dos solos, condições de iluminação (ângulo solar), entre outros (Zonneveld, 1988; Asner, 1998; Asner et al., 2000).

Os mosaicos paisagísticos de diferentes tipos de vegetação e elementos pedológicos podem ser tratados de forma linear, quando vistos horizontalmente, com relativo sucesso na separação das frações de cobertura vegetal e manchas de solo desnudo, representando características bioquimicamente e estruturalmente complexas. Porém a caracterização vertical de tais mosaicos apresenta um comportamento altamente não-linear na interação da radiação eletromagnética com os componentes vegetais no espaço vertical. Tal não-linearidade traz grandes dificuldades para o estudo dos papéis dos tecidos e dos atributos estruturais determinantes das características da radiância de paisagens só com mensurações de campo, sendo recomendada a utilização conjunta de modelos espectrais (Asner, 1998).

Conjugada à questão espacial está o aspecto temporal, pois as paisagens semi-áridas apresentam caracteristicamente grande variação climática anual e interanual, com a oscilação entre estações secas e úmidas durante o ano e entre diferentes anos, com condições de maior ou menor secura. Tais variações climáticas têm efeito direto sobre a vegetação e os solos dessas regiões, com as espécies vegetais apresentando mecanismos de adaptação, como a alternância entre períodos com atividade fotossintética (estações úmidas) e outros sem essa atividade (estações secas) (Karnieli et al., 2002; Asner e Heidebrecht, 2002).

Elmore et al. (2000) realizaram uma comparação entre os métodos de índice de vegetação (NDVI) e análise de mistura espectral em sua aplicação em ecossistemas semi-áridos com o uso de dados do Landsat-TM 5. Esta comparação mostra que a análise de mistura espectral apresenta melhores resultados no estudo de tais ecossistemas e seus padrões heterogêneos,

enquanto o NDVI apresenta bons resultados em relação às variações nas condições da vegetação verde ou viva.

Asner e Heidebrecht (2002) usam a análise linear de mistura espectral com o objetivo de realizar uma decomposição das frações de cobertura de vegetação fotossinteticamente ativa, não fotossinteticamente ativa e de solos expostos em paisagem árida no Novo México, Estados Unidos. Tal modelo foi aplicado em dados de sensores remotos ópticos do sensor hiperespectral AVIRIS (*Airborne Visible Infra-Red Imaging Spectrometer*) e de seus dados integrados através de operações de convolução com dados de sensores multiespectrais como Landsat-TM, e os sensores MODIS e ASTER a bordo da plataforma Terra. A comparação entre a resposta dos diferentes sensores mostrou a supremacia dos sensores hiperespectrais para a discriminação das coberturas fracionais em paisagens semi-áridas. Onde apenas o sensor AVIRIS apresentou resultados bastante próximos às mensurações de campo. Também, dentre esses instrumentos, o AVIRIS foi o que apresentou a melhor relação entre sinal e ruído na faixa espectral do SWIR-2, para seu uso em análises de mistura espectral e no estudo e monitoramento de ecossistemas áridos e semi-áridos. A prática comum de normalização espectral por divisão em análises de mistura espectral se mostrou inapropriada tanto na prática como matematicamente (Asner et al., 2000; Asner e Heidebrecht, 2002).

Okin et al. (2001) avaliaram o uso de dados de sensores hiperespectrais em regiões áridas e semi-áridas. Para isso eles empregaram uma análise de mistura espectral com múltiplos membros finais. Ou seja, simplesmente um modelo de análise em que vários modelos de mistura espectral são analisados em série para a obtenção do melhor ajuste. Os resultados de tal estudo mostraram que os dados hiperespectrais não são uma panacéia para o monitoramento global efetivo de ecossistemas áridos e semi-áridos, pois os produtos de sensoriamento remoto sempre apresentam ruídos. As limitações do uso de dados hiperespectrais com análises de mistura espectral se mostram em condições ambientais que apresentam mudanças sutis nos seus parâmetros biofísicos e bioquímicos, como em áreas

de baixa cobertura vegetal. Os melhores resultados apresentados pela análise de mistura espectral com múltiplos membros finais foram aqueles em que se empregou o sensor hiperespectral AVIRIS, apesar de suas limitações para uma distinção acurada de tipos de vegetação, cobertura vegetal e solos.

Os diferentes resultados apresentados por Asner e Heidebrecht (2002) e por Okin et al. (2001) em estudos envolvendo os mesmos materiais e métodos se devem às diferentes características e padrões das paisagens estudadas. Os primeiros utilizam uma área de estudo composta por dois ecossistemas contíguos (um de campo de gramíneas e outro arbustivo), com reduzida biodiversidade, diferentes frações de cobertura vegetal fotossintética, de carbono seco e de solo exposto, além da presença de solos expostos sem crostas biológicas ou liteira. Já o ambiente estudado por Okin et al (2001) apresenta mosaicos mais complexos da paisagem, com maior variação florística e edáfica, tendo mais dificuldades na utilização de sensores hiperespectrais e análises de mistura espectral para a obtenção de resultados realmente satisfatórios.

2.5.2 Exemplos de Aplicações de Sensoriamento Remoto e SIG no Bioma Caatinga

A principal aplicação das técnicas em questão em relação ao semi-árido brasileiro, refere-se ao mapeamento da cobertura vegetal da caatinga com diferentes metodologias. Carvalho (1986) realizou um estudo multitemporal (1955-1983) a respeito da vegetação e cobertura vegetal na área de Quixaba-PE com o uso integrado de trabalho de campo, fotografias aéreas e imagens de satélite. Os resultados deste trabalho foram uma classificação das diferentes fácies e tipos estruturais da caatinga e uma análise da dinâmica da paisagem durante tal intervalo de tempo.

Já Carvalho e Pinheiro Júnior (2004) realizaram o mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal por fitofisionomia com seus respectivos estágios sucessionais e uso da terra em nível de semidetalhe, na escala de 1:100.000. Sobre a base do mapeamento das unidades ambientais, cada classe temática foi identificada usando o processo de classificação por

segmentação por regiões, complementada por interpretação visual diretamente na tela do computador. Estes autores procuraram caracterizar no campo, por intermédio de uma abordagem florístico-fisionômica-dinâmica, estas classes temáticas, enfatizando a estrutura da sua cobertura vegetal. Soares et al. (2005) realizaram uma análise comparativa das imagens CCD-CBERS 2 e ETM+-Landsat 7 na área de estudo da pesquisa para o mapeamento da cobertura vegetal. Tal estudo comparativo mostrou a potencialidade das imagens CBERS 2-CCD em tais mapeamentos, especialmente com o método de classificação e convolução nebulosos (*fuzzy*).

Outras aplicações são referentes à detecção de mudanças da cobertura vegetal e uso do solo com dados multitemporais. Um método de análise digital para imagens multitemporais utilizado para estudos da dinâmica ambiental no Nordeste Seco é a Análise por Componentes Principais (ACP). Tal metodologia foi aplicada em pesquisa sobre a dinâmica do uso da terra, com ênfase na detecção de mudanças através dos processos de degradação e recuperação ambiental, sendo mensuradas as transformações na cobertura vegetal e de solos expostos num intervalo de doze anos na área de Quixaba-PE (Maldonado, 1999; Maldonado et al., 2002). Sousa (2003) realizou uma análise multitemporal da cobertura vegetal com o uso de sensoriamento remoto e SIG, enfatizando a detecção de mudanças no município de Cedro-PE entre o período 1986-2001 através de ferramentas de segmentação por crescimento de regiões e de classificação supervisionada (algoritmo de Bhattacharya). Andrade e Oliveira (2004) fizeram uma análise espaço-temporal do uso da terra de parte do semi-árido cearense no intervalo 1984-1995 com o uso de ferramentas de segmentação por crescimento de regiões e de classificação supervisionada (MAXVER), além de fotointerpretação. Tal estudo comprovou o processo progressivo de degradação ambiental da área de estudo no período, sendo as áreas de caatinga arbórea aberta as mais degradadas.

Existem estudos preocupados, além do mapeamento da cobertura vegetal, com a avaliação das condições potenciais de uso da terra através da integração de informações ambientais. Teotia et al. (2003) realizaram uma classificação da cobertura vegetal e da capacidade do

uso da terra com o uso de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento conjugadas a trabalhos de campo na região do Cariri Velho-PB. Sendo este estudo relacionado com a busca de informações ambientais relacionadas com o uso e manejo adequado dos recursos naturais da área estudada. Printz e Lang (2003) desenvolveram um modelo baseado em SIG para o desenvolvimento sustentável do uso da terra aplicado em áreas no Ceará e Piauí, buscando a modelagem de riscos e sustentabilidades ecológicas, hidrológicas e econômicas com a sobreposição de diferentes planos de informação num banco de dados único.

Entre outras metodologias de sensoriamento remoto, o NDVI foi testado em áreas de caatinga com resultados não satisfatórios, em especial na estação mais úmida onde chegou à saturação (Kazmierczak, 1993). Costa et al. (2002) utilizaram também o NDVI relacionado com índices de área foliar na caatinga do Seridó-RN/PB, envolvendo também técnicas de inventário florestal em campo. Tais técnicas necessitam de avaliação criteriosa de seus resultados devido à grande dependência destas em relação às condições climáticas e fenológicas da caatinga nos diferentes ambientes do Nordeste Seco (Maldonado, 2005).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Como visto na revisão bibliográfica, a abordagem holística é fundamental nos estudos integrados da paisagem, em especial devido ao seu caráter aberto em relação aos métodos de integração das variáveis de estudo. Neste capítulo, apresenta-se primeiramente a área geográfica selecionada para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa de mestrado, bem como de suas características principais, tendo como base os princípios metodológicos da abordagem integrada da paisagem discutida anteriormente. Em seguida, especificam-se sumariamente os materiais utilizados, com destaque dos produtos cartográficos e de sensoriamento remoto. Finalmente, discutem-se as principais etapas da abordagem metodológica empregada como: o processamento digital de imagens, a classificação da dinâmica da cobertura vegetal, a geração de modelos digitais de elevação, o mapeamento geomorfológico, a delimitação dos geossistemas e geofácies, aplicação do índice de vulnerabilidade à perda de solo, o tratamento estatístico dos dados de campo e a análise final dos resultados e conclusões.

3.1 Área de Estudo

A área de estudo corresponde a um quadrado de aproximadamente 190 km². Ela é definida cartograficamente pelas coordenadas geográficas de 8° 00' 00" a 8° 07' 30" de latitude sul e de 39° 45' 00" a 39° 53' 30" de longitude oeste. Hidrologicamente ela está inserida na bacia hidrográfica do rio Brígida, uma sub-bacia do médio vale do rio São Francisco. Como referência foi escolhido o povoado de Quixaba, de maior concentração populacional da área, situado no Município de Parnamirim, Estado de Pernambuco (Figura 3.1).

Esta área foi selecionada, principalmente por ter sido objeto de várias pesquisas de sensoriamento remoto anteriores, entre elas estudos detalhados da cobertura vegetal (Carvalho, 1986), da dinâmica do uso da terra por detecção de mudanças (Maldonado, 1999, 2005), avaliação de sensores orbitais e metodologias para classificação da cobertura

vegetal (Soares et al., 2005) e aplicação de metodologia de índice de vulnerabilidade à perda de solo do zoneamento ecológico-econômico (Gomes, 2005). Mas, também, por estar dentro da área *core* ou nuclear do sertão nordestino, no centro-oeste do Estado de Pernambuco, à margem do núcleo de desertificação de Cabrobó (Vasconcelos Sobrinho, 1983) e, portanto, bastante representativa das condições gerais do Bioma Caatinga e da problemática da desertificação.

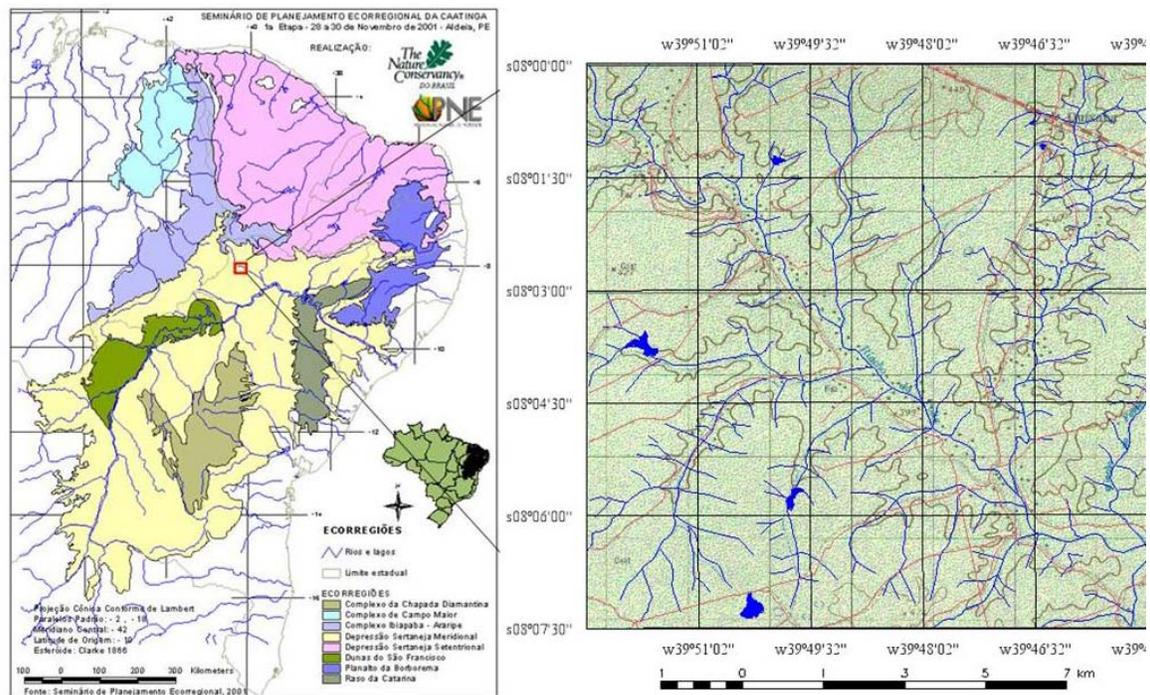


FIGURA 3.1 - Localização da área de estudo.
 FONTE: Velloso et al. (2002).

Nesta apresentação da área de estudo foi realizado o esforço de gerar uma taxo-corologia das primeiras ordens de grandeza escalares ou hierárquicas conforme proposta de Bertrand e Bertrand (2002) e da adaptação à Região Nordeste realizada por Carvalho e Pinheiro Junior (2004) e Carvalho e Freitas (2005a). Tal hierarquia paisagística se encontra esquematizada na Tabela 3.1, em que pode ser vista a relação das unidades taxonômicas geossistêmicas.

TABELA 3.1: Hierarquia taxo-corológica dos primeiros níveis de grandeza.

Taxo-corologia		Denominação
Grandes unidades ambientais	Zona	Zonoecótono II/III (Walter, 1986)
	Unidade Litoestratigráfica	Província da Borborema (IBGE, 1997)
	Domínio Morfoestrutural	Escudo Exposto (RADAMBRASIL, 1983)
	Região Geomorfológica	Depressões Interplanálticas (RADAMBRASIL, 1983)
	Unidade Morfoescultural	Pediaplano Sertanejo (RADAMBRASIL, 1983)
Divisão em paisagens	Unidade de Paisagem	Depressão Sertaneja Meridional (Velloso et al., 2002)
	Unidade Geoambiental	Áreas de Relevo Suave Ondulado de Ouricuri e Petrolina – PE (F22) (Silva et al., 2000)

3.1.1 Grandes Unidades Ambientais

Em primeiro lugar, apresenta-se a divisão em grandes unidades ambientais que estão relacionadas aos primeiros níveis hierárquicos da taxo-corologia de Bertrand e Bertrand (2002). De acordo com estes autores o conceito de zona está relacionada diretamente ao clima. A unidade litoestratigráfica corresponde à base geológica na qual a determinada paisagem se fundamenta. O domínio morfoestrutural representa as formas de relevo associadas à estrutura geológica. A região geomorfológica aos conjuntos de formas semelhantes em nível regional. E a unidade morfoescultural se relaciona às unidades morfogeneticamente correspondentes.

3.1.1.1 Zona

A caracterização da primeira ordem de grandeza da paisagem (Bertrand e Bertrand, 2002) foi baseada na classificação da geobiosfera com ênfase no zoneamento climático em escala global, onde os diferentes biomas são relacionados com a zona climática a que pertencem, compreendendo sistemas ecológicos maiores ou zonobiomas numa hierarquia mais alta. De

acordo com a classificação de Walter (1986) a área de estudo pertence ao **Zonoecótono II/III**, uma região de transição entre os zonobiomas II e III. O primeiro, **Zonobioma II: Região tropical úmido-árida de chuvas estivais e de florestas de folhas caducas**, é determinado pela atuação de climas com alternância de estações secas e chuvosas bem definidas e coberta por vegetação de savana, apresentando como exemplos: o Bioma Cerrado no Planalto Central brasileiro, grande parte da África, a Índia e o sudeste da Ásia, além da parte setentrional da Austrália. Já o segundo, **Zonobioma III: Região subtropical do clima árido com presença de desertos**, caracteriza-se pelas áreas nas quais a evaporação potencial (superior a 2000mm ao ano) é sensivelmente superior do que a precipitação (inferior a 200mm por ano), sem a presença de inverno frio como nos desertos de clima temperado. Neste zonobioma, ocorre o desenvolvimento de espécies xerófitas e halófitas com mecanismos de adaptação às condições climáticas e edáficas, além de mosaicos de vegetação dos trópicos úmidos em habitats favoráveis, tendo como exemplo as regiões desérticas: do Saara e da Namíbia (África), do Atacama (América do Sul), da Austrália Central, entre outros (Walter, 1986).

O **Zonoecótono II/III** está relacionado com a presença de savanas climáticas, vegetação que se distingue pelas precipitações anuais em torno de 500mm. Foram mencionadas como exemplos deste ambiente a região do Sahel (África), o Deserto de Thar ou Sind (Ásia) e outras (Walter, 1986). No contexto destes exemplos, deve-se incluir o Bioma Caatinga no Brasil, que será o enfoque desta descrição hierárquica em primeiro nível de grandeza.

O Bioma Caatinga corresponde à área da região Nordeste do Brasil que apresenta condições climáticas semi-áridas que se refletem na interação de diversos fatores socioambientais. Dentre estes fatores pode-se mencionar como os principais: as restrições climáticas relacionadas às secas, a vegetação de caatinga e as difíceis condições de sobrevivência e desenvolvimento de sua população. A sua delimitação é objeto de muita discussão, e por isso até hoje ainda não foi definitivamente estabelecida. Dentre as propostas mais recentes, podem-se destacar três: a primeira que definiu as grandes divisões

ecogeográficas deste bioma (Velloso et al., 2001); a segunda diferenciada pela inclusão de 164 municípios (num total de 1.280 municípios) para eliminar os espaços vazios existentes na primeira (Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Caatinga, 2004); e a última, que buscou a delimitação do bioma na escala 1:5.000.000 com diferentes critérios (Funceme, 2005).

A caracterização ambiental deste bioma envolve a interação complexa entre diversas variáveis físicas, ecológicas e sociais, que lhe dão uma certa homogeneidade. Uma das principais e mais marcantes é o clima, que apresenta como variável climatológica fundamental a precipitação. A precipitação regional é controlada em seus diferentes períodos anuais sazonais de chuvas e seca pela circulação em larga escala. Sendo essas duas estações determinadas pela posição da zona de convergência intertropical (ZCIT) que está relacionada com a posição da área de alta pressão do Atlântico Norte e Sul e da temperatura da superfície marítima. Assim, quando a ZCIT não consegue chegar tanto ao sul, as condições climáticas da área tendem a um clima mais seco, podendo ocasionar secas (Figura 3.2). Outro fenômeno que pode determinar alternâncias climáticas é o El Niño que pode causar tanto secas, quanto incrementos no período chuvoso (Werner e Gerstengarbe, 2003).

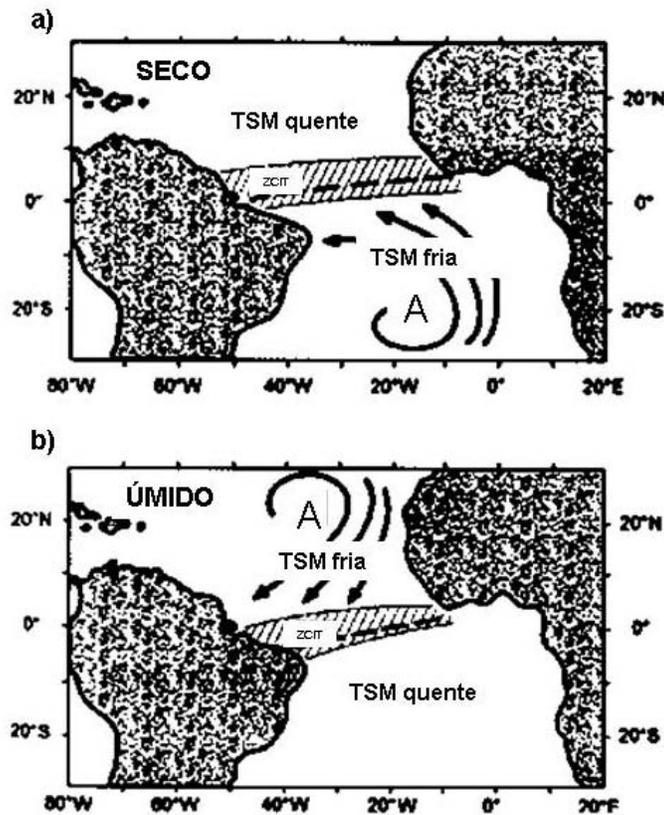


FIGURA 3.2 - Esquema dos padrões de circulação em larga-escala do Atlântico: A) Período seco; B) Período chuvoso.
 FONTE: Werner e Gerstengarbe (2003).

Na escala local, a área apresenta um clima tropical semi-árido (Bsh, conforme Köppen) caracterizado pela grande irregularidade sazonal e interanual nas precipitações, causando o fenômeno da ocorrência de secas periódicas de extremo impacto ecológico e social e a característica de um “inverno” seco e um “verão” que concentra a precipitação anual. Este clima apresenta pouca variação térmica ao longo do ano (temperaturas médias anuais ao redor de 25°C) e precipitações médias entre 500 e 750 mm com estação seca de 7 a 8 meses como visto na Figura 3.3. Em relação à variação climática ao longo do dia, a área apresenta período diurno bastante quente com temperatura acima de 30°C com queda bastante

acentuada durante a noite devido à característica climática de continentalidade (Vasconcelos Sobrinho, 1983; Carvalho, 1986; SUDENE, 2000; Maldonado, 2004).

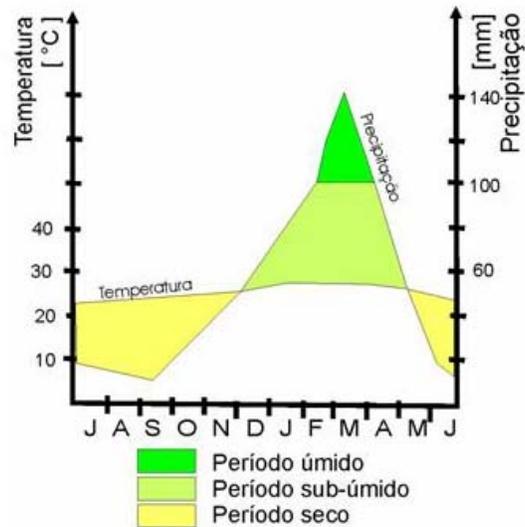


FIGURA 3.3 - Diagrama ombrotérmico da área de Quixaba.

FONTE: Maldonado (2004).

O outro elemento fundamental refere-se às características fitogeográficas do bioma e suas coberturas extensivas de caatingas. Este tipo de vegetação está muito bem adaptado às condições climáticas semi-áridas. Apresenta diversos mecanismos de adaptação relacionadas com a economia d'água, característica das formações vegetais xerófilas. A caatinga é formada por um conjunto de árvores e arbustos espontâneos, densos, baixos, retorcidos, de aspecto seco, de folhas pequenas e caducas no período seco, com proteção contra a desidratação pelo calor e pelo vento. As espécies lenhosas, arbóreas e arbustivas, por efeito do clima, ocorrem em maior proporção que as plantas herbáceas e anuais, sendo definida como uma associação de árvores e arbustos unidos, dotados de espinhos, de folhas caducas, caules retorcidos, porte baixo, com sub-vegetação de bromeliáceas. Tais características da caatinga variam conforme a localização, tendo em vista os diferentes compartimentos topográficos, solos sedimentares ou de origem cristalina, entre outros fatores (Rizzini, 1976; Duque, 1980; Carvalho, 1986; Maldonado, 1999, 2004).

3.1.1.2 Unidade Litoestratigráfica

Do ponto de vista geológico e geomorfológico a área deste bioma é representada por diferentes estruturas, sendo as mais típicas os terrenos cristalinos submetidos aos processos de aplainamento com a geração de depressões interplanálticas (Pediaplano Sertanejo). Ainda são importantes as formações planálticas cristalinas como o Planalto da Borborema, sem contar as chapadas areníticas e os campos de inselbergs areníticos ou graníticos ao longo de sua extensão e nas áreas de transição com outros biomas (Ab'Sáber, 2003).

O Bioma Caatinga situa-se no centro de um grande escudo cristalino pré-cambriano, o Escudo Guiano-Brasileiro. Sua litologia está relacionada à **Província da Borborema** que foi palco de atuação do Ciclo Brasileiro com variada intensidade através de fenômenos termiais, tectônicos e magmáticos. Esses fenômenos mascararam as feições geológicas mais antigas, com a geração de novas feições e unidades geológicas (IBGE, 1997).

De acordo com o RADAMBRASIL (1983), as unidades geológicas fundamentais do Bioma Caatinga na área de estudo são os Complexos Presidente Juscelino e Monteiro. O primeiro, datado do Arqueozóico, é formado por rochas migmatíticas, gnaisses, e metabásicas-ultrabásicas com núcleos granulíticos. O segundo, datado do Proterozóico Inferior, é composto por gnaisses com intercalações de calcossilicáticas, mármores, xistos e anfibolitos. Foram também mapeadas na área unidades geológicas de depósitos fluviais, predominantemente arenosos e com quantidades subordinadas de silte, argila e níveis de cascalho na base; e depósitos eluvionares e secundariamente coluvionares de característica arenosa e argilo-síltica-arenosa com níveis conglomeráticos, apresentando ainda variedades ferruginosas e carbonáticas relacionadas às superfícies de pediplanação e denudação sul-americana (RADAMBRASIL, 1983; IBGE, 1997).

Conforme CPRM (2001) a área representa o Fragmento Icaíçara do terreno Piancó-Alto Brígida, compondo dois Complexos principais com idade entre o Arqueano e o Paleoproterozóico. O Complexo Barro (Pb) é constituído por granada-biotita xistos, por

vezes com estaurólita e cianita, contendo intercalações de paragneisses, calcários cristalinos, rochas calcissilicáticas, formações ferríferas, silimanita quartzitos, muscovita xistos e anfibólitos. O outro complexo principal corresponde a um dos Complexos Gnáissicos-Migmatíticos Indiscriminados (Pgm4) que compreende biotita *augengnaisses* calcialcalinos de composição granodiorítica a monzogranítica. Ainda foram mapeadas áreas datadas do Cenozóico, correspondentes aos depósitos elúvio-colúviais terço-quaternários (Tqd) compostos de sedimentos detríticos areno-sílticos e areno-argilosos inconsolidados ou pouco consolidados, localmente ferruginosos e com níveis conglomeráticos nas porções inferiores; e Depósitos Quaternários (Qha) representados por sedimentos terrígenos (areias, argilas e conglomerados) de origem aluvial.

3.1.1.3 Domínio Morfoestrutural

Segundo o mapeamento geomorfológico do RADAMBRASIL (1983), a área de estudo está situada mais precisamente no interior do **Domínio Morfoestrutural do Escudo Exposto**, que engloba porções emersas da plataforma constituídas de antigas cadeias estabilizadas desde o Pré-Cambriano Inferior. Sua granitização, ocorrida nos Ciclos Transamazônico até o Brasileiro, conferiu uma rigidez que possibilitou suportar os dobramentos ocorridos durante ciclos geotectônicos posteriores. Nas áreas metamorfizadas, como a deste estudo, um dos processos principais na sua formação foi a ablação, conduzida pela evolução morfoclimática e pela tendência positiva da sequência vulcanossedimentar. Este processo possibilitou o desenvolvimento de superfícies de aplainamento com a presença de relevos residuais principalmente em faixas de quartzitos e veios de quartzo.

3.1.1.4 Região Geomorfológica

A área de estudo corresponde, dentro do Domínio do Escudo Exposto, à **Região Geomorfológica das Depressões Interplanálticas**. Esta região é caracterizada por processos de aplainamento predominantes na sua morfogênese que mascaram parcialmente seus traços estruturais. Tais traços são esboçados apenas pela orientação da rede de

drenagem e pelas elevações residuais. Apresenta as características climáticas típicas do semi-árido com cobertura vegetal de caatinga em diferentes fácies fitofisionômicas, além de drenagem de rios intermitentes com padrão subdentritico e fundos de vales dos canais principais com fundo chato e dos subafluentes em forma de “V” aberto. Os canais de 2ª ordem têm leitos rasos que recebem durante as enxurradas os materiais sedimentares provenientes do intemperismo químico e de outros processos erosivos (RADAMBRASIL, 1983).

3.1.1.5 Unidade Morfoescultural

A área corresponde à **Unidade Morfoescultural do Pediplano Sertanejo** (Ab’Sáber, 2003; RADAMBRASIL, 1983). Esta unidade é caracterizada por feições morfológicas de topos planos, expressas por interflúvios tabulares e altitudes médias de 300 a 500m, típicos de superfícies de aplainamento degradadas e remanescentes, ligadas às variações climáticas e ecológicas do Quaternário, com fraca decomposição e freqüentes afloramentos rochosos (chãos pedregosos). A drenagem é intermitente com a presença de canais semi-anastomasados locais, correspondendo aos modelados de dissecação e formação de planícies e terraços aluviais (Ab’Sáber, 2003). Tal unidade está relacionada a dois modelados principais: (1) a Superfície de Aplainamento Degradada Inhumada (Pgi), relacionada a feições planas inhumadas por coberturas de origem diversas; (2) a Superfície de Aplainamento Retocada Inhumada (Pri), com planos inclinados uniformizados por coberturas de origens diversas resultantes de remanejamentos sucessivos indicando a presença de processos de erosão areolar (RADAMBRASIL, 1983).

O mapeamento morfopedológico da Embrapa/Orstom (1986) se refere à área como representante da Unidade de Paisagem do Pediplano Meridional (Granito-gnaisses, Micaxistos e Quartzitos), e da Unidade de Paisagem de Relevos Aplainados em Fase de Dissecação sobre Micaxistos e Epignaises. Em relação ao Pediplano Meridional, foram identificadas as Unidades Morfopedológicas de Relevos Residuais Aplainados e Dissecados, em faixas, muito dissecados com vales estreitos em “V” e com depressões

fechadas no alto da vertente; e de Fundo de Vales Amplos com um alúvio-colúvio de leito menor bem marcado (Riacho Gravatá). Em relação aos Relevos Aplainados, estes são caracterizados pelas Unidades Morfopedológicas de Platôs Ondulados Baixos, dissecados por vales muito estreitos de fundo chato e sinuosos (colúvio); e de Fundos de Vales Estreitos representada por alúvio-colúvio de leito menor bem marcado.

3.1.2 Divisão em Paisagens

A divisão em paisagens foi relacionada com a identificação da unidade de paisagem em que se encontra a área. Ela foi realizada tendo como base os estudos das ecorregiões do Bioma Caatinga (Velloso et al., 2002), e dos seus geoambientes conforme a delimitação do Zoneamento Agroecológico do Nordeste - ZANE (Silva et al., 2000).

3.1.2.1 Unidade de Paisagem

A área de estudo se localiza na **Depressão Sertaneja Meridional** conforme a divisão ecorregional do Bioma Caatinga (Velloso et al., 2002) que ocupa a maior parte do centro e sul do bioma. O clima da ecorregião é predominantemente quente e semi-árido, com dois períodos chuvosos distintos principais - de outubro a abril nas áreas de sertão e de janeiro a junho nas áreas de agreste. A precipitação média anual varia de 500 a 800 mm, sendo que nas áreas mais altas do sul da ecorregião (Chapada Diamantina) ela pode ultrapassar 1.000 mm/ano. Em relação à Depressão Sertaneja Setentrional, nesta existe uma maior regularidade da estação chuvosa (menor incidência de secas), e apresenta também uma distribuição de chuvas menos concentrada. Apresenta ainda solos mais profundos, principalmente na parte oeste, constituída por latossolos; além de relevo mais acidentado, contendo rios permanentes e uma grande quantidade de corpos d'água temporários (rios e lagoas), que propiciam uma flora e fauna mais variadas e muito características. Em relação à vegetação, apresenta a caatinga arbustiva a arbórea, de porte mais alto e mais rica em espécies que a da Depressão Setentrional.

3.1.2.2 Unidade Geoambiental

A divisão em unidades geoambientais do ZANE classificou a área como pertencente às **Áreas de Relevo Suave Ondulado de Ouricuri e Petrolina – PE (F22)** de clima tropical semi-árido (precipitação média anual em torno de 500 mm) com período chuvoso de novembro a abril. Esta unidade geoambiental se relaciona ao relevo de tabuleiros baixos com alguns entalhes e cristas residuais disseminadas. Apresenta as seguintes associações paisagísticas: topos de relevo suave ondulado com cobertura de solos como o Argissolo; tabuleiros baixos estreitos onde predominam Latossolos; vertentes de relevo suave ondulado com solos de tipo Argissolo; vertentes íngremes de entalhe com Luvisolos; topos e baixas vertentes das cristas com Neossolos Regolíticos; e fundos de vale com Neossolos Flúvicos (Silva et al., 2001).

Esta é uma área de atividades agrícola e pecuária tradicional integrada, de potencialidade média, e com a vegetação natural de caatinga utilizada como pecuária extensiva. A principal limitação é a falta d'água, a irregularidade em relação às precipitações e baixa fertilidade natural dos solos, dificuldades que podem ser superadas em pólos de irrigação como o de Petrolina (PE). As principais atividades pecuárias da área são a bovinocultura de corte, caprinocultura, ovinocultura e suinocultura, sendo conjugadas às atividades agrícolas como feijão, milho, mandioca, mamona, algodão, cebola, tomate, abóbora, manga, uva, cítricos, melão e melancia (Silva et al., 2001).

3.2 Materiais

Neste item são apresentados os principais materiais usados para a realização desta pesquisa, com ênfase nos *softwares* de geoprocessamento, na base cartográfica anteriormente existente e nos produtos de sensoriamento remoto como imagens de satélite e dados topográficos de radar.

3.2.1 Sistemas de Informação Geográfica

Neste trabalho, foram utilizados, de forma conjugada, os *softwares*:

- Spring 4.2 para a montagem do banco de dados principal do trabalho, pois permite uma boa organização dos dados e a continuação da pesquisa por outros usuários ou pesquisadores;
- Envi 4.0, Idrisi Kilimanjaro e Erdas 8.4 em operações de geoprocessamento e processamento digital de imagens não desenvolvidas nos *softwares* acima mencionados;
- Statistica 6.0 nas análises estatísticas multivariadas dos dados de campo.

3.2.2 Base Cartográfica

Como mapas temáticos de base utilizaram-se:

- Carta topográfica de Parnamirim-PE (IBGE - MIR 1362) na escala 1:100.000 com equidistância entre as curvas de nível de 50 metros;
- Carta do levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos (Folha Parnamirim SC-24-C-I - Zoneamento Agro-ecológico do Estado de Pernambuco, 1997) na escala 1:100.000;
- Carta dos tipos estruturais da vegetação de caatinga da área de Quixaba para o ano de 1983 (Carvalho, 1986) na escala 1:100.000;
- Esboço morfopedológico de Ouricuri-PE (Embrapa-Orstom, 1986) na escala aproximada de 1:70.000.
- Mapa geológico do Estado de Pernambuco (CPRM, 2001) na escala 1:500.000.

3.2.3 Produtos de Sensoriamento remoto

Os produtos de sensoriamento remoto escolhidos para este trabalho foram:

- Imagem CBERS 2 – CCD (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), cena 151/109, com data de 31/08/2004, resolução espacial de 20m e espectral de 4 bandas representando o azul (0,45 – 0,52 μm), verde (0,52 – 0,59 μm), vermelho (0,63 – 0,69) e infravermelho próximo (0,77 – 0,89 μm). Apresenta cobertura de nuvens nula, além de representar por sua data a estação seca que é favorável aos propósitos da pesquisa, em especial para a interpretação fisionômico-estrutural da cobertura vegetal (Carvalho, 1986; Maldonado, 2004).
- Dados topográficos da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) que são modelos de elevação digital (MDE) com resolução espacial de 90m de cobertura praticamente global. Esta missão usou o mesmo instrumento do programa *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar* (SIR-C/X-SAR), projetado para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre através de interferometria pelas bandas C e X. (Valeriano, 2004)

3.3 Abordagem Metodológica

Os procedimentos metodológicos utilizados podem ser divididos em sete fases complementares (Figura 3.4). A primeira é a montagem do banco de dados geográfico, em ambiente computacional Spring 4.2, reunindo as informações já existentes. A segunda é o processamento digital de imagens CBERS-2 para geração de produtos que sirvam como base para os mapeamentos temáticos e sintéticos. A terceira é a geração de modelos digitais de elevação (MDE), de seus produtos derivados (declividade, hipsometria, perfis topográficos e outros) e do mapeamento geomorfológico da área. A quarta consiste na classificação da dinâmica da cobertura vegetal entre os anos de 1983 e 2004. A quinta se refere aos mapeamentos de cunho integrado, com a delimitação dos geossistemas e das geofácies e com o cálculo do índice de vulnerabilidade à perda de solo; todas estas através

da integração de variáveis ambientais com o uso de ferramentas de geoprocessamento. A sexta fase envolveu a avaliação e validação com trabalho de campo dos resultados obtidos. Na sétima fase analisaram-se os resultados com ênfase nos dados de campo e sua relação com o mapeamento integrado da paisagem a partir de ferramentas estatísticas, tendo como base a problemática da desertificação.

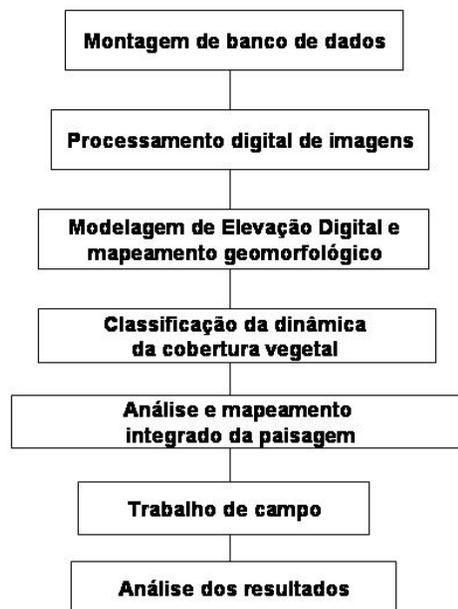


FIGURA 3.4 - Fluxograma com etapas da abordagem metodológica.

3.3.1 Montagem do Banco de Dados

A fase de organização dos dados referentes à pesquisa, em que se basearam as operações de processamento de imagens e geoprocessamento na integração de dados ambientais, é fundamental nos estudos integrados da paisagem. Os materiais da pesquisa foram organizados num banco de dados geográficos (Figura 3.5) em ambiente computacional Spring 4.2 que permite o armazenamento e as operações em SIG destes dados. Tal tarefa foi acompanhada de um georreferenciamento de todos os materiais cartográficos e de sensoriamento remoto para o posterior uso deste banco de dados em outros estudos e por instituições interessadas nos dados levantados. Foram utilizados como características

cartográficas principais a escala de 1:100.000, projeção UTM, datum horizontal de Córrego Alegre e zona sul 24.

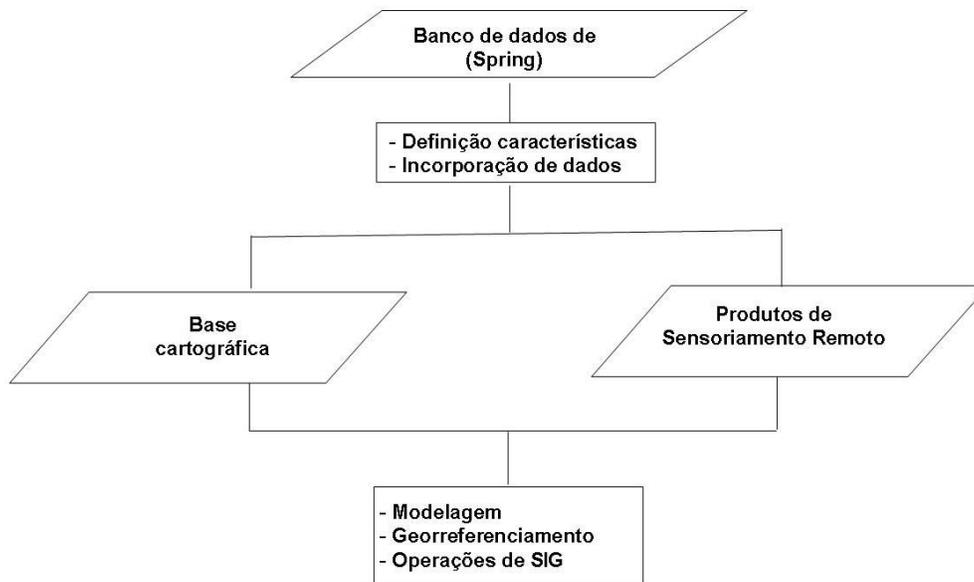


FIGURA 3.5 - Fluxo metodológico da montagem de banco de dados em ambientes Spring 4.1.2 e Terra View 3.0.3.

Os dados referentes às variáveis de estudo já existentes foram detalhados na seção 3.2.2 e contemplam mapeamentos geomorfológicos, pedológicos, topográficos, de cobertura vegetal e uso do solo, além da base cartográfica de rede viária e estradas, dados que sofreram processos de digitalização e edição quando necessários. Os produtos de sensoriamento remoto, base do levantamento de dados novos e atualizados como a classificação da cobertura vegetal e o MDE, foram incorporados ao banco de dados com as devidas calibrações necessárias (em especial geométricas e atmosféricas).

A modelagem do banco de dados seguiu os pressupostos de integração dos dados ambientais referentes aos estudos integrados da paisagem, em especial dos geossistemas e do índice de vulnerabilidade à perda de solo. Desta forma os dados foram organizados em

categorias de geo-campos e geo-objetos o que possibilitou a realização de operações de geoprocessamento de forma mais sistemática (Câmara et al., 2004).

3.3.2 Processamento Digital de Imagem

O processamento digital de imagem constitui uma importante fase para a aquisição de dados referentes às características ecológicas e sociais da área de estudos, fundamentais para os estudos integrados da paisagem. Esta fase foi dividida em duas etapas de acordo com Mather (1999), Crósta (1992), Salinero (2002) e outros, conforme apresentado na FIGURA 3.6. Tais etapas se referem aos procedimentos de calibração das imagens utilizadas e às técnicas de modelagem de dados de sensoriamento remoto para melhor interpretação e a geração de produtos com uso de sensoriamento remoto como a classificação da cobertura vegetal e uso do solo.

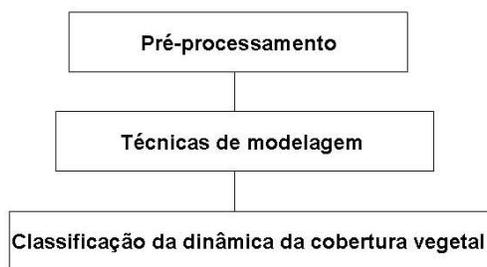


FIGURA 3.6: Fluxograma metodológico geral do processamento de imagens digitais.

3.3.2.1 Pré-processamento

A fase de pré-calibração dos dados CBERS 2-CCD foi realizada para um ajuste dos dados originais em relação ao georreferenciamento (correção geométrica) e em relação aos efeitos atmosféricos durante a aquisição da imagem (calibração atmosférica), como apresentado na Figura 3.7. Estes procedimentos são fundamentais para as operações de processamento digital de imagem e de geoprocessamento posteriores.

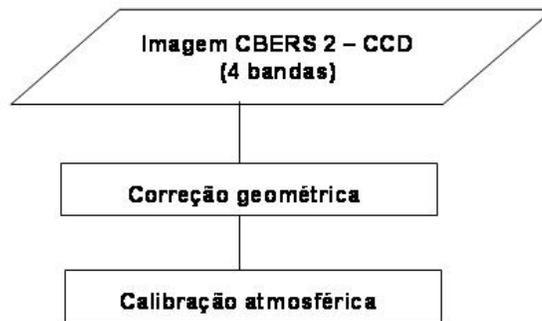
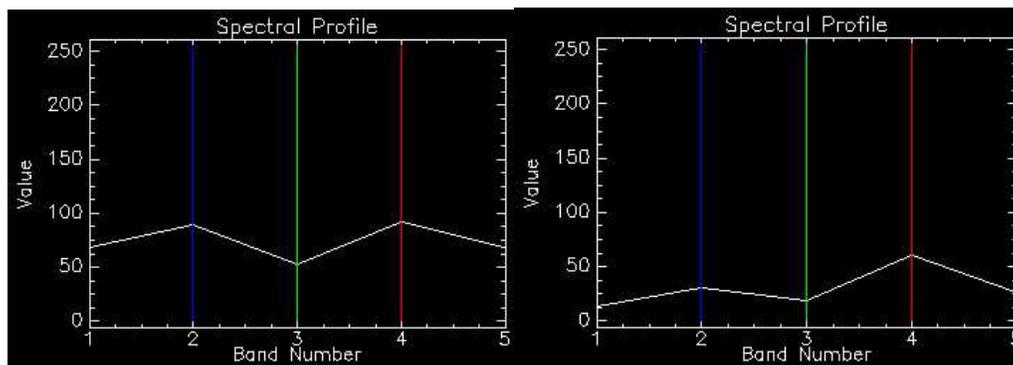


FIGURA 3.7- Fluxograma da etapa de pré-processamento de imagem CBERS 2 – CCD.

Para a correção geométrica foi utilizado o polinômio de primeiro grau, com erro final inferior a um pixel, e reamostragem com interpolação por vizinho mais próximo, que mantém os níveis de cinza originais da imagem (Crósta, 1992, Mather, 1999). Já a calibração atmosférica foi realizada pelo método empírico de subtração do pixel escuro da imagem (Chavez, 1988; ENVI, 2003) que não envolve a utilização de modelos atmosféricos e apresentou os resultados da Figura 3.8. Tais dados foram transformados em valores de reflectância de superfície através dos coeficientes de calibração absoluta da Tabela 3.2 e de elevação solar da Tabela 3.3.



(A)

(B)

FIGURA 3.8: Resultados da calibração atmosférica nos dados CBERS 2-CCD: (A) antes da calibração e (B) após a calibração.

TABELA 3.2 – Coeficientes de calibração absoluta da câmera CCD/CBERS-2 (CCn)

<i>CCD-1</i>	<i>CCD-2</i>	<i>CCD-3</i>	<i>CCD-4</i>
1,009	1,930	1,154	2,127

TABELA 3.3 – Valores de elevação solar no topo da atmosfera ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$)

<i>esun1</i>	<i>esun2</i>	<i>esun3</i>	<i>esun4</i>
1934,03	1787,10	1548,97	1069,21

3.3.2.2 Técnicas de Modelagem em Sensoriamento Remoto

As técnicas de modelagem em sensoriamento remoto envolvem a transformação de dados originais para uma melhor interpretação. Utilizaram-se duas técnicas diferentes com o intuito de realçar classes de cobertura através de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e de homogeneizar mosaicos paisagísticos existentes na área com Análise de Componentes Principais (ACP), como pode ser visto na Figura 3.9.

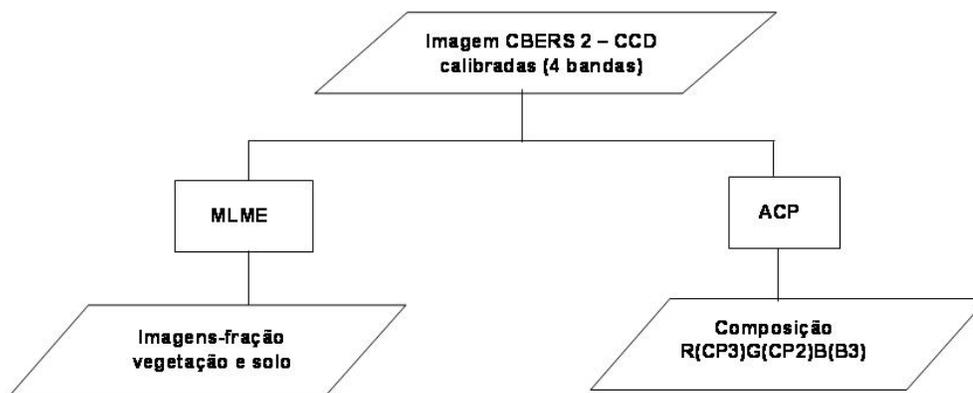


FIGURA 3.9: Fluxograma da etapa de técnicas de modelagem em sensoriamento remoto.

3.3.2.2.1 Modelo de Mistura Espectral

O MLME se baseia no pressuposto de que o sinal detectado pelo sensor num determinado pixel retrata a mistura de diferentes tipos de cobertura terrestre e que podem ser geradas imagens-fração em nível sub-pixel a partir de *endmembers* que representam as respostas espectrais de cada componente assumido como existente nesta mistura (Shimabukuro, 1987; Asner e Heidebrecht, 2002; Salinero, 2002). A imagem CBERS 2 – CCD foi

utilizada com suas quatro bandas e a metodologia adotada foi a que apresentou melhores resultados.

A aplicação deste modelo iniciou com uma transformação denominada Fração de Mínimo Ruído (MNF, *Minimum Noise Fraction*) que reduz a dimensionalidade dos dados e o ruído da imagem, além das requisições computacionais nas operações subseqüentes. Esta técnica consiste na realização de duas ACP consecutivas: no qual a primeira é baseada numa estimação da matriz de covariância do ruído e permite eliminar redundâncias e re-escalar o ruído dos dados, e a segunda é uma ACP convencional dos dados já depurados (Salinero, 2002; ENVI, 2003).

Sobre tal transformação se realiza o procedimento denominado Índice de Pureza de Pixel (PPI, *Pixel Purity Index*) que é usado para a extração de forma mais objetiva de pixels puros, pois permite assegurar a qualidade das estatísticas mesmo com escasso conhecimento da área de estudo. O método parte da representação num espaço n-dimensional que se reprojeta aleatoriamente (foram utilizadas 10000 iterações e limiar de 2500), com a escolha dos pixels puros recaindo naqueles localizados nos extremos de tal espaço. Uma imagem de pureza de pixel é criada com os valores relacionados com o número de vezes que ele foi assinalado como puro (Salinero, 2002; ENVI, 2003).

Os *endmembers* (Figura 3.10) foram escolhidos com o suporte do PPI para a realização do modelo linear de mistura espectral com três imagens-fração dos componentes de vegetação fotossinteticamente ativa, solo e água/sombra identificados; além de uma imagem de erro médio quadrático (RMS). Foram ainda testados MLME com componentes de vegetação fotossinteticamente ativa, vegetação não-fotossinteticamente ativa e solo, conforme outras aplicações de MLME em paisagens semi-áridas (Okin et al., 2001; Asner e Heidebrecht, 2002), que não permitiram uma boa separação entre os dois primeiros componentes e o terceiro não sendo suficientemente realçado.

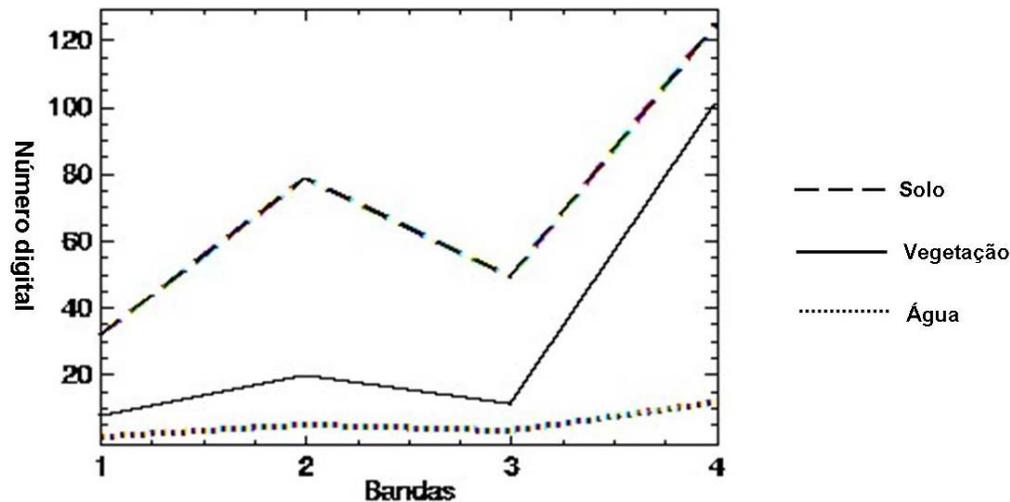


FIGURA 3.10 - Gráfico com os *endmembers* utilizados no MLME com CBERS 2 – CCD (4 bandas) representando as frações solo, vegetação fotossinteticamente ativa e água/sombra.

3.3.2.2 Análise de Componentes Principais

A ACP é uma transformação linear que opera no espaço de atributos da imagem com a rotação dos eixos cartesianos em relação ao eixo principal de máxima variância ou espalhamento. Ela opera a partir da matriz de variância-covariância das bandas da imagem original da qual se extraem os autovalores (que expressam a proporção de informação original que cada componente principal contém) e os autovetores (que fornecem o sentido espectral de tais componentes) (Jensen, 1986; Salinero, 2002; Maldonado, 2004). Estas informações estatísticas estão inseridas na matriz de correlação (Tabela 3.4), matriz de covariância (Tabela 3.5), matriz de autovetores (Tabela 3.6) e os autovalores de cada componente (Tabela 3.7).

TABELA 3.4 - Matriz de correlação das bandas CBERS 2 – CCD.

	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Banda 2	1.000	0.983	0.862
Banda 3	0.983	1.000	0.846
Banda 4	0.862	0.846	1.000

TABELA 3.5 - Matriz de covariância das bandas CBERS 2 – CCD.

	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Banda 2	137.05	85.25	151.38
Banda 3	85.25	54.83	93.94
Banda 4	151.38	93.94	225.04

TABELA 3.6 - Matriz de autovetores das bandas CBERS 2 – CCD.

	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Banda 2	0.57	0.61	-0.55
Banda 3	0.36	0.41	0.84
Banda 4	0.74	-0.67	0.02

TABELA 3.7 - Autovalores e porcentagem da informação das bandas originais das componentes principais.

	Autovalor	%
CP1	386.80	92.78
CP2	28.83	6.92
CP3	1.28	0.31

A ACP foi usada para o realce de áreas homogêneas que formam mosaicos paisagísticos com associação de variáveis paisagísticas físicas e bióticas. Esta técnica apresenta uma alta capacidade de síntese, concentrando nas componentes principais a parte mais relevante da informação original proveniente das 4 bandas CBERS 2 – CCD. Com isto, ela permite identificar as feições recorrentes na maior parte das bandas e aquelas outras que são específicas de grupos delas. As componentes principais foram utilizadas em especial na composição R(CP3)G(CP2)B(B3) que apresentou a melhor visualização de tais mosaicos homogêneos da paisagem, a partir de elementos como cor e textura (Salinero, 2002; Maldonado, 2004).

3.3.3 Modelo Digital de Elevação e Mapeamento Geomorfológico

A geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) é fundamental para a obtenção de dados referentes à geomorfologia como o mapeamento geomorfológico e produtos derivados como declividade, orientação de vertentes, geração de isolinhas e outros. A geração de tais

produtos é necessária no estudo de variáveis geomorfológicas e também na integração com outros dados ambientais, o que é parte necessária para os estudos integrados da paisagem.

Tal modelagem (Figura 3.12) baseou-se nos dados topográficos do SRTM que sofreram os processos de correção de valores negativos e transformação da resolução original de 90 metros para resoluções mais finas através de métodos de interpolação. Na fase de mapeamento preliminar ao trabalho de campo, utilizou-se a interpolação por convolução cúbica na transformação dos dados originais do SRTM para a resolução de 30 metros. Este tipo de interpolação é usada para o melhoramento dos MDE, em especial na correção de distorções inerentes ao MDE original (Burrough e McDonnell, 1998). A partir de tais dados transformados foram produzidos outros mapeamentos como da declividade e orientação de vertentes, além de extraídas as curvas de nível ou isolinhas com intervalos de 10 e 20 metros.

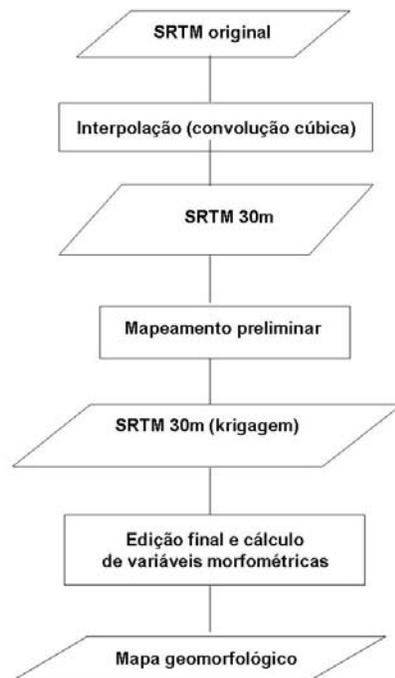


FIGURA 3.11 - Fluxo metodológico da modelagem digital de elevação e mapeamento geomorfológico.

Já na edição final dos mapeamentos geomorfológico e geossistêmico, utilizaram-se os dados topográficos da coleção SRTM refinados com tratamento geoestatístico como pode ser visto na Figura 3.13, além de produtos derivados do MDE transformado. Tal tratamento envolve a análise de tendência para criação de resíduos; análise geoestatística sobre arquivos de ruídos com comparação de pares, geração de semivariograma e ajuste de modelos teóricos; e interpolação por krigagem com os coeficientes dos modelos ajustados dos semivariogramas. Ainda, foram derivados do MDE outros produtos, através de operações e algoritmos implementados em SIG, como: hipsometria; declividade (Valeriano, 2002); comprimento de rampa (Valeriano e Garcia, 2000); curvaturas horizontal (Valeriano e Carvalho Júnior, 2003) e vertical (Valeriano, 2003); visualização ADD (Valeriano, 2004); e curvas de nível extraídas em intervalos de 10 e 20 metros.

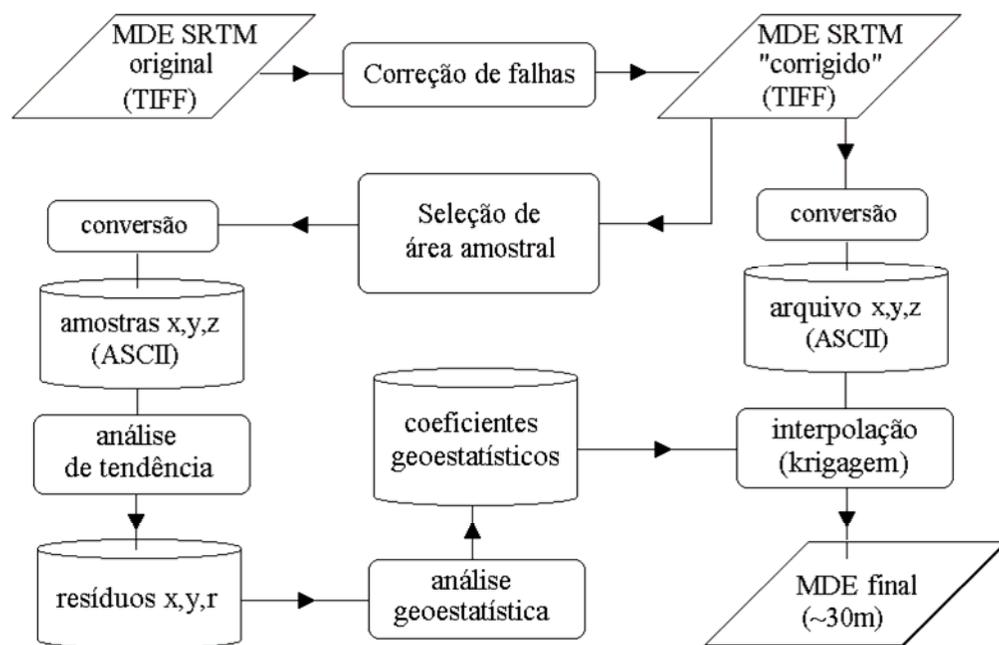


FIGURA 3.12 - Fluxo do tratamento de dados SRTM para geração de MDE.

FONTE: Valeriano (2004)

O mapeamento geomorfológico seguiu a cartografia existente para aproximadamente metade da área (Embrapa/Orstom, 1986), com base nos dados do SRTM transformados e produtos derivados. Tal mapeamento seguiu metodologias de mapeamento geomorfológico bastante disseminadas como a de Tricart e KiewietdeJonge (1992), IBGE (1995) e Ross

(2000). Estas metodologias se preocupam com os aspectos morfoestruturais e morfogênicos, possibilitando uma análise que estabelece as principais formas de relevo e os processos que determinam a dinâmica geomorfológica.

Foram delimitados os diferentes modelados morfológicos (de denudação plana e tabular) e os segmentos de vertente (topos convexizados, vertentes côncavo-convexas, patamares aplainados e patamares em rampa), e também a rede de drenagem. Estas unidades foram ainda relacionadas com aspectos morfométricos como declividade, amplitude altimétrica, amplitude interfluvial e densidade de drenagem (Ross, 2000; Crepani et al., 2001).

Os modelados e segmentos de vertentes foram mapeados através de edição topológica em SIG, a partir da interpretação visual do MDE e produtos derivados como a declividade, curvas de nível com intervalos de 10 e 20 metros e outros. A rede de drenagem foi delimitada com o auxílio das crênulas formadas nas curvas de nível e interpretação visual do MDE e dos produtos relacionados.

As variáveis morfométricas foram calculadas com o uso de ferramentas de SIG como consulta e operações métricas. A declividade foi derivada do MDE através de algoritmos implementados automaticamente em SIG (Valeriano, 2002). A amplitude altimétrica foi calculada através da diferença entre as maiores e menores altitudes, adquiridas por operações de consulta, nos diferentes modelados e segmentos de vertente. A amplitude interfluvial foi inferida a partir da média das distâncias entre canais de drenagem nos diversos modelados; com a realização de operações métricas no cálculo da maior, da menor e de uma distância intermediária (Palmeira, 2004). Ainda, calculou-se a densidade de drenagem em cada modelado através da razão entre o comprimento total dos canais de drenagem (calculada em SIG por operações métricas) e a área dos modelados (consultada em SIG) (Ross, 2000).

As principais variáveis morfométricas que foram geradas a partir do MDE para a utilização nos mapeamentos deste estudo foram: a declividade, a orientação e a curvatura do relevo. A

variável declividade, que representa o gradiente das encostas expresso em graus ou porcentagem, foi utilizada principalmente na aplicação do índice de vulnerabilidade à perda de solo, por ser fator importante em modelos de processos erosivos (Guerra, 2003). A orientação das vertentes representa em graus a direção das formas de relevo e possibilita a visualização das direções dos fluxos de drenagem superficiais e sub-superficiais, em especial do débito fluvial e do escoamento superficial. Já a variável de curvatura horizontal e vertical (medidas em graus) permite a classificação das formas das encostas em côncavas, convexas e retilíneas, tanto em planta como em perfil chegando a nove combinações, formas que revelam características essenciais dos processos geomorfológicos atuantes (Guerra, 2003; Valeriano, 2004).

3.3.4 Classificação da Dinâmica da Cobertura Vegetal

O mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal e uso do solo foi feito através de um processo semi-automático e individualizado para cada classe de interesse. Este processo foi realizado com o uso de imagens CBERS 2-CCD e do mapeamento da cobertura vegetal da área de 1983 (Carvalho, 1986). Esta fase foi dividida em duas etapas: mapeamento da cobertura vegetal e uso da terra e, por fim da sua dinâmica entre 1983 e 2004.

3.3.4.1 Mapeamento da Cobertura Vegetal e Uso da Terra

Este mapeamento seguiu os princípios adotados por Carvalho (1986), Carvalho e Pinheiro Junior (2004) e Carvalho e Freitas (2005b), com a busca da definição das principais fácies de cobertura vegetal naturais e antrópicas. Para tal, utilizou-se de um tratamento fitofisionômico, complementado por caracterização em campo através de uma abordagem florístico-fisionômica-dinâmica com ênfase na estrutura da cobertura vegetal.

Este mapeamento foi realizado com base na interpretação visual da imagem, sendo elaborada uma chave de interpretação com base nos elementos identificados por Florenzano (2002). Os elementos de interpretação serviram para a seleção de classes de uso e aquisição de amostras para as operações de classificação supervisionada que foram posteriormente

editadas. A metodologia de classificação semi-automática é importante para a obtenção de resultados mais precisos, principalmente por não ser baseada somente nas características radiométricas de reflectância dos alvos (como nas metodologias de classificação automatizadas), incorporando outros elementos de interpretação fundamentais no reconhecimento das classes de cobertura vegetal (King, 2002).

A etapa de classificação da cobertura vegetal foi baseada na imagem CBERS 2 – CCD através da composição padrão R(B4)G(B3)B(B2) e produtos derivados como imagens-fração de modelo de mistura espectral e composições coloridas com uso de componentes principais. A classificação da cobertura vegetal foi realizada com diferentes procedimentos conforme as classes de interesse, usando técnicas de segmentação, classificação não-supervisionada, além de edição topológica e matricial, como esquematizado na Figura 3.11.

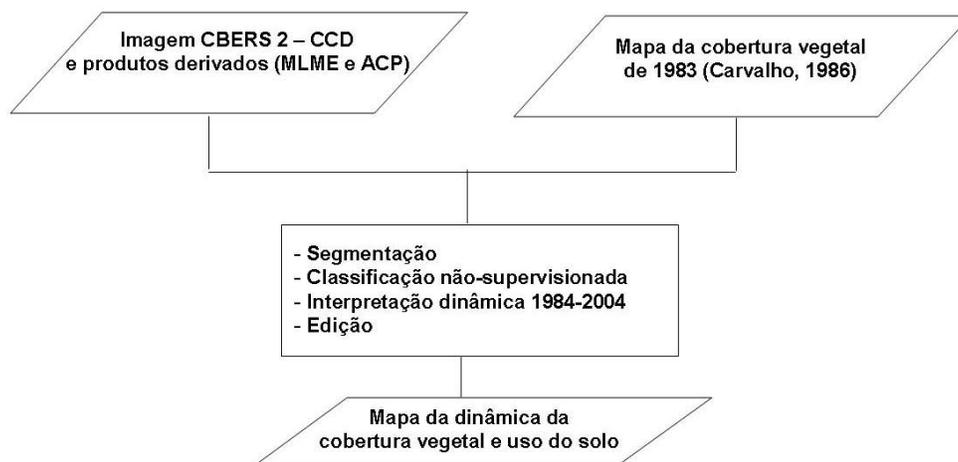


FIGURA 3.13 - Fluxograma da classificação semi-automática da dinâmica da cobertura vegetal.

A técnica de segmentação escolhida foi a de crescimento de regiões que possibilita a incorporação do contexto espectro-espacial da imagem com tendência de definição de objetos espectralmente similares e contíguos (Mather, 1999; Salinero, 2002). Já o classificador usado foi o ISOSEG, que incorpora o contexto espacial (segmentação), com o uso do limiar de aceitação de 99% para todas classes em que foi utilizado.

As fâcies de cobertura vegetal foram identificadas através de uma chave de interpretação com as variáveis forma, textura, tonalidade, tamanho, localização, além de bandas e composições coloridas que permitiram melhor visualização das classes (Tabela 3.8). As fâcies de cobertura vegetal classificadas foram: complexo galeria, solo exposto, cultura, caatinga aclareirada, caatinga arbórea-arbustiva e caatinga arbórea.

TABELA 3.8 - Chave de interpretação das classes de cobertura vegetal (CBERS 2 – CCD).

Classe	Forma	Textura	Tonalidade	Tamanho	Localização	Composição RGB
Complexo Galeria	Linear	Lisa a rugosa	Vermelho	Pequeno	Cursos d'água	432 e fração vegetação
Solo exposto	Regular a circular	Lisa	Branca	Pequeno	Áreas degradadas	432 e fração solo
Cultura	Poligonal a geométrico	Lisa	Branca a verde ou azul claros	Pequeno a médio	Baixas vertentes e fundos de vales, estradas	432 e fração solo
Caatinga Aclareirada	Irregular ou complexa	Rugosa com clareiras lisas	Verde claro com clareiras claras	Médio a grande	Baixas vertentes e fundos de vales, estradas	432, fração solo e CP3CP2B3
Caatinga arbórea-arbustiva	Irregular ou complexa	Rugosa	Verde escuro	Médio a grande	Baixas e médias vertentes	432 e CP3CP2B3
Caatinga arbórea	Irregular ou complexa	Rugosa	Verde escuro	Grande	Médias e altas vertentes	432 e PC3PC2B3

A fâcies de complexo galeria foi identificada com o uso de composição padrão (tonalidade vermelha) e da imagem-fração vegetação oriunda do modelo de mistura espectral (realçada com tons claros). Outros elementos de interpretação usados foram a localização (acompanha a rede de drenagem), forma de faixa estreita, textura variável de lisa a rugosa e tamanho pequeno. O procedimento utilizado para classificação desta fâcies envolveu a segmentação da imagem fração vegetação com parâmetros 6 de similaridade e 10 de área,

devido à alta similaridade espectral e pequena área de tal cobertura. A delimitação da classe ocorreu por operação de mosaico da segmentação para um plano de informação temático e apontamento dos polígonos considerados corretos através de ferramenta de edição topológica.

A classe de solo exposto apresentou melhor visualização na composição padrão (tonalidade branca) e foi refinada na imagem-fração solo do modelo de mistura espectral, onde apresenta a mesma tonalidade. Outras características identificadas foram a forma de regular a circular, textura lisa, tamanho pequeno e localização próxima de áreas degradadas. A delimitação das áreas de solo exposto foi realizada através de edição topológica diretamente na tela do computador.

As fácies antrópicas de cultura (áreas de plantação e pastagem) foram identificadas na composição padrão (tonalidades do branco ao verde ou azul claros) e na fração solo do modelo de mistura espectral (tons claros). Também identificadas através da forma poligonal ou geométrica, textura lisa e localização preferencial nas baixas vertentes, fundos de vales e próximo a estradas. A classificação das fácies antrópicas foi realizada através da segmentação da imagem fração solo com parâmetros 12 de similaridade e 25 de área, em razão da similaridade e tamanho de pequenos a médios. Após, tais bandas e imagem fração, em conjunto com a segmentação, foram usadas no processo de classificação automática com algoritmo ISOSEG que posteriormente passou por edição matricial.

A fácies de caatinga aclareirada foi identificada na composição padrão (tonalidade verde clara com clareiras mais claras), na imagem-fração solo (áreas heterogêneas com partes escuras e claras) e na composição R(CP3)G(CP2)B(B3) (áreas mais heterogêneas de tonalidade mais clara). Outros elementos identificados foram a forma irregular ou complexa, textura rugosa com clareiras lisas, tamanho de médio a grande e localização nas baixas vertentes, fundos de vales e próxima a estradas. A metodologia de classificação usada foi a segmentação da imagem fração solo com fatores 15 de similaridade e 60 de área, devido à baixa similaridade espectral e necessidade de junção espacial de áreas

vegetadas e manchas de solo exposto. Posteriormente, realizou-se classificação não-supervisionada (algoritmo ISOSEG) e edição matricial do resultado.

A fâcies de caatinga arbórea-arbustiva foi visualizada na composição padrão (tonalidade verde escura) e na composição R(CP3)G(CP2)B(B3) (tons verdes escuros homogêneos). Os elementos adicionais de interpretação identificados foram a forma irregular ou complexa, textura rugosa, tamanho médio a grande e localização nas baixas e médias vertentes. Os limites de tais áreas foram traçados diretamente na tela do computador por edição topológica.

A fâcies de caatinga arbórea foi reconhecida na composição padrão (tonalidade verde escura) e na composição R(CP3)G(CP2)B(B3) (tons verdes escuros homogêneos). Outros elementos de interpretação identificados foram a forma irregular ou complexa, textura rugosa, tamanho grande e localização nas médias e altas vertentes. Os limites desta classe foram delimitados diretamente na tela do computador por edição topológica. A semelhança de interpretação entre tal fâcies e a caatinga arbórea-arbustiva dificultou a separação entre as mesmas. Realizou-se esta separação de classes com maior precisão através da consulta ao mapeamento da cobertura vegetal de 1983 (Carvalho, 1986) e na interpretação da dinâmica entre 1983 e 2004.

3.3.4.2 Mapeamento da Dinâmica da Cobertura Vegetal e Uso da Terra

O reconhecimento da dinâmica da cobertura vegetal se realizou entre os anos de 1983 e 2004, sendo feita a partir da sobreposição do mapa de cobertura vegetal de 1983 com a identificação das fâcies de 2004. Em relação à metodologia utilizada neste reconhecimento da dinâmica da cobertura vegetal preferiu-se o uso de técnicas manuais de delimitação de classes às técnicas automáticas de detecção de mudanças, como diferença de bandas, ACP e rotação controlada por eixo de não-mudança. Nesta mesma área de estudo, tais técnicas automáticas foram testadas por Maldonado (1999, 2005), mostrando bons resultados. Neste trabalho, porém, verificou-se que tais técnicas automáticas seriam prejudicadas pelas

diferenças entre as imagens disponíveis nas duas datas de estudo referentes às diferenças de resolução espectral e espacial entre os sensores Landsat 5 – TM e CBERS 2 – CCD e também em aspectos como cobertura de nuvens e data de aquisição das imagens.

Assim, fez-se a classificação da dinâmica da cobertura vegetal pela análise visual das mudanças entre os mapeamentos nas duas datas, com a delimitação através de edição topológica de fâcies conservadas (sem mudança na cobertura vegetal das fâcies de caatinga arbórea e arbórea-arbustiva), em estágio de recuperação (áreas com incremento da cobertura vegetal), fâcies degradadas (áreas com rarefação da cobertura ou em que não houve mudança na cobertura de caatinga aclareirada neste intervalo de tempo). A chave de interpretação da dinâmica da cobertura vegetal pode ser vista na Tabela 3.9.

TABELA 3.9 - Chave de interpretação da dinâmica da cobertura vegetal entre 1983 e 2004.

Fâcies 1983	Fâcies 2004	Fâcies dinâmica 2004
Floresta galeria	Floresta galeria	Floresta galeria conservada
Outras	Complexo galeria	Complexo galeria
Caatinga aclareirada	Caatinga arbórea-arbustiva ou arbórea	Caatinga aclareirada recuperação
Caatinga arbórea-arbustiva, arbórea ou aclareirada	Caatinga aclareirada	Caatinga aclareirada degradação
Fâcies antrópicas	Caatinga arbórea-arbustiva	Caatinga arbórea-arbustiva recuperação
Caatinga arbórea	Caatinga arbórea	Caatinga arbórea conservada
Caatinga aclareirada	Caatinga arbórea	Caatinga arbórea recuperação
Qualquer	Cultura	Cultura
Qualquer	Solo exposto	Solo exposto

3.3.5 Análise e Mapeamento Integrado da Paisagem

Esta fase da pesquisa correspondeu aos mapeamentos de cunho sintético e à análise integrada em relação às variáveis paisagísticas abordadas. Esta fase foi subdividida em três etapas: a delimitação dos geossistemas, o mapeamento das geofâcies e a geração do índice de vulnerabilidade à perda de solo, como esquematizado na Figura 3.14.

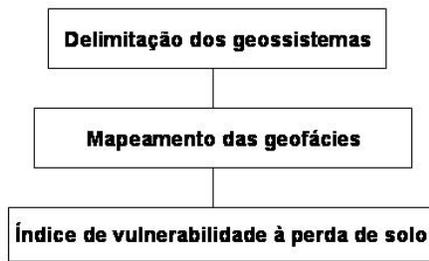


FIGURA 3.14- Esquema metodológico da análise e mapeamento integrado da paisagem.

3.3.5.1 Delimitação dos Geossistemas

O mapeamento dos geossistemas seguiu os princípios de Bertrand (1972, 2002), metodologia também adotada em outros estudos integrados da paisagem no domínio semi-árido brasileiro (Monteiro, 1988; Oliveira et al., 2003; Carvalho e Freitas, 2005a) e que se caracteriza pela complexidade e integração no tratamento das variáveis ambientais. As variáveis que passaram por processo de integração foram: geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal e uso do solo, além da variável climática. Estes aspectos foram considerados convenientes para uma abordagem geossistêmica calcada na análise e síntese de fatores físicos, ecológicos e antrópicos. Tal abordagem busca a definição dos geossistemas em relação aos aspectos taxonômicos, dinâmicos e tipológicos da paisagem.

O primeiro aspecto, referente à taxonomia da paisagem, foi contemplado com a realização de uma chave de classificação hierárquica ou taxonômica conforme os princípios de Bertrand (1972, 2002). Tal chave abrange a hierarquia paisagística a partir da definição de zona, domínio e região (as três primeiras ordens de grandeza), sendo mais detalhada em relação aos geossistemas e geofácies incluídas em seu interior; a definição dos geótopos não foi perseguida devido às limitações deste trabalho e ao conseqüente nível de detalhamento escalar necessário.

Em relação à dinâmica das unidades de paisagem, esta foi abordada com base nos três conjuntos do sistema geral de evolução das paisagens: o sistema geomorfo genético (a dinâmica erosiva), a dinâmica biológica (mecanismos de adaptação e sucessão vegetal) e o

sistema de exploração antrópico (relacionado às modificações da paisagem impostas pelo uso do solo). Com as unidades de paisagem sendo preliminarmente definidas em relação ao fator dominante em sua dinâmica global (Bertrand e Bertrand, 2002).

O aspecto tipológico trata do modo principal de classificação e denominação dos geossistemas e geofácies, onde foi realizada uma tipologia dinâmica preocupada com três elementos principais: o sistema de evolução, o estágio de evolução da cobertura vegetal e da paisagem e o sentido geral da dinâmica (recuperação, degradação ou conservação). Esta tipologia se relaciona com a teoria da bio-resistasia de Erhart (1962, 1966), com os geossistemas sendo divididos em dois conjuntos principais (geossistemas em biostasia e em resistasia), com subdivisões nas geofácies relacionadas aos estágios e dinâmica de evolução e ao papel da atividade antrópica na dinâmica do geossistema (Bertrand e Bertrand, 2002).

A delimitação dos geossistemas envolveu a integração semi-automática dos dados cartográficos das diferentes variáveis ambientais utilizadas na pesquisa (geologia, geomorfologia, pedologia) como pode ser visto na Figura 3.15. Esta etapa de mapeamento dos geossistemas necessita de uma edição manual da compartimentação geossistêmica, pois existe a necessidade de escolha de diferentes variáveis na delimitação de unidades de paisagem que não podem ser conseguidas apenas por ferramentas automáticas de SIG, como já havia sido observado por Zonneveld (1989).

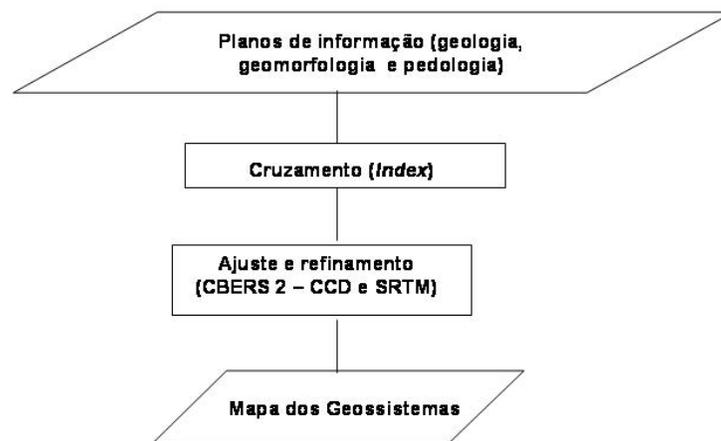


FIGURA 3.15 - Abordagem metodológica da delimitação dos geossistemas.

Inicialmente foi realizada uma integração automática por cruzamento de dados, através da ferramenta Index (ERDAS, 1999) do SIG ERDAS 8.4 que fez a adição de planos de informação dos mapeamentos preliminares de geologia, geomorfologia e pedologia. Com esta, foi possível uma integração parcial destas variáveis que foi ajustada posteriormente.

Esta primeira integração foi ajustada e refinada através da interpretação visual das composições coloridas R(B4)G(B3)B(B2) e R(CP3)G(CP2)B(B3); da imagem-fração vegetação fotossinteticamente ativa do CBERS 2 – CCD; do MDE; e outros produtos derivados do MDE, como a declividade e curvas de nível. Esta etapa de ajuste dos limites dos mapas temáticos seguiu os preceitos metodológicos do uso de produtos oriundos de geotecnologias como “âncora” na identificação e mapeamento de unidades de paisagem (Crepani et al., 2001; Palmeira, 2004). O resultado de tal integração, ajustada também com a conjugação da variável de cobertura vegetal (estrutura e fitofisionomia), foi a compartimentação espacial em nível de modelados e de geossistemas.

A caracterização e delimitação dos geossistemas seguiram os critérios qualitativos a partir das classes ou unidades de mapeamento geológicas, geomorfológicas e pedológicas em cada unidade de paisagem, o que representa critérios do meio físico. Estes aspectos qualitativos foram associados a critérios morfométricos ou quantitativos (orientação de vertentes, hipsometria, densidade de drenagem, amplitude interfluvial e declividade), divididos em classes representativas de qualidades (exemplo: baixo, médio e alto). Esta divisão foi baseada na adaptação de critérios adotados por outros autores com relação a tais variáveis morfométricas, como Ross (2000) e Crepani et al. (2001), para as situações específicas da paisagem em estudo.

3.3.5.2 Mapeamento das Geofácies

As geofácies são unidades de paisagem pertencentes aos geossistemas, mas que se subdividem como representantes da sua dinâmica, relacionando-se diretamente com a tipologia dos geossistemas anteriormente abordada. Com estes, buscou-se a delimitação de

áreas no interior dos geossistemas com estágios de sucessão vegetal e de uso antrópico semelhantes que possibilitem uma melhor compartimentação geossistêmica com base no aspecto dinâmico (Bertrand e Bertrand, 2002).

Esta etapa metodológica foi esquematizada na Figura 3.16, na qual, em primeiro lugar, os geossistemas oriundos da fase metodológica anterior foram integrados com a classificação da dinâmica da cobertura vegetal, permitindo a subdivisão dos mesmos em nível de geofácies que caracterizam a dinâmica da paisagem pelos mosaicos com diferentes estágios sucessionais da cobertura vegetal (recuperação, degradação ou conservação) e pelas fácies culturais de cunho antrópico. Esta integração foi realizada através de operação pontual lógica (booleana) de álgebra de mapas que permite o cruzamento entre os planos de informação, sendo realizada por programação em LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) apresentada no APÊNDICE A (Burrough e McDonnell, 1998; Câmara et al., 2004).

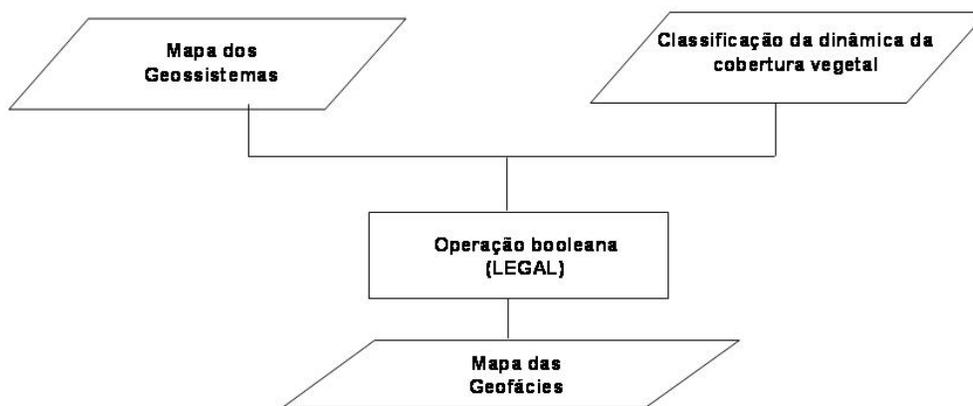


FIGURA 3.16 - Esquema metodológico do mapeamento das geofácies.

3.3.5.3 Índice de Vulnerabilidade à Perda de Solo

O índice de vulnerabilidade à perda de solo (IVPS) é parte fundamental do diagnóstico do meio físico e biótico do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) e envolve a integração de planos de informação das variáveis ambientais em ambiente de SIG. Neste trabalho, esta metodologia foi aplicada ao mapeamento e análise integrada da paisagem, no qual

possibilitou uma melhor avaliação da detecção de mudanças em ambientes semi-áridos (terceiro objetivo específico) e das variáveis indicadoras de processos de desertificação (quarto objetivo específico).

Cada variável ambiental e seus diferentes atributos foram quantificados em função da teoria ecodinâmica de Tricart (1979), conforme adaptação ao IVPS de Crepani et al. (2001). Com isto, buscou-se a definição de meios estáveis (onde prevalecem condições de pedogênese), meios intermediários de transição e meios instáveis (em que predomina a morfogênese) como pode ser visto na Tabela 3.10.

TABELA 3.10. Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas.

FONTE: Crepani et al. (2001).

Categoria morfodinâmica	Relação Pedogênese/Morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a Pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio Pedogênese/Morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a Morfogênese	3,0

A metodologia de mapeamento da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo desenvolvida por Crepani et al. (2001) foi utilizada, neste trabalho, para a verificação em semidetalhe das condições que possibilitem maior ou menor vulnerabilidade à perda de solo e, conseqüentemente, maior risco de desertificação. Este mapeamento se relaciona aos estudos de ecologia da paisagem devido à integração de diferentes variáveis físicas, ecológicas e sociais em sua realização.

Outros estudos aplicaram esta metodologia no semi-árido brasileiro, como Gomes (2005). Este autor calculou o índice de vulnerabilidade à perda de solo em área maior, mas que abrange a área de estudo desta pesquisa, numa escala mais grosseira (1:550.000). Freitas et al. (2005) conjugaram a metodologia dos geossistemas com o índice de vulnerabilidade à perda de solo em estudos integrados da paisagem na área de Serra das Almas (CE/PI).

Para avaliar a vulnerabilidade à perda de solo das unidades de paisagem ou geossistemas foram integrados os planos de informação de geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal, declividade e clima (Figura 3.15). Esta integração seguiu os preceitos metodológicos do ZEE, seguindo as etapas metodológicas de Crepani et al. (2001).

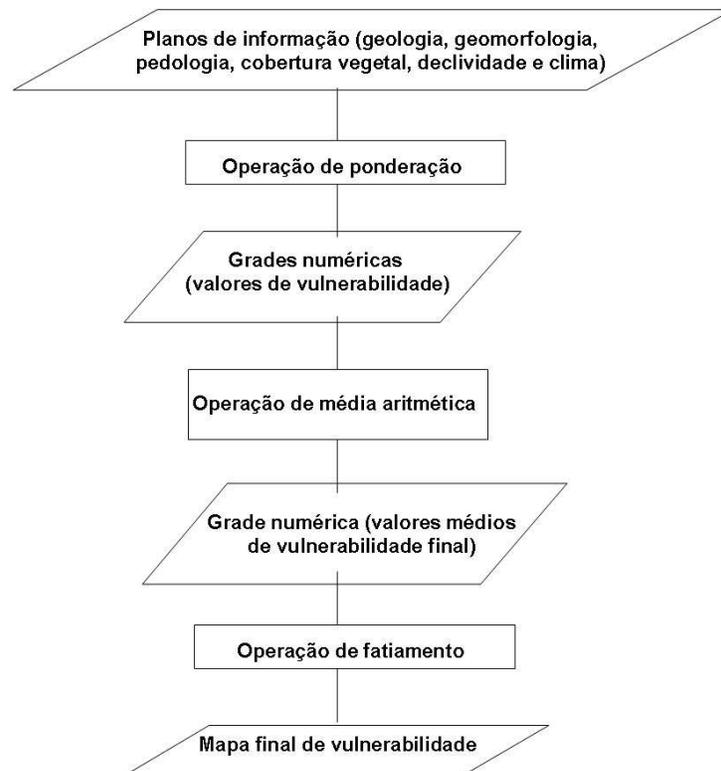


FIGURA 3.17 - Esquema metodológico da produção em SIG do índice de vulnerabilidade à perda de solo.

1. Primeiramente, estes planos de informação temáticos foram transformados em grades numéricas, com cada classe de cada tema sendo associada a valores, calculados conforme Crepani et al. (2001), que indicam o grau de vulnerabilidade conforme a escala de vulnerabilidade anteriormente citada. Esta etapa foi realizada através de programação em LEGAL (APÊNDICE A), com a operação de ponderação para geração de grade com os valores de vulnerabilidade para cada classe.

2) O valor final da vulnerabilidade à perda de solo foi calculado pela média aritmética entre os seis planos de informação integrados. Esta operação de média aritmética, a fim de produzir uma grade numérica que contenha os valores médios de vulnerabilidade final, também foi gerada via programação em LEGAL (APÊNDICE A).

3) Por fim, foi realizada a operação de fatiamento com programação em LEGAL, para geração do mapa temático final de vulnerabilidade à perda de solos.

No SPRING 4.2 foi ainda criado um mapa cadastral das unidades de vulnerabilidade atualizado, via programação em LEGAL através do operador de Maioria Zonal, com as informações das variáveis paisagísticas, classes temáticas de vulnerabilidade, entre outras (Gomes, 2005; Crepani et al., 2001; Palmeira, 2004; Freitas et al., 2005).

3.3.6 Trabalho de Campo

Esta fase do trabalho corresponde à identificação e avaliação dos produtos cartográficos realizados no campo. Ela é fundamental para qualquer estudo integrado da paisagem. Assim, realizou-se trabalho de campo com o máximo detalhamento possível no momento de sua realização e envolvendo praticamente todos os geossistemas e geofácies mapeados. Ao todo, foram realizados 64 transectos e 21 observações de cultura com apenas 3 dos pontos previstos não sendo amostrados devido à dificuldade de acesso, representados como cruces amarelas na Figura 3.17.

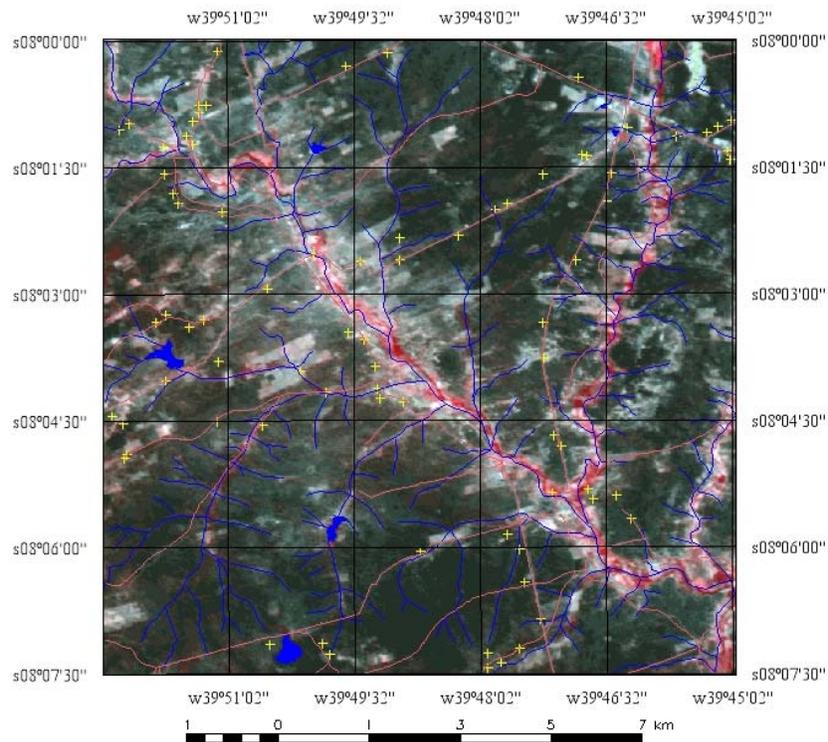


FIGURA 3.18- Pontos amostrados no trabalho de campo.

Este levantamento de campo foi baseado em técnicas de amostragem já utilizadas tanto na área de estudo como em outras áreas do semi-árido brasileiro. Ela se baseia no uso de planilhas de transectos em linha de 50 metros (Figura 3.18). Seu processamento permite a realização de diagramas com dados estruturais, fisionômicos, dinâmicos e florísticos referentes à cobertura vegetal, além de informações referentes aos indicadores de antropização, processos geomorfológicos e formação superficial (Maldonado, 2004; Carvalho e Pinheiro Júnior, 2004). Este trabalho de campo possibilita uma amostragem representativa da área, fundamental para o melhor conhecimento de suas características ambientais e para a definição e avaliação dos produtos da pesquisa como os mapeamentos da cobertura vegetal, da geomorfologia e da compartimentação geossistêmica.

LOCALIZAÇÃO		RELEVO		FOTOS		GPS		MOMENTO	
Área:		Tipo:		Nº filme:		Ponto Nº:		Data: / /	
Local:		Posição:		Nº/Rumo: /		Lat.:		Hora ini:	
Fisionomia:		Declividade :		Nº/Rumo: /		Long.:		Hora fin:	
		Orientação :		Nº/Rumo: /		Altitude:			
Distância sobre a trema (m)		0 1 3 4 5 6 9 10 13 15 17 18 19 20 23 24 25							
Arbóreo h \bar{x} = volume: Ba Me Alt		8 4							
Arbustivo h \bar{x} = volume: Ba Me Alt		2 1							
Herbáceo h \bar{x} = volume: Ba Me Alt		1 0.5							
Trepadeira									
Bromélia									
Cobertura do solo									
Superfície do solo									
Cobertura do solo 1) Lenha grossa 2) Lenha fina 3) Árvore morta 4) Folhagem 5) Serrapiheira 6) Ausente	Superfície do solo 1) argila 2) silte 3) arenoso fino 4) arenoso grosso 5) cascalho 6) seixos e matações 7) rochas e blocos	Morfogênese atual 1) Nula 2) Fraca / Laminar 3) Pedestal / Média 4) Sulcos / Alta 5) Vossorocas 6) Soterrados	Destruição parcial da vegetação 1) Fogo 2) Machado 3) Coleta 4) Rara ou nula 5) Pastoreio	Indicadores pastejo 1) Presença de veredas 2) Esterco de gado 3) Esterco de cabra 4) Vegetação pastejada 5) Ausência aparente	Vizinhanças (m / Km) 1) Açudes: 2) curral: 3) rancho: 4) caminhos: 5) cercas: 6) > 4 km				
1-	7-	13-	19-						
2-	8-	14-	20-						
3-	9-	15-	21-						
4-	10-	16-	22-						
5-	11-	17-	23-						
6-	12-	18-	24-						

FIGURA 3.19 - Planilha de trabalho de campo.
FONTE: Maldonado (2004).

A técnica de transecto em linha adotada levantou parâmetros como a descrição da distribuição horizontal e vertical das plantas e com a identificação das espécies por nome popular pelo ajudante de campo local (mateiro). Não foi feita uma descrição completa de reconhecimento botânico, o que, somente é necessário para estabelecer relações ecológicas entre as comunidades vegetais e para seu mapeamento (Braun-Blanquet, 1979; Zonneveld, 1988; Maldonado, 2004). A descrição fitofisionômica da distribuição vertical das espécies se deu conforme os parâmetros estruturais: arbóreo alto (>8m), arbóreo médio (4-8m); arbóreo baixo (<4m); arbustivo alto (>4m); arbustivo médio (2-4); arbustivo baixo (<2m); herbáceo alto (>1m); herbáceo médio (0,5 a 1m); e herbáceo baixo (<0,5m). A determinação do porte e dos nomes vulgares e científicos das plantas (APÊNDICE B) foi

estabelecida com base nos trabalhos de Carvalho (1986) e Maldonado (1999, 2004) para manter a compatibilidade com os trabalhos anteriores feitos na área e cobrir os conhecimentos florísticos mínimos.

Além das informações estruturais e florísticas, foram ainda observados ao longo do transecto fatores como a cobertura do solo com a descrição da presença de lenha grossa, lenha fina, lenha em pé, folhagem, serrapilheira ou ainda solo exposto. A superfície do solo é observada por reconhecimento visual e tactual conforme padrões de granulometria, onde os sedimentos são classificados em: matacão (diâmetro médio maior que 256 mm), blocos (64 a 256 mm), seixos (4 a 64 mm), cascalho (2 a 4 mm), areia grossa (0,5 a 2 mm), areia fina (0,05 a 0,5 mm), silte (0,002 a 0,05) e argila (menor que 0,002 mm) (Lepsch, 2002).

Além das planilhas de transectos, foram geradas fichas de campo (Figura 3.19) em separado para fácies antrópicas de cultura e para informações expeditas geomorfológicas, geológicas e de formação superficial. Com esta abordagem, procurou-se a observação de características geológicas (tipo de litologia, processos de intemperismo atuantes e intensidade de intemperismo), da formação superficial (granulometria e cor do solo) e geomorfológicas (processos erosivos, identificação e caracterização dos modelados).

<p>LOCALIZAÇÃO: _____</p> <p>GEOSSISTEMA: _____</p> <p>TRANSECTO: _____</p> <p>DECLIVIDADE: _____</p> <p>ORIENTAÇÃO VERTENTE: _____</p> <p>FOTOS: _____</p> <p>GPS (PONTO): _____ LAT: _____</p> <p>LONG: _____</p> <p>DIA: _____ HORA: _____</p>	<p>MODELADO DE DISSECAÇÃO</p> <p>NOME</p> <p>1 - Homogêneo</p> <p>2 - Diferencial</p> <p>3 - Estrutural</p> <p>4 - Em ravinas</p> <p>SEGMENTO DA VERTENTE</p> <p>1 - Topos aplainados (Ta)</p> <p>2 - Vertentes côncavo - convexas (Vc)</p> <p>FORMAS PRINCIPAIS</p> <p>1 - Tabulares</p> <p>2 - Convexas</p> <p>3 - Aguçadas</p> <p>FORMAS DE DETALHES</p> <p>1 - Lombadas</p> <p>2 - Tabuleiros</p> <p>DENSIDADE DAS INCISÕES</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Muito grosseira</p> <p>3 - Grosseira</p> <p>4 - Média</p> <p>5 - Fina</p>	<p>PROCESSOS GEOMORFOLÓGICOS</p> <p>MOVIMENTOS DE MASSA LENTOS</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Rastejamento</p> <p>3 - Solifluxão</p> <p>TRANSPORTES COM PARTICIPAÇÃO DA ÁGUA</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Escoamento de cheia (concentrado)</p> <p>3 - Escoamento difuso</p> <p>4 - Escoamento em lençol</p> <p>FORMAS RESULTANTES</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Canaletas</p> <p>3 - Ravinas</p> <p>4 - Sulcos</p> <p>5 - Voçorocas</p> <p>EXTENSÃO</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Generalizado</p> <p>3 - Localizado</p> <p>AÇÕES ANTRÓPICAS</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Cultura</p> <p>3 - Desmatamento</p> <p>4 - Pastagem</p> <p>5 - Queimada</p>	
<p>ROCHA MATRIZ</p> <p>CLASSE</p> <p>1 - Não identificada</p> <p>2 - Híbrida</p> <p>3 - Ígnea</p> <p>4 - Metamórfica</p> <p>5 - Sedimentar</p> <p>INTEMPERISMO</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Mínimo: rocha sã</p> <p>3 - Parcial</p> <p>4 - Total</p> <p>PROCESSOS ATUANTES</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Mecânicos ou físicos</p> <p>3 - Químicos</p> <p>CLASSE</p> <p>1 - Não identificada</p> <p>2 - Híbrida</p> <p>3 - Ígnea</p> <p>4 - Metamórfica</p> <p>5 - Sedimentar</p> <p>INTENSIDADE DOS PROCESSOS</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Fraca</p> <p>3 - Intensa</p> <p>4 - Muito intensa</p>	<p>MODELADO DE ACUMULAÇÃO</p> <p>GÊNESE</p> <p>1 - Não registrada</p> <p>2 - Inundação</p> <p>3 - Eólica</p> <p>4 - Fluvial</p> <p>5 - Torrencial, Fluvial ou de enxurrada</p> <p>FORMAS PRINCIPAIS</p> <p>1 - Não observadas</p> <p>2 - Campo de dunas</p> <p>3 - Leques aluviais</p> <p>4 - Planície de inundação</p> <p>5 - Rampas de colúvio</p> <p>FORMAS FLUVIAIS DE DETALHE</p> <p>1 - Não observada</p> <p>2 - Bacias de decantação</p> <p>3 - Bancos arenosos</p> <p>4 - Cones aluviais</p> <p>5 - Diques ou cordões arenosos</p>	<p>MODELADO DE APLANAMENTO</p> <p>CARACTERÍSTICAS GERAIS</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Ondulados</p> <p>3 - Dissecados</p> <p>SEGMENTO DA VERTENTE</p> <p>1 - Patamares aplainados (Pa)</p> <p>2 - Patamares em rampa (Pr)</p> <p>PARTICULARIDADES - I</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Desnudados</p> <p>3 - Inhumados</p> <p>PARTICULARIDADES - II</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Com cristas</p> <p>3 - Com depressões fechadas ou rasas</p> <p>DEPÓSITOS DE COBERTURA</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Detriticos finos</p> <p>3 - Detriticos grosseiros</p>	<p>FORMAÇÃO SUPERFICIAL</p> <p>1 - Não identificada</p> <p>2 - Argila</p> <p>3 - Silte</p> <p>4 - Arenoso fino</p> <p>5 - Arenoso grosseiro</p> <p>6 - Cascalho</p> <p>7 - Seixos</p> <p>8 - Rochas e blocos</p> <p>COR DO DOLO</p> <p>1 - Não observado</p> <p>2 - Vermelho</p> <p>3 - Amarelo</p> <p>4 - Castanho (bruno)</p> <p>5 - Cinza</p> <p>6 - Mosqueado</p>

FIGURA 3.20 - Planilha de campo para observação de características geomorfológicas, geológicas e de formação superficial.

As fácies antrópicas agrícolas foram amostradas através de outra ficha observacional (Figura 3.20) onde são descritos o tipo de ocupação, cultura ou planta dominante, grau de abandono, existência de cercas e habitações, existência de água, umidade aparente, tratos culturais, possibilidade de inundações, identificação de processos erosivos e formação superficial. Tais informações permitem a caracterização das atividades agrícolas e do seu impacto ao meio físico e biótico nos diferentes geossistemas da área.

LOCALIZAÇÃO		RELEVO		FOTOS		GPS		MOMENTO	
Área:		Tipo:		Nº filme:		Ponto Nº:		Data: / /	
Local:		Posição:		Nº/Rumo: /		Lat.:		Hora ini:	
Fisionomia:		Declividade :		Nº/Rumo: /		Long.:		Hora fin:	
AGRICOLA		Orientação :		Nº/Rumo: /		Altitude:			

1- Tipo de Ocupação 1 - Cultivo permanente 2 - Cultivo temporario 3 - Pastagem 4 - Abandono	1- Existência habitação 1 - < 0,5 km 2 - 0,5 - 1 km 3 - 1 - 2 km 4 - > 4km	1- Umidade aparente 1 - Muito seca 2 - Seca 3 - Medio 4 - Úmida 5 - Muito úmida	1 - Superfície 1 - argila 2 - silte 3 - arenoso fino 4 - arenoso grosso 5 - cascalho 6 - seixos 7 - rochas e blocos
2- Grau de Abandono 1- Em Cultivo 2- Em abandono 2 a 5 anos 3- Em abandono 5 a 10 anos 4- Em abandono > 10 anos 5- Rara ou Nula 6- Indeterminada	2- Existência de cercas 1 - < 0,5 km 2 - 0,5 - 1 km 3 - 1 - 2 km 4 - > 4km	2- Submersão 1- Nunca inundada 2- Inundavel acidentalmente 3- Submersa period. (- 6 meses) 4- Submersa period. (+ 6 meses) 5- Sempre c/água pouco profunda 6- Sempre c/água profunda	2 - Cor do solo 1 - Amarelo 2 - Vermelho 3 - Cinza 4 - Castanho claro 5 - Castanho escuro 6 - Mosqueado 7 -
3- Cultura/Planta dominante _____ _____ _____ _____ _____	3- Existência de agua 1 - < 0,5 km 2 - 0,5 - 1 km 3 - 1 - 2 km 4 - > 4km	3- Tratos Culturais 1 - Irrigação por sulco 2 - Irrigação por asperção 3 - Irrigação por cova 4 - Aradura 5 - Gradagem 6 - Ausência aparente	3 - Morfogênese atual 1) Nula 2) Fraca 3) Pedestal / Laminar 4) Sulco 5) Vossoroça 6) Soterrado

FIGURA 3.21 - Planilha de campo para fácies agrícolas.
 FONTE: Maldonado (2004).

3.3.7 Análise dos Resultados

Esta fase metodológica final envolveu a análise dos resultados obtidos com ênfase nos mapeamentos sintéticos realizados e, tendo como pano de fundo a questão da desertificação. Esta fase foi subdividida em duas etapas: a análise estatística multivariada dos dados de campo em relação aos mapeamentos integrados da paisagem (geossistemas e geofácies); e a análise integrada dos resultados dos mapeamentos sintéticos (geossistemas e índice de vulnerabilidade à perda de solo) em relação à problemática da desertificação.

3.3.7.1 Análise de Agrupamentos

A análise estatística escolhida para interpretação dos dados de campo foi a análise de agrupamento (*Cluster Analysis*). Ela já foi aplicada em outros estudos de Ecologia da Paisagem no Bioma Caatinga envolvendo unidades de paisagem em relação a diferentes variáveis ambientais (Oliveira et al., 1987) e especificamente à similaridade florística (Silva et al., 2003). Os dados escolhidos para aplicação da técnica de agrupamento foram as listas de espécies amostradas em cada unidade de paisagem, no caso os diferentes geossistemas e geofácies, com interesse na interpretação das relações florísticas entre mosaicos paisagísticos, retratando interações de variáveis físicas, ecológicas e sociais.

O método de agrupamento utilizado foi o agrupamento hierárquico em árvore por forma de ligação completa. Este método é caracterizado por buscar a organização das amostras em grupos que retratariam uma “classificação natural” dos dados baseada em suas transformações por mensuração de distâncias. A medida de distância escolhida foi aquela baseada em medida de correlação (no caso o r de Pearson), utilizado através da padronização formulada por $1 - \text{Pearson } r$. O resultado de tal metodologia de agrupamento é representado na forma de um dendrograma que por ter ligação completa só pode ser interpretado em termo de relações dentro dos grupos individuais, diferentemente da ligação simples (Anderberg, 1973; Valerian, 2000; StatSoft, 2001).

3.3.7.2 Análise dos Produtos Sintéticos em Relação ao Processo de Desertificação

Esta etapa envolveu a análise dos resultados dos mapeamentos integrados da paisagem (geossistemas e geofácies) e do índice de vulnerabilidade à perda de solo em relação ao estudo dos processos de desertificação. Trata-se de uma etapa metodológica de cunho reflexivo a respeito dos resultados do trabalho, onde se buscou a interpretação do tipo de contribuição que os mapeamentos integrados, em face de uma abordagem complexa ou holística, apresentam ao estudo da desertificação. Esta reflexão apresentou como eixo fundamental a questão da dinâmica da paisagem em ambientes semi-áridos, em especial no

que se refere aos processos de degradação e recuperação ambiental que, segundo Verdum (2004) é um dos tópicos que necessita de maior aprofundamento nos estudos da desertificação.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são descritos e analisados os resultados dos procedimentos metodológicos anteriormente abordados, tendo em vista os objetivos principais da pesquisa realizada e como pano de fundo a busca de uma abordagem de cunho integrado e complexo da paisagem. Desta forma, são apresentados e discutidos os resultados: das técnicas de modelagem de sensoriamento remoto usados como base nos mapeamentos efetuados; do Modelo Digital de Elevação gerado e seu uso no mapeamento geomorfológico e integrado da paisagem; dos mapeamentos temáticos (em especial o geomorfológico e da cobertura vegetal); e da abordagem integrada da paisagem, com a definição e caracterização dos geossistemas e geofácies, além do índice de vulnerabilidade à perda de solo; e a relação dos mapeamentos integrados com a problemática da desertificação na área de estudo. Espera-se desta forma contribuir para o conhecimento a respeito da aplicação do Sensoriamento Remoto no reconhecimento, monitoramento e controle das paisagens do semi-árido brasileiro. Em particular, procurou-se atingir os objetivos específicos da pesquisa principalmente no que diz respeito aos mapeamentos temáticos (especialmente de cobertura vegetal) e integrado da paisagem.

4.1 Técnicas de Modelagem em Sensoriamento Remoto

As técnicas de modelagem em sensoriamento remoto foram fundamentais para os mapeamentos propostos neste trabalho pela possibilidade de extração de informações de caráter tanto analítico (como a interpretação de classes de cobertura vegetal) quanto sintético (identificação de mosaicos com diferentes associações entre as variáveis paisagísticas). A fase metodológica de processamento digital de imagens teve como principais resultados a modelagem linear de mistura espectral e a análise de componentes principais.

4.1.1 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

O MLME se mostrou como um processamento digital eficiente para o realce de elementos fundamentais da paisagem do sertão nordestino como, por exemplo, as fácies de cobertura vegetal e as unidades de paisagem (em especial as várzeas). As imagens-fração permitiram:

- mapear as diferentes fácies de cobertura vegetal;
- a distinção dos diferentes mosaicos (geossistemas) e dinâmicas (geofácies) da paisagem em seu mapeamento integrado; e
- o ajuste de informações temáticas, como os canais fluviais.

A obtenção de *endmembers* foi realizada nas áreas aluviais com fácies em galeria para a fração de vegetação fotossinteticamente ativa, em partes de solo exposto de fácies antrópicas para a fração solo e em açudes cheios para a fração água/sombra. Estas feições da imagem foram as que apresentaram um comportamento espectral mais próximo do normal, apesar de ainda se notar problemas de mistura em relação às frações de vegetação fotossinteticamente ativa e de água/sombra esperadas em imagens do semi-árido brasileiro da estação seca (alta influência dos solos no comportamento espectral dos alvos).

O MLME gerado com as frações vegetação fotossinteticamente ativa, solo e água/sombra (Figura 4.1) apresentou melhor resultado do que aquele realizado com as frações vegetação fotossinteticamente ativa, solo e vegetação não-fotossinteticamente ativa. Isto ocorreu provavelmente devido à grande mistura espectral característica do imageamento de paisagens semi-áridas, onde fica difícil a obtenção de *endmembers* puros. Neste caso, esta dificuldade aconteceu em relação à fração vegetação não-fotossinteticamente ativa que necessita de informação para discriminá-la referente ao infravermelho médio (banda não existente no CBERS 2 – CCD) para sua discriminação (Asner e Heidebrecht, 2002).

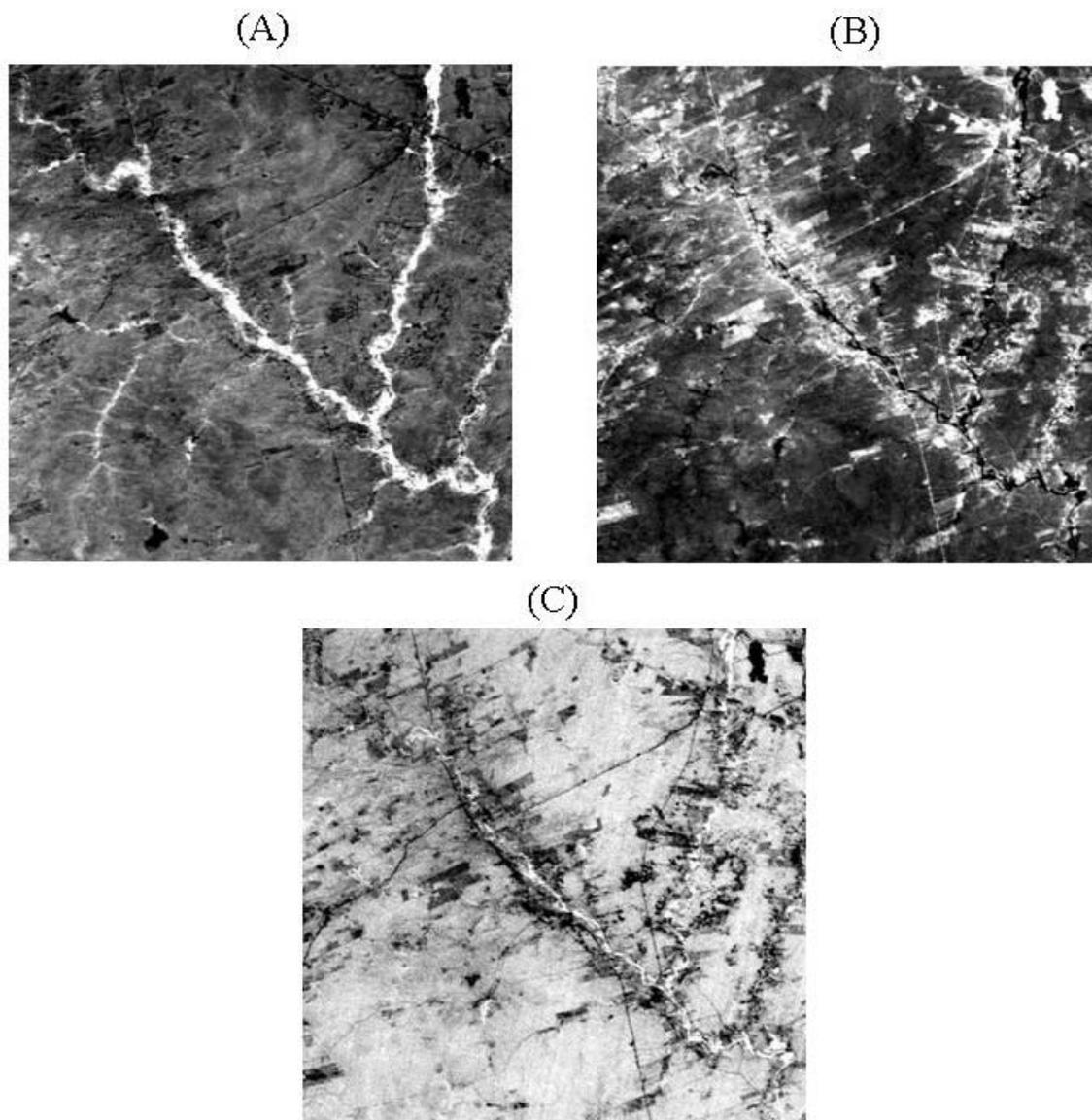


FIGURA 4.1 - Imagens-fração do MLME: (A) vegetação fotossinteticamente ativa, (B) solo, (C) água/sombra.

Das três imagens-fração derivadas, foram utilizadas a da vegetação fotossinteticamente ativa e a do solo. Foram estas que mais contribuíram na interpretação de elementos paisagísticos pelas características do comportamento espectral de paisagens semi-áridas. Ainda com relação a tal aspecto pode ser dito que:

- A imagem-fração água/sombra foi descartada pela grande confusão ocorrida na sua discriminação. Esta confusão é devida ao fator sombra, que é elemento fundamental na resposta espectral da cobertura de caatinga quando imageada na época seca pela presença de um dossel praticamente sem folhas.
- A imagem-fração de vegetação fotossinteticamente ativa permitiu a delimitação de fácies em galeria da cobertura vegetal, ajudando ainda na distinção dos ambientes aluviais da paisagem e na extração da rede de drenagem.
- A imagem-fração solo possibilitou o realce das fácies antrópicas e de caatinga aclareirada, o que foi utilizado na distinção de geofácies no mapeamento integrado da paisagem.

4.1.2 Análise de Componentes Principais (ACP)

A ACP foi usada para a identificação de áreas homogêneas na imagem de satélite através da composição R(CP3)G(CP2)B(B3), que pode ser vista na Figura 4.2. O uso das segunda e terceira componentes principais em conjunto com a banda na faixa visível do vermelho permitiu a reunião das informações principais existentes nas 4 bandas CBERS 2 – CCD através de uma composição colorida com o realce de regiões com comportamento espectral semelhante nas diferentes bandas. Em relação ao uso de tal técnica na mesma área de estudo por Maldonado (2004), a principal diferença foi em relação ao tipo de composição gerada que naquele caso foi R(CP2)G(CP3)B(B3). Esta diferença de composição pode ser explicada pelo diferente produto usado por Maldonado (2004) que foi uma imagem Landsat 7 – ETM+ que apresenta diferente resolução espectral em comparação com o CBERS 2 – CCD utilizado neste trabalho.

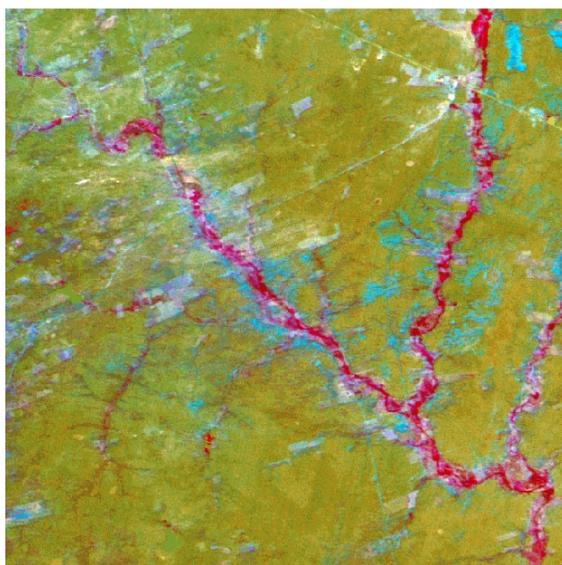


FIGURA 4.2 - Uso de ACP com a composição colorida R(CP3)G(CP2)B(B3).

Estas áreas com relativa homogeneidade em relação aos elementos de interpretação (em especial textura e cor) representam tipos de cobertura vegetal bastante uniformes em sua estrutura como as fácies de caatinga arbórea e arbórea-arbustiva. A sua principal utilidade como elemento de interpretação se deu no mapeamento da cobertura vegetal, em especial das fácies mais uniformizadas como as vistas acima.

Os mosaicos paisagísticos identificados em tal composição sintética representam diferentes conjunções ou associações de variáveis físicas e ecológicas da paisagem (litologia, solo, geomorfologia e cobertura vegetal). Neste caso, o uso mais direto de tal composição RGB foi na delimitação de unidades de paisagem através de uma utilização conjugada com os mapeamentos previamente existentes da área e pela identificação de mosaicos paisagísticos influenciados pela presença de elementos diferentes, como classes de solos.

4.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O MDE e os produtos gerados a partir de dados SRTM se mostraram fundamentais para a realização dos mapeamentos geomorfológico e integrado da paisagem, facilitando a interpretação de variáveis abióticas (relevo, hidrografia, geologia e solos) importantes para

a compreensão holística da paisagem. O MDE se mostrou como uma importante ferramenta tanto para o primeiro objetivo específico da pesquisa, envolvendo a extração de informações temáticas referentes à variável geomorfológica, quanto para a análise integrada da paisagem e o mapeamento das unidades geossistêmicas.

Neste contexto, pode ainda ser destacado que o uso mais direto do MDE e de seus produtos derivados se deu no mapeamento geomorfológico, onde foi fundamental para: a interpretação das formas de relevo, a delimitação de segmentos de vertentes e da extração da rede de drenagem. Também foram utilizados no cálculo de índices morfométricos e no levantamento de outras informações geomorfológicas. Ainda foi usado no mapeamento integrado da paisagem, possibilitando o ajuste dos mapas temáticos e o reconhecimento de unidades de paisagem sob o ponto de vista abiótico, tanto pela interpretação do MDE e produtos derivados, como pela análise das curvas de nível em diferentes equidistâncias.

O refinamento da resolução espacial dos dados SRTM de 90m para 30m, tanto pela interpolação por convolução cúbica, quanto pelo tratamento geoestatístico, possibilitou um melhor detalhamento e qualidade dos produtos derivados direta e indiretamente do MDE, fenômeno diretamente relacionado com o aumento da escala espacial. Como pode ser visto na Figura 4.3, esta melhoria da resolução espacial proporciona uma melhor interpretação dos dados topográficos e ainda uma melhor delimitação das unidades de paisagem e geomorfológicas da área de estudo.

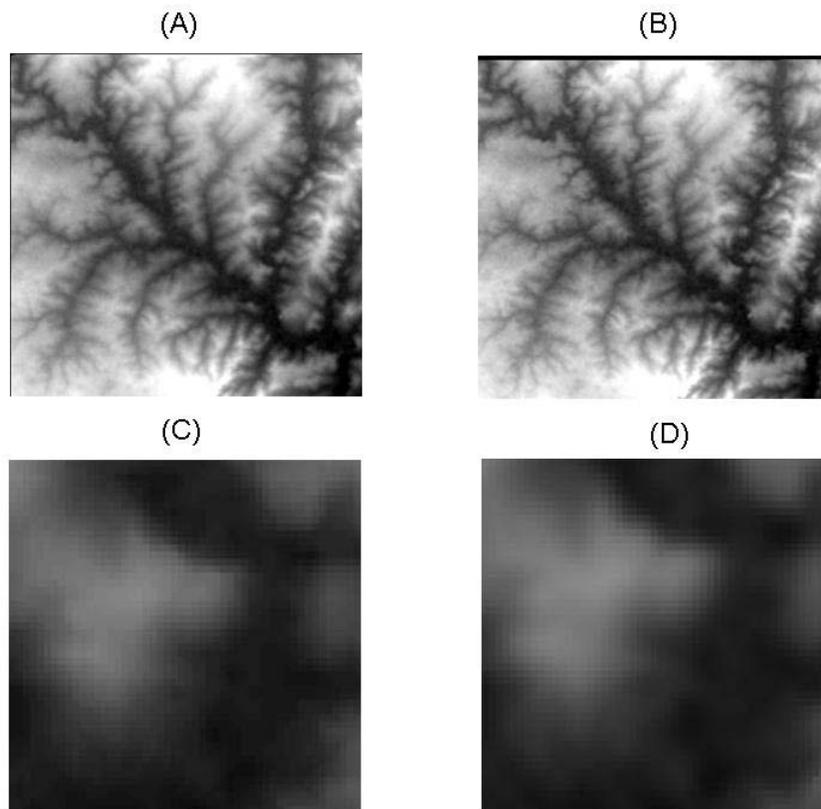


FIGURA 4.3 - MDE da área de estudo gerados a partir de dados SRTM por convolução cúbica (A e C) e por tratamento geoestatístico (B e D) em geral e em detalhe.

O MDE refinado permitiu a identificação visual dos principais modelados e outras unidades geomorfológicas, confirmando a sua utilidade como base de interpretação geomorfológica em conjunto com os materiais cartográficos existentes, principalmente pelo aumento da capacidade de interpretação das formas de relevo. Dentre os principais produtos derivados do MDE, podem ser destacadas as isolinhas geradas automaticamente em SIG. Esse produto possibilita um maior detalhamento dos limites entre unidades de paisagem com base na geomorfologia e ainda apresentam uma utilidade importante na extração da rede de drenagem a partir da interpretação visual das crênulas. Os outros produtos gerados com processamento digital do MDE para o mapeamento de variáveis morfométricas das encostas, como declividade, curvatura e orientação, apresentam relevância na interpretação

mais detalhada das formas de relevo e dos mosaicos paisagísticos, permitindo uma melhor análise e síntese de elementos da paisagem.

4.3 Mapeamentos Temáticos

Neste tópico são apresentados e discutidos os mapeamentos temáticos gerados nesta pesquisa, que se referem à parte analítica da abordagem realizada, ou seja, ao objetivo específico relacionado com o mapeamento analítico das variáveis ambientais. No caso, tais mapeamentos se referem à geomorfologia, com a delimitação dos principais modelados e unidades geomorfológicas, e à dinâmica da cobertura vegetal, com as diferentes fácies e estágios de sucessão.

4.3.1 Mapeamento Geomorfológico

O mapeamento geomorfológico foi direcionado na busca de uma interpretação hierárquica ou escalar das formas de relevo com a compartimentação espacial dessas, de acordo com a metodologia de mapeamento de Mescerjakov (1968) e Ross (2000). As características observadas na delimitação das unidades geomorfológicas foram relacionadas à rugosidade topográfica, declividades dominantes, morfologia dos topos e encostas, morfocronologia, aspectos morfométricos (declividade, amplitude altimétrica, amplitude interfluvial e densidade de drenagem) e a interação com variáveis físicas (geologia, pedologia e clima), biológicas (cobertura vegetal) e antrópicas (usos culturais). Através desta abordagem, espera-se contribuir, com uma aplicação direta, para a cartografia geomorfológica e no seu uso em estudos integrados da paisagem no semi-árido brasileiro.

O mapa geomorfológico, apresentado na Figura 4.4 e com as áreas absolutas e relativas das suas unidades de mapeamento na Tabela 4.1, representa as unidades geomorfológicas identificadas com base numa classificação hierárquica das formas de relevo. As unidades geomorfológicas foram subdivididas hierarquicamente em níveis escalares desde modelados, correspondentes ao agrupamento de formas denudacionais e agradacionais, conforme IBGE (1995) e Ross (2000). Passou pelas morfografias ou tipologias do

modelado, consideradas padrões de formas semelhantes indicadas por índices morfométricos (Ross, 2000, 2001), identificadas com base em Embrapa-Orstom (1986) e Mantovani e Riché (1986). Chegando até os segmentos de vertentes, relacionados com divisão das encostas em topos, patamares e fundos de vale (Ross, 2000). A seguir são analisadas as diferentes unidades geomorfológicas em suas subdivisões.

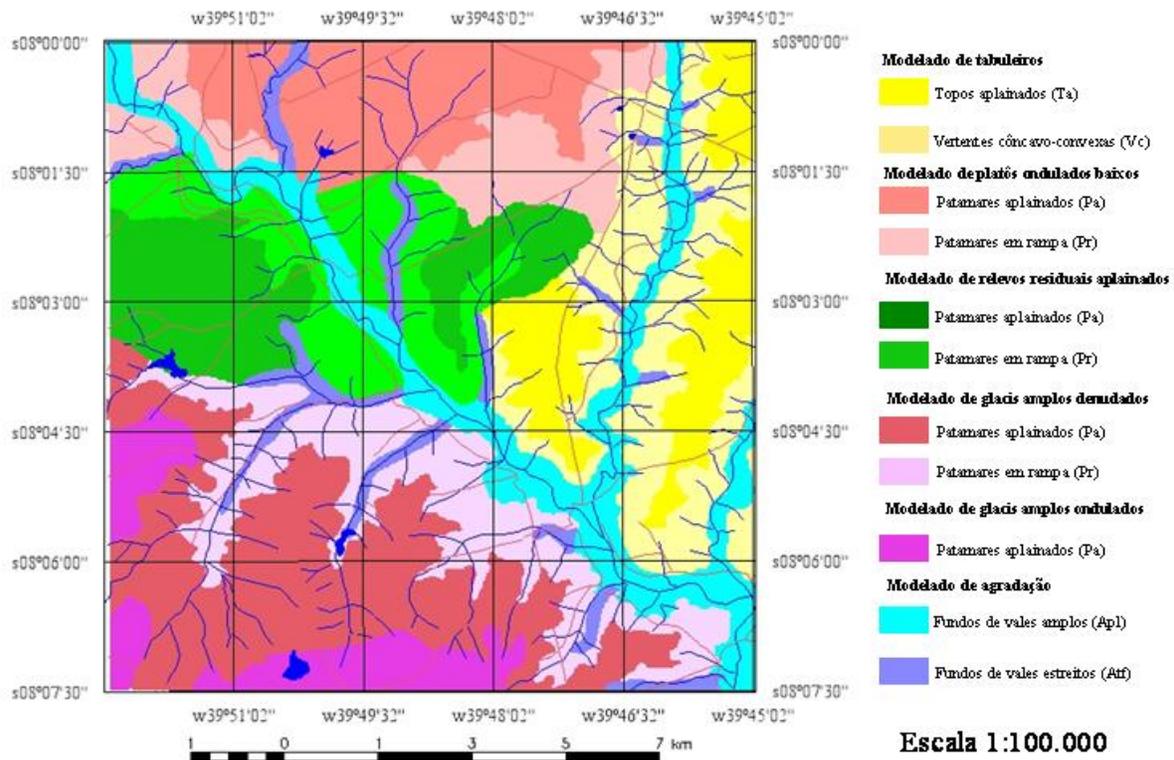


FIGURA 4.4 - Mapa geomorfológico da área de estudo com divisão hierárquica de modelados e segmentos de vertentes.

TABELA 4.1 – Valores de área das unidades geomorfológicas, em km² e % da área total.

Modelado	Morfografia (Tipologias do modelado)	Segmentos da vertente	Área (km ²)	Área (%)
Dt	Tabuleiros (Dt 32)		36,43	19,17
		Topos aplainados (Ta)	14,57	7,66
		Vertentes côncavo – convexas (Vc)	21,85	11,5
Dp	Platôs ondulados baixos (Dp)		30,92	16,27
		Patamares aplainados (Pa)	18,44	9,7
		Patamares em rampa (Pr)	12,48	6,56
Dp	Relevos residuais aplainados (Dp)		32,49	17,1
		Patamares aplainados (Pa)	17,44	9,17
		Patamares em rampa (Pr)	15,05	7,92
Dp	Glacis amplos denudados (Dp)		51,18	26,93
		Patamares aplainados (Pa)	31,79	16,73
		Patamares em rampa (Pr)	19,39	10,20
Dp	Glacis amplos ondulados (Dp)	Patamares aplainados (Pa)	10,31	5,42
Apf	Agradação (Da)		28,47	14,98
		Fundos de vales amplos	20,62	10,85
		Fundos de vales estreitos	7,85	4,13

4.3.1.1 Modelado de Tabuleiros

Denominaram-se tabuleiros às tipologias dos modelados existentes na porção NE da área de estudo, que são cortados pela BR-316 e têm como referência o povoado de Quixaba, caracterizadas pela maior denudação, devido às incisões fluviais nas encostas, e topos tabulares pouco dissecados. Representam 19,17% da área de estudo (36,43 km²), compreendendo altitudes entre 400-440m, média densidade de drenagem (1,40 km/km²) e a menor amplitude interfluvial (1220m) da área; o que revela maior rugosidade topográfica e maior presença de canais temporários da estação chuvosa. Tem como suporte geológico o Complexo Barro (Pb), anteriormente descrito, e morfocronologia do Arqueano e

Paleoproterozóico (tectogênese) ao Holoceno (morfogênese), de acordo com CPRM (2001).

Os tabuleiros foram divididos em dois setores de encosta principais: topos aplainados nas partes superiores e vertentes côncavo-convexas nas encostas inferiores.

Os topos aplainados têm altitudes de 420-440m (amplitude altimétrica de 20m), declividades de 0 a 13% e cobertura pedológica dominada por Argissolos (Embrapa, 1997, 1999), representando 7,66% da área total (14,57 km²). Quando apresentam cobertura vegetal degradada por intervenção antrópica caracterizada por fâcies de caatinga aclareirada, têm sinais de aceleração de processos erosivos (pedestais, ravinas e sulcos) por mecanismos físicos de intemperismo.

As vertentes côncavo-convexas se encontram no nível de 400-420m (amplitude altimétrica de 20m), com declives de até 13% e solos com associações de Luvisolos e Argissolos (Embrapa, 1997, 1999), correspondendo a 11,5% da área total (21,85 km²). Apresentam formação superficial argilo-arenosa com presença de cascalho e processos de erosão fracos a laminares em fâcies de caatinga arbórea-arbustiva conservada que podem ser acelerados em fâcies de caatinga degradada.

4.3.1.2 Modelado de Platôs Ondulados Baixos

Os platôs ondulados baixos se localizam na porção N-NW da área de estudo, à margem esquerda do Riacho da Volta, tendo como referencial o povoado da Volta. Representam 16,27 % da área de estudo (30,92 km²) e correspondem aos níveis de aplainamento compartimentados em altitudes entre 450 e 400m (amplitude altimétrica de 50m), com a mais baixa densidade de drenagem da área de estudo (0,80 km/km²) e amplitude interfluvial mais alta (1772m), apresentando baixa rugosidade topográfica e grande deficiência hídrica. Constituídos sobre base geológica de cunho cristalino do Complexo Barro (Pb), sua morfocronologia vai do Arqueano e Paleoproterozóico (tectogênese) ao Holoceno (morfogênese), conforme CPRM (2001).

Os segmentos de vertente identificados nesta tipologia do modelado de aplainamento foram o patamar superior (aplainado) e o patamar inferior (em rampa).

O patamar superior se nivela em dois compartimentos topográficos (440-450 e 420-430m, amplitude altimétrica de 10m) e declividade entre 0 a 8%, ocupando 9,7% da área total (18,44 km²). Apresenta como solos dominantes os Neossolos Regolíticos (Embrapa, 1997, 1999) e preponderância de processos de intemperismo mecânicos, resultando em formação superficial com predominância de seixos e cascalhos.

O patamar inferior se compartimenta nos níveis de 400-420 e 410-430m (amplitude altimétrica de 20m) e declividade de 0 a 10%, ocupando 6,56 % da área de estudo (12,48 km²). Este segmento da encosta mais baixo se caracteriza por maior número de canais e presença de intemperismo mecânico e químico, o que influi na cobertura pedológica de associações de Neossolos regolíticos e Argissolos (Embrapa, 1997, 1999) e na formação superficial areno-argilosa com presença de seixos e cascalho.

4.3.1.3 Modelado de Relevos Residuais Aplainados

Os relevos residuais aplainados se localizam na parte W e central da área de estudo, em ambas margens do Riacho da Volta e tendo como referência o povoado do Coxo. Correspondem, provavelmente, a testemunhos de antigas superfícies de aplainamento devidamente aplainadas e rebaixadas no processo de esculturação da paisagem, representando 17,1% da área de estudo (32,49 km²). Ocorrem no nível altimétrico de 390-430m (amplitude altimétrica de 40m), com baixa densidade de drenagem (0,86 km/km²) e alta dimensão interfluvial (1600m), o que denota pequeno entalhamento do relevo e menor potencial hídrico. A litologia corresponde ao Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiscriminados (Pgm4), com afloramentos de rochas sedimentares terço-aternárias observadas em campo, evidenciando a morfo cronologia do Arqueano e Paleoproterozóico (tectogênese) ao Holoceno (morfogênese) (CPRM, 2001).

Foram setorizados neste padrão de formas de aplainamento os patamares aplainados ou superiores e os patamares em rampa ou inferiores.

Os patamares superiores aplainados se encontram no compartimento 410-430m (amplitude altimétrica de 20m), com declividade entre 0 e 3,5% e dissecação fluvial praticamente ausente, e ocupam 9,17% da área total (17,44 km²). Tais patamares são cobertos predominantemente por Latossolos amarelos e Planossolos (Embrapa, 1997, 1999) com a presença de processos de intemperismo químico resultando em solos mais profundos (especialmente os primeiros), com formação superficial argilo-arenosa e pouco pedregosos, bastante ocupados por atividades antrópicas agropastoris.

Os patamares inferiores em rampa são nivelados nos compartimentos de 390-420m (amplitude altimétrica de 30m) e tem encostas de declive abaixo de 10%, o que representa 7,92% da área total (15,05 km²). Apresentam associações de solos dominadas pelo tipo Argissolo (Embrapa, 1997, 1999) de formação superficial areno-argilosa com presença de cascalhos e processos de intemperismo físico-químicos, sendo submetidos ao uso extensivo por atividades principalmente de pastoreio.

4.3.1.4 Modelado de Glacis Amplos Denudados

Os pedimentos relacionados com superfícies de cimeira apresentam forma de glacis amplos bastantes denudados em sua morfogênese o que se expressa no entalhamento da drenagem superficial, representando a maior parte da área de estudo (26,93% ou 51,18 km²). Localizam-se na porção S e central desta, à margem direita do Riacho da Volta e tendo como referência o povoado de Icaçara. Distribuem-se no compartimento topográfico de 390-430m, com média amplitude interfluvial (1465m) e alta densidade de drenagem para a área (1,50 km/km²), mostrando relevo suave a ondulado com a presença de canais fluviais. Desenvolvido em litologias do Complexo Barro (Pb), apresenta morfochronologia do Arqueano e Paleoproterozóico (tectogênese) ao Holoceno (morfogênese), conforme CPRM (2001).

Divide-se também tal modelado nos segmentos de vertente de patamar superior aplainado e de patamar inferior em rampa.

O patamar superior aplainado se encontra no nível altimétrico de 390-410m (amplitude altimétrica de 20m) e com declividades dominantes de 0 a 6%, sendo a maior parte de tal modelado (16,73% ou 31,79 km²). Suas condições morfológicas, fraco entalhamento por canais fluviais e déficit hídrico são fatores para o desenvolvimento de Planossolos (Embrapa, 1997, 1999) na cobertura pedológica. Estes solos apresentam forte suscetibilidade natural à erosão, acelerada pela rarefação da cobertura vegetal (fácies de caatinga aclareirada) devido aos processos de degradação antrópica (em especial o desmatamento), como apresentado por Guerra (2001).

O patamar inferior em rampa representa 10,20% da área total (19,39 km²) é compartimentado no nível de 410-430m (amplitude altimétrica de 20m), tem declives médios entre 0 e 8% e concentra a dissecação por canais fluviais nos glaciais amplos denudados. Dominado por Argissolos (Embrapa, 1997, 1999), que facilitam a atuação de processos erosivos lineares como pedestais, ravinas e voçorocas. Sobretudo em áreas com cobertura vegetal degradada pela saturação de atividades agropecuárias devido à localização próxima ao fundo de vale.

4.3.1.5 Modelado de Glaciais Amplos Ondulados

Os glaciais amplos ondulados foram delimitados em relação aos denudados pela maior ondulação e conseqüente maior declividade. São localizados nos limites S-SW da área de estudo e compartimentados nas altitudes entre 430-470m, caracterizando-se como o menor modelado da área (5,42 % ou 10,31 km²). Este modelado está posicionado sobre litologias dos depósitos elúvio-colúviais terço-quadernários (Tqd) representados por sedimentos detríticos areno-sílticos e areno-argilosos inconsolidados ou pouco consolidados (CPRM, 2001), com morfocronologia entre o Terciário (Tectogênese) ao Pleistoceno - Holoceno (Esculturação).

Este modelado foi relacionado na área de estudo em apenas um segmento de vertente: o patamar aplainado superior. Este segmento de vertente apresenta altitudes entre 430-470m e declividade entre 0 e 13%, sendo cobertos pedologicamente por associações de solos dominadas por Latossolos, Argissolos e Planossolos (Embrapa, 1997, 1999) com diferentes características em relação aos processos erosivos.

4.3.1.6 Modelado de Agradação

O modelado de agradação com planícies e terraços fluviais corresponde às áreas onde a dinâmica fluvial domina os processos morfogenéticos de morfocronologia entre o Pleistoceno e o Holoceno, e ocupa 14,98% da área de estudo (28,47 km²). Tais áreas se localizam ao longo do Riacho da Volta, cruzando a área de estudo no sentido NW-SE, e dos Riachos Quixaba e da Favela, no setor NE da área. Este modelado está posicionado nos fundos de vales, subdivididos em amplos e estreitos como foi realizado pela Embrapa-Orstom (1986). Ele se caracteriza pelo predomínio de drenagem semi-anastomosada com pequenos canais entrelaçados no leito do rio com seção transversal rasa e fundo chato, como caracteriza Ab'Sáber (2003).

Os fundos de vale amplos apresentam a formação de planícies de inundação ocupadas por rios intermitentes, com interrupção do fluxo superficial na longa estação seca. Ocupam 10,85% da área de estudo (20,62 km²), nivelando-se entre 380-400m, menores altitudes da área (amplitude altimétrica de 20m), e apresentam alta densidade de drenagem (2,0 km/km²), o que revela a sua importância em relação aos recursos hídricos. Áreas preferenciais ao uso antrópico com atividades agropecuárias e concentração de povoados, apresentam base geológica de sedimentos inconsolidados de origem terço-quadernária, cobertura vegetal de fâcies em galeria, como indicado por Carvalho (1986), e dominância de neossolos flúvicos, de acordo com Embrapa (1997, 1999).

Os fundos de vale estreitos, denominados localmente de “riachos de caatinga”, correspondem às áreas situadas nos patamares e vertentes inferiores dos pedimentos com a

formação de terraços fluviais, gerados com as fortes enxurradas nos períodos chuvosos. Representam a menor parte da área total (4,13% ou 7,85 km²), localizando-se também nas menores altitudes entre 380 e 400m (amplitude altimétrica de 20m), são cobertos por Neossolos Flúvicos (Embrapa, 1997, 1999) com formação superficial argilosa, litologia de sedimentos terço-quadernários e cobertura vegetal de fâcies em galeria com vegetais fotossintetizantes ao longo da estação seca, de acordo com Carvalho (1986).

4.3.2 Mapeamento da Dinâmica da Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal teve seu mapeamento baseado na estrutura, fisionomia e dinâmica, buscando a definição das fâcies de vegetação nativa e as de cunho antrópico com uma abordagem adaptada de outras metodologias já utilizadas na área de estudo e em outras áreas do semi-árido, conforme visto no Capítulo 2. As fâcies de cobertura vegetal foram classificadas a partir do padrão ou estrutura horizontal, da estratificação ou estrutura vertical, da estrutura quantitativa ou recobrimento do solo pela biomassa e das características dinâmicas em relação aos estágios evolutivos.

Neste estudo, o mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal foi relacionado diretamente ao primeiro objetivo específico, que enfatizou os mapeamentos temáticos como o da cobertura vegetal, tendo ainda uso fundamental na delimitação das geofâcies dinâmicas e antrópicas no mapeamento integrado da paisagem. Porém, a questão da dinâmica sucessional da cobertura vegetal coloca esta parte do estudo também como relacionada com o terceiro objetivo específico, ou seja, a detecção de mudanças significativas que possam identificar processos de degradação ambiental com base nos dados disponíveis. Procurou-se, com tal abordagem, contribuir com o mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal relacionada com a ação antrópica em paisagens semi-áridas que permitam a análise de questões vinculadas com a degradação ambiental no sentido amplo. Como apresentado por Carvalho (1986), Maldonado (2004) e Carvalho e Freitas (2005), o uso do Sensoriamento Remoto, com suas técnicas e metodologias, possibilitou uma delimitação das fâcies de

cobertura vegetal sujeitas a diferentes fases de sucessão vegetal em relação aos processos de degradação e recuperação, sem esquecer da importância das fâcies antropizadas.

Os aspectos estruturais de classificação da cobertura vegetal foram definidos por Carvalho (1986) para a interpretação das fâcies de cobertura vegetal da área. A estrutura horizontal ou padrão da vegetação que procura definir a maneira como as comunidades vegetais se distribuem no espaço horizontal, caracterizada como: **ausente** (taxas de cobertura total do solo abaixo de 2%), **esparso** (cobertura do dossel vegetal entre 2 e 10%), **aclareirado** (cobertura vegetal corresponde a taxas entre 10 e 60%) e **aleatório** (cobertura vegetal atinge valores acima de 60%).

Em relação à estratificação que corresponde ao arranjo ou distribuição das plantas conforme suas alturas, a caatinga de Quixaba foi dividida em quatro estratos principais: **arbóreo** (com domínio de espécies arbóreas com altura superior a 4 metros), **arbustivo** (onde dominam espécies arbustivas com porte entre 1 e 4 metros) e **herbáceo** (onde a altura das plantas herbáceas ocorre abaixo de 1 metro).

Quanto à estrutura quantitativa da vegetação que se refere à distância entre as espécies vegetais e a ocupação do espaço horizontal por tais comunidades vegetais, a caatinga da área de estudo foi dividida conforme a densidade (taxa de cobertura do solo de cada estrato) e conforme a continuidade (taxa de cobertura total do solo, considerando todos estratos). Quanto à densidade, a caatinga foi dividida em quatro tipos: **densa** (taxa de cobertura do estrato acima de 40%), **aberta** (taxas entre 10 e 40%), **esparsa** (taxas entre 2 e 10%) e **ausente ou rara** (taxas inferiores a 2%). Já em relação à continuidade, a caatinga de Quixaba foi dividida em dois tipos: **contínuo** (taxas de solo exposto inferior a 10%) e **descontínuo** (taxas de solo exposto entre 10 e 40%).

A partir de tais características, a classificação da caatinga de Quixaba em diferentes fâcies e estágios dinâmicos de cobertura vegetal teve como resultado o mapeamento que pode ser visto na Figura 4.5, com as áreas absolutas e relativas na Tabela 4.2. Este foi classificado

conforme as fâcies principais de caatinga (arbórea, arbórea-arbustiva e aclareirada), em galeria e antrópicas, com os respectivos estágios de sucessão na dinâmica da cobertura vegetal no período de estudo de aproximadamente 20 anos.

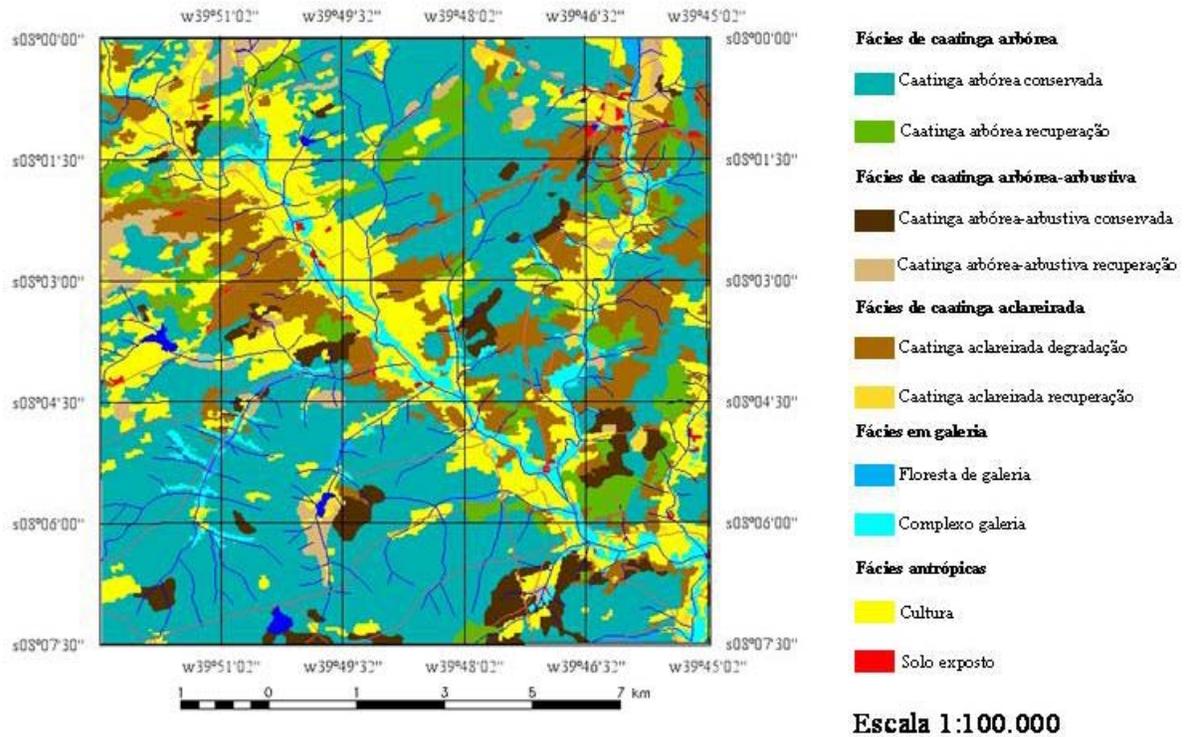


FIGURA 4.5 - Mapeamento dinâmico da cobertura vegetal no período 1983-2004.

TABELA 4.2 – Áreas absolutas e relativas das fácies de cobertura vegetal mapeadas.

Fácies	Tipo de dinâmica	Área (km²)	Área (%)
Galeria	Floresta Galeria	1,20	0,63
	Complexo Galeria	8,84	4,65
Antrópica	Cultura	39,00	20,52
	Solo exposto	0,82	0,43
Caatinga Aclareirada	Caatinga Aclareirada recuperação	3,06	1,61
	Caatinga Aclareirada degradação	25,16	13,24
Caatinga Arbórea-arbustiva	Caatinga arbórea-arbustiva conservada	8,25	4,34
	Caatinga arbórea-arbustiva recuperação	5,68	2,98
Caatinga Arbórea	Caatinga arbórea conservada	88,12	46,37
	Caatinga arbórea recuperação	10,68	5,62

4.3.2.1 Fácies de Caatinga Arbórea

A fácies de caatinga arbórea (Figura 4.6) retrata a forma florestal da caatinga, que de acordo com Prado (2003) e Maldonado (2004) representava o tipo de caatinga de maior distribuição, sendo atualmente praticamente inexistente, quase somente encontrada em sua forma degradada. Nesta área, porém, representou mais da metade da área de estudo (aproximadamente 52% ou 98,8 km²), tendo relação com os modelados de aplainamento e de dissecação da área em seus diferentes setores (topos, vertentes e patamares). Tem estrato arbóreo praticamente contínuo, com um estrato superior irregularmente aberto com altura entre 8 e 15 metros e presença homogênea de indivíduos nos estratos herbáceo e arbustivo, agrupando os tipos estruturais de caatinga arbórea contínua e caatinga arbórea descontínua. Nesta classificação, esta fácies integrou ainda a fácies de caatinga arbórea-clara que é dominada em quase sua totalidade pelo estrato arbóreo, de altura elevada e rico em espécies, e quase sem indivíduos nos estratos arbustivo e herbáceo (Carvalho, 1986).



FIGURA 4.6 - Foto de transecto representativa de fácies de caatinga arbórea na área de estudo.

O transecto de uma área de fâcies arbórea pode ser visto na Figura 4.7 que retrata a vegetação em perfil nos diferentes estratos (arbóreo, arbustivo e herbáceo) e também as partes com solo exposto. Existe certa heterogeneidade entre os estratos nesta fâcies, com todos os estratos bem desenvolvidos e cobertura total de 98%. O estrato arbóreo apresentou 90% de cobertura, assim como o herbáceo, e o estrato arbustivo chegou a 62% de cobertura do solo.

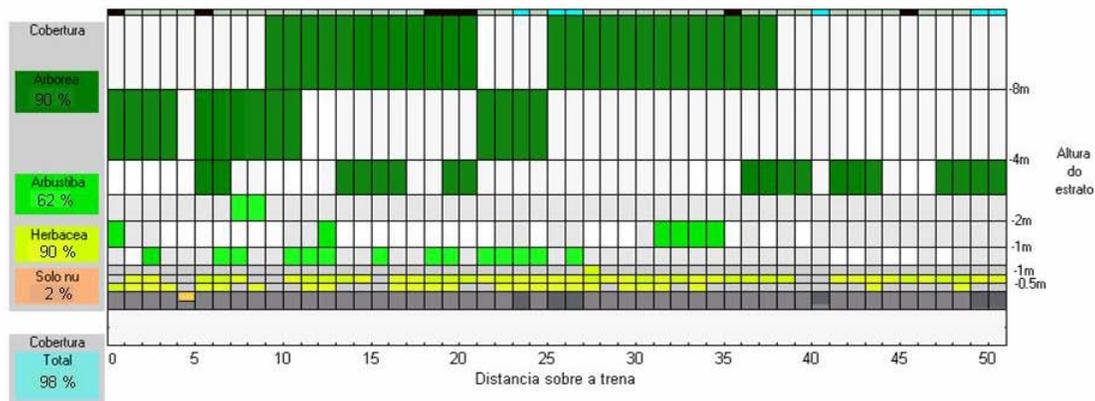


FIGURA 4.7 - Perfil da Cobertura Vegetal de Fâcies de Caatinga Arbórea.

As espécies de porte arbóreo que caracterizam tal fâcies são a braúna, aroeira, facheiro, angicos, pau-branco, cascudo ou sete cascas, imburana de cheiro, imburana de cambão, imbuzeiro e outras que apresentam alto valor ecológico (as duas primeiras estão ameaçadas de extinção) e econômico (passíveis de uso em práticas agroflorestais). O estrato arbustivo é dominado por marmeleiro preto, quebra faca, candeia, pinhão brabo, jurema-branca e outras; e as espécies herbáceas principais são as malvas, caroá, macambira e outras, cujos nomes científicos podem ser encontrados em anexo.

Esta fâcies de cobertura vegetal foi dividida em dois estágios de sucessão em sua dinâmica conforme a conservação e a recuperação desta fâcies no intervalo de tempo analisado. A caatinga arbórea conservada representou a maior parte da área de estudo (46,37% ou 88,12 km²), caracterizando as partes que permaneceram sem alteração antrópica perceptível através do sensoriamento remoto neste intervalo de tempo, relacionando-se com as

condições mais “originais” da cobertura de caatinga na área de estudo. Já a fâcies de caatinga arbórea em recuperação corresponde a apenas 5,62 % da área total (10,68 km²) e representa a vegetação de caatinga em estágios elevados de sucessão dinâmica, porém com diferentes graus de alteração antrópica da cobertura original.

4.3.2.2 Fâcies de Caatinga Arbórea-Arbustiva

A caatinga arbórea-arbustiva (Figura 4.8) corresponde às áreas com regeneração florestal muito antiga e certo grau de estabilidade dinâmica devido ao seu elevado estágio de sucessão vegetacional. Esta fâcies ocupa 7,32% da área total (13,93 km²) e apresenta, como a fâcies anterior, relação com os modelados de aplainamento e dissecação. Este tipo de cobertura engloba os tipos estruturais de caatinga arbórea-arbustiva contínua e caatinga arbórea-arbustiva descontínua e se caracteriza por dossel com altura média entre 4 e 8m, de acordo com Carvalho (1986).



FIGURA 4.8 - Foto de transecto representativa de fâcies de caatinga arbórea-arbustiva.

O perfil da fâcies de caatinga arbórea-arbustiva (Figura 4.9) mostra a dominância do estrato arbustivo neste tipo de caatinga, além do alto índice de cobertura do solo (no caso cobertura completa) que se torna fator principal na dificuldade de sua diferenciação em relação à

caatinga arbórea. O estrato arbustivo apresentou cobertura de 98%, seguido do estrato herbáceo com 84% e do arbóreo, com menor taxa de cobertura (46%).

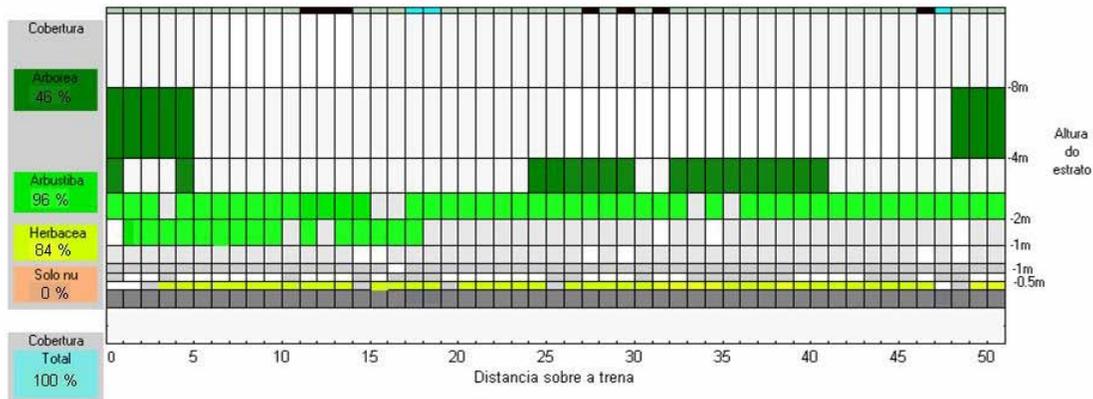


FIGURA 4.9 - Perfil da vegetação de fâcies de caatinga arbórea-arbustiva.

O estrato arbóreo está dominado pela jurema preta, a catingueira e pelo pereiro preto; já o estrato arbustivo é representado por marmeleiro-preto, pinhão-brabo, jurema-branca e outras espécies; e o herbáceo por malvas. Estas espécies apresentam características pioneiras e são indicadoras de processos de sucessão secundária como definido por Maldonado (2004).

Em relação a sua dinâmica, como a fâcies anterior, a caatinga arbórea-arbustiva foi relacionada com os estágios de conservação e recuperação. O primeiro retrata condições de regeneração já estabilizadas ao longo dos últimos 20 anos e respondeu por 4,34% da área de estudo (8,25 km²); enquanto o segundo representou as áreas que se recuperaram neste intervalo que foram 2,98% da área (5,68 km²).

4.3.2.3 Fâcies de Caatinga Aclareirada

A fâcies de caatinga aclareirada (Figura 4.10) se caracteriza pela relação sociedade e natureza na estruturação de espaços marcados por intenso processo erosivo, representando áreas onde a reconquista vegetal é diferencialmente desenvolvida com a pressão antrópica tendo um papel principal e as condições do meio assumindo um papel coadjuvante; ou,

ainda, áreas onde as condições naturais apresentam vulnerabilidades que são reforçadas pela atuação antrópica. Esta representa 14,85% da área de estudo (28,22 km²) e ocupa os mesmos modelados das outras fácies de caatinga. Apresenta em sua maioria o padrão aclareirado com uma cobertura vegetal descontínua e de baixa cobertura do solo, além da estrutura representada por árvores e arbustos como a jurema preta, a catingueira e o pereiro preto. Apresenta, conforme Carvalho (1986), o agrupamento dos seguintes tipos estruturais da caatinga com padrão aclareirado: caatingas aclareiradas arbórea-arbustiva, arbórea e arbórea clara.



FIGURA 4.10 - Foto de transecto representativa de fácies de caatinga aclareirada.

Como pode ser visto na Figura 4.11, esta fácies apresenta menor cobertura global do solo (76%) e nenhum estrato dominante. A baixa cobertura do solo, característica fundamental desta fácies, se relaciona com baixas taxas de cobertura arbórea (26%) e herbácea (24%), sendo um pouco mais representativo o estrato arbustivo (54%), sinal de possível sucessão secundária.

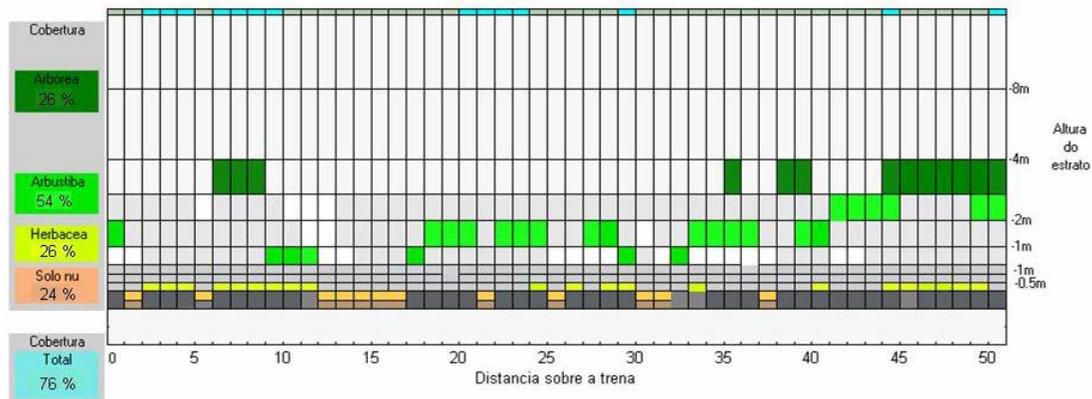


FIGURA 4.11 - Perfil da cobertura vegetal de fâcies de caatinga aclareirada.

Tal fâcies de cobertura vegetal foi classificada dinamicamente como representativa de processos de degradação e de recuperação. A caatinga aclareirada degradada se relaciona às fâcies que sofreram alteração antrópica severa ou que mantiveram as condições aclareiradas no intervalo temporal retratado e representa 13,24% da área de estudo (25,16 km²). Já a caatinga aclareirada em estágio de recuperação representa áreas de cultura que foram abandonadas e passam por processos iniciais de sucessão secundária, tendo correspondido a apenas 1,61% da área total (3,06 km²).

4.3.2.4 Fâcies em Galeria

A fâcies em galeria (Figura 4.12) compreende o Complexo Arbóreo semi-decídúo, localizada nas áreas de fundos de vales ou várzeas adequadas para as árvores e os vegetais perenes, ou seja do modelado de agradação. Representada por dossel arbóreo com altura entre 10 e 15m, ocupa apenas 5,28% da área de estudo (10,04 km²). Está formada principalmente por árvores de grande porte e folhagem perene como o juazeiro, quixabeira, pajeú, muquém e outras. O uso agropecuário ocupa grande extensão desta fâcies e em geral mantém a superfície do solo com baixa cobertura, como caracterizado por Carvalho (1986).



FIGURA 4.12 - Foto de transecto representativa de fâcies em galeria.

O perfil da fâcies em galeria (Figura 4.13) mostra a extrema dominância do estrato arbóreo alto (100% de cobertura) e alta cobertura global do solo (100%). O estrato arbustivo é completamente ausente nesta fâcies e o herbáceo é incipiente (24% de cobertura).

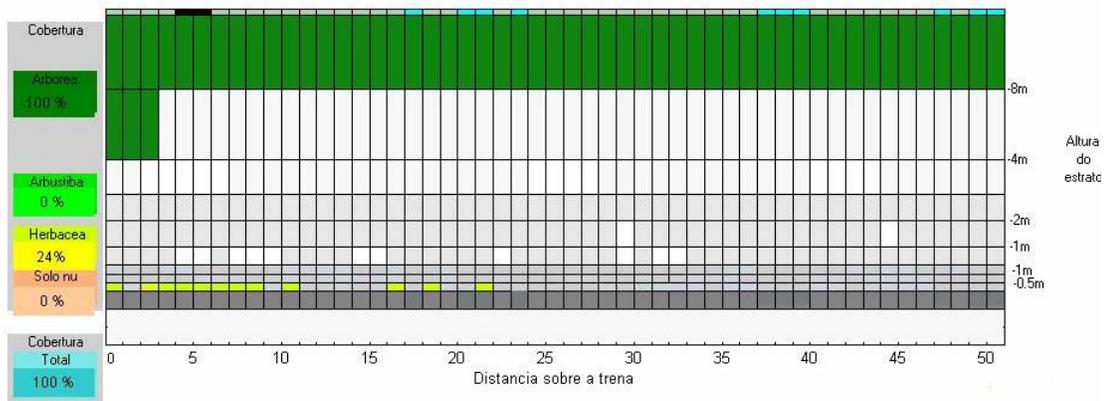


FIGURA 4.13 - Perfil da fâcies em galeria.

A fâcies em galeria foi dividida em relação a sua dinâmica em dois tipos principais, conforme o estágio de sucessão vegetal. O primeiro é a **floresta de galeria** que representa

as áreas desta fácies conservadas com condições próximas da originalidade e tem pouca expressão em termos de área (apenas 0,63% da área total ou 1,2 km²). Já o segundo, denominado **complexo galeria**, representa uma mescla de diferentes tipos de cobertura que mantém o caráter fotossintetizante ao longo da estação seca composto por árvores, pastagens, pequenas culturas e outras, ocupando 4,65% da área de estudo (8,84 km²).

4.3.2.5 Fácies Antrópicas

As fácies antrópicas (Figura 4.14) correspondem aos espaços utilizados para atividades agropecuárias ou abandonados para a reconquista vegetal no tipo de cultura cíclica utilizado na área. Estas representam 20,95% da área de estudo (39,82 km²) e ocupam tantos os espaços colinosos como, em especial, as várzeas. De acordo com Carvalho (1986), o tipo estrutural da cultura mais típico é a clareira, onde a cobertura de arbustos e pequenas árvores não passam de 10%, e o estrato herbáceo chega ao máximo a 40%.

Estas fácies podem ser espaços desprovidos de cobertura vegetal, com formas geométricas irregulares a retangulares, contornos retilíneos e limites abruptos, como o tipo estrutural de caatinga ausente. Também podem estar ocupados por um complexo arbustivo-herbáceo ou arbustivo denso, conservando em geral as formas geométricas e os limites abruptos, típicos de áreas de reconquista vegetal ou áreas de ocupação humana abandonadas. Conforme Maldonado (2004), encontram-se, em geral, três tipos principais de lavouras: a roçada, a mecanizada e em covetas, sem práticas de cobertura com restos vegetais e com disposição para irrigação por dispersão da enxurrada para infiltração no solo. Neste estudo, as fácies antrópicas foram divididas em fácies de cultura (20,52% ou 39,00 km²) e de solo exposto (0,43% ou 0,82 km²), representando as condições produtivas ou não de tais áreas antropizadas.



FIGURA 4.14 - Foto de fâcies de cultura, no caso pastagem.

4.4 Mapeamento Integrado da Paisagem

Para reforçar o conceito de geossistema, cabe lembrar que o estudo integrado da paisagem na abordagem geossistêmica (Bertrand e Bertrand, 2002) busca a interpretação da interação entre variáveis físicas, ecológicas e sociais. Esta análise é baseada em três elementos fundamentais: a **taxo-corologia** com a hierarquização escalar da paisagem, a **dinâmica** dos geossistemas com a subdivisão baseada na teoria bioresistática de Erhart (1962 e 1966) e a **tipologia** com a classificação em nível de geofâcies que representam a dinâmica sucessional da cobertura vegetal e a ocupação antrópica da paisagem.

A apresentação dos resultados do mapeamento integrado da paisagem foi relacionada com a definição dos mosaicos paisagísticos da área a partir de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Assim, buscou-se com tal mapeamento integrado a realização do segundo objetivo específico deste estudo: *“mapear as unidades de paisagem da área de estudo, através da abordagem geossistêmica e integrada dos produtos gerados na pesquisa e de outros dados anteriormente disponíveis baseado no banco de dados geográfico da pesquisa”*.

A caracterização das unidades de paisagem aqui apresentada salientou a hierarquização taxo-corológica em nível mais detalhado da paisagem, com a divisão hierárquica em modelados, geossistemas e geofácies. Os modelados correspondem às morfologias principais do relevo. Eles foram definidos pelo mapeamento geomorfológico com a caracterização do tipo de modelado, e identificados pelos seus tipos e características morfogenéticas e fisiográficas. Os geossistemas são resultados da divisão dos primeiros em compartimentos que apresentam certa homogeneidade em suas variáveis ambientais e formam um complexo geográfico. Já as geofácies correspondem à subdivisão dos geossistemas em unidades que representam a sua dinâmica, com a definição de áreas degradadas, em recuperação e conservadas, e também a antropização com as áreas de cultura formando agroecossistemas.

Além de tais mapeamentos, foram descritos e analisados neste tópico os resultados do índice de vulnerabilidade à perda de solo. Este se caracteriza como mapeamento sintético da paisagem por representar a integração de variáveis físicas, ecológicas e sociais como subsídio à interpretação dos processos erosivos na área de estudo. Tal mapeamento se relacionou com o objetivo específico preocupado com a identificação de variáveis correlacionadas com o fenômeno da desertificação.

4.4.1 Mapeamento dos Geossistemas

A apresentação das unidades geossistêmicas mapeadas se baseou na hierarquia paisagística da área através da descrição dos modelados e geossistemas com ênfase nos fatores paisagísticos de cunho físico (geologia, geomorfologia e pedologia), ecológico (cobertura vegetal) e antrópico (espaços de agropecuária). A caracterização e delimitação dos modelados e geossistemas seguiram os critérios qualitativos apontados na metodologia a partir das classes ou unidades geológicas, geomorfológicas e pedológicas em cada unidade de paisagem. Estes primeiros foram associados a critérios morfométricos ou quantitativos (orientação de vertentes, hipsometria, densidade de drenagem, amplitude interfluvial e declividade), em sua maioria dividida em classes representativas de qualidades, que foram

classificados para fins comparativos na sua descrição. Entre os aspectos quantitativos está a hipsometria, onde as altitudes dos geossistemas foram classificadas localmente em baixas (380-400m), médias (400-450m) e altas (450-470m). A densidade de drenagem também foi dividida em baixa (0-1 km/km²), média (1-1,5 km/km²) e alta (acima de 1,5 km/km²). A amplitude interfluvial foi interpretada como curta (menor de 1200m), média (entre 1200 e 1500m) e longa (acima de 1500m). E, finalmente, a declividade foi relacionada como baixa (0 a 3,5%), média (0 a 8%) e alta (0 a 13%), relacionando com as maiores declividades que os geossistemas atingem, conforme adaptação às declividades predominantes da área de estudo.

Os modelados foram denominados a partir do mapeamento geomorfológico da área, já os geossistemas foram identificados pela combinação de letras e dígitos romanos, como pode ser visto no seu mapeamento final (Figura 4.15). As características principais dos modelados e geossistemas da área de estudo podem ser vistas na Tabela 4.1 com informações a respeito da geologia, geomorfologia, pedologia e cobertura vegetal das unidades de paisagem.

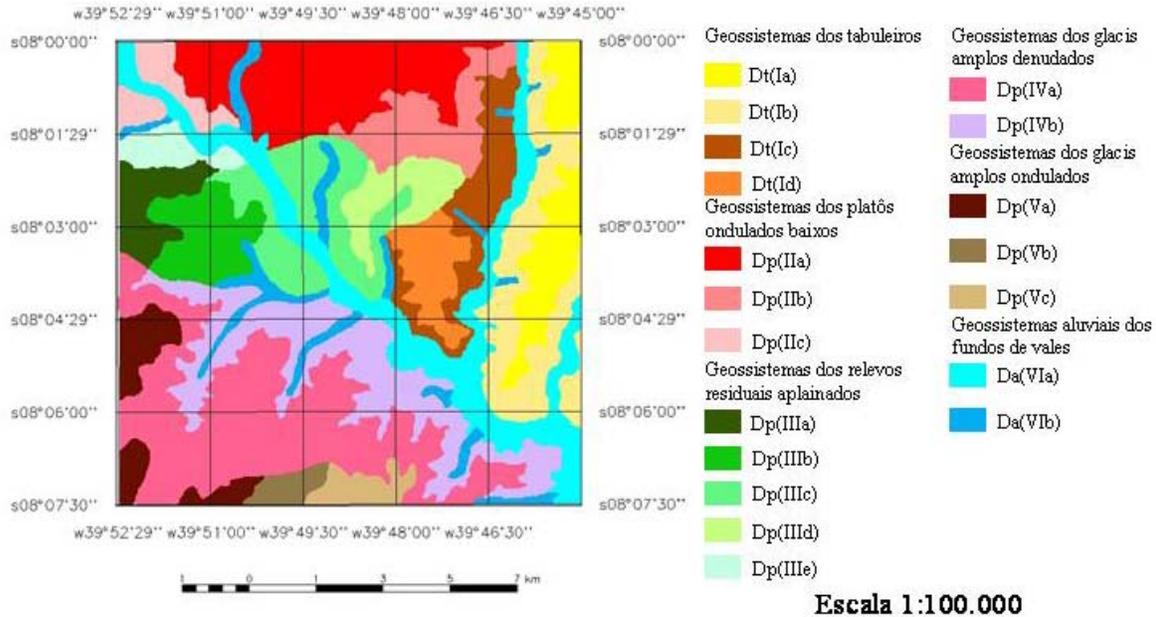


FIGURA 4.15 - Mapa dos geossistemas da área de estudo.

4.4.1.1 Geossistemas dos Tabuleiros

O modelado dos tabuleiros (Dt) se localiza na parte NE da área de estudo. Têm relevo dissecado com vertentes côncavo-convexas e topos aplainados com altitudes medianas (entre 400-440m), média densidade de drenagem (1,40 km/km²) e a menor amplitude interfluvial (1220m) da área. Desenvolvido sobre suporte geológico do Complexo Barro (Pb) com morfochronologia do Arqueano e Paleoproterozóico (tectogênese) ao Holoceno (morfogênese) (CPRM, 2001). Tal modelado foi compartimentado em quatro diferentes geossistemas, apresentados a seguir.

Dt(Ia) ou Geossistema dos topos aplainados a leste de Quixaba: localizado no setor de encosta dos topos aplainados a leste do povoado e do riacho de Quixaba, com altitudes medianas, relativamente mais altas (420-440m) em relação às vertentes côncavo-convexas, declividades de 0 a 13% e orientação das vertentes no quadrante SW. A cobertura pedológica é dominada por Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos em associação com Luvisolos Crômicos e Neossolos Litólicos (PAb1 11) de acordo com Embrapa (1997,

1999) com grande pedregosidade na formação superficial relacionada aos processos morfogenéticos. Quando apresentam as fácies de caatinga arbórea e arbórea-arbustiva degradadas por intervenção antrópica, caracterizando fácies de caatinga aclareirada, este geossistema apresenta sinais de aceleração de processos erosivos (pedestais, ravinas e sulcos).

TABELA 4.1: Características paisagísticas dos modelados e geossistemas da área de estudo.

MODELADO	GEOSSISTEMAS	SEGMENTO DE VERTENTE	DECLIVIDADE (%)	DENSIDADE DRENAGEM (km/km ²)	AMPLITUDE INTERFLUVIAL (m)	HIPSO-METRIA (m)	ORIENTAÇÃO	PEDOLOGIA	GEOLOGIA
Tabuleiros (Dt)	Dt(Ia)	Ta	0 a 13%	1,40	1220	420-440	SW	PAb1 11	Pb
	Dt(Ib)	Vc	Idem	Idem	Idem	400-420	Idem	Ncv	Idem
	Dt(Ic)	Vc	0 a 8%	Idem	Idem	Idem	SE	PAb1 4	Idem
	Dt(Id)	Ta	Idem	Idem	Idem	420-440	SE-SW	PAb1 10	Idem
Platôs ondulados baixos (Dp)	Dp(IIa)	Pa	0 a 6%	0,80	1772	420-430/440-450	S	Re2	Pb
	Dp(IIb)	Pr	Idem	Idem	Idem	400-420/420-440	SW	PAb1 4	Idem
	Dp(IIc)	Pr	0 a 8%	Idem		Idem	SE e NW	Re11E	Idem
Relevos residuais aplainados (Dp)	Dp(IIIa)	Pa	0 a 3,5%	0,86	1600	410-430	W	PLS 5B	Pgm4
	Dp(IIIb)	Pa	0 a 6%	Idem	Idem	Idem	Idem	LA2de	Idem
	Dp(IIIc)	Pr	Idem	Idem	Idem	400-420/390-410 390-420	S	PAb1 10	Idem
	Dp(IIIId)	Pr	Idem	Idem	Idem	Idem	S	PAb1 4	Idem
	Dp(IIIe)	Pr	0 a 8%	Idem	Idem	Idem	NE	PLS 5B	Idem
Glacis amplos denudados (Dp)	Dp(IVa)	Pa	0 a 6%	1,50	1465	410-430	N	PLS 5B	Pb
	Dp(IVb)	Pr	0 a 8%	Idem	Idem	390-410	Idem	PAb1 10	Idem
Glacis amplos ondulados (Dp)	Dp(Va)	Pr	0 a 3,5%	0	0	430-470	N	LA2de	Tqd
	Dp(Vb)	Pr	0 a 6%	Idem	Idem	Idem	Idem	PLS 5B	Idem
	Dp(Vc)	Pr	0 a 13%	Idem	Idem	Idem	NE	PAb1 4	Idem
Fundos de vales (Da)	Da(VIa)	Apl	0 a 3,5%	2,00	-	380-400		Al	Aluvial
	Da(VIb)	Atf	Idem	Idem	Idem	Idem		Idem	Idem

Dt(Ib) ou Geossistema das vertentes a leste de Quixaba: relaciona-se com as vertentes côncavo-convexas, localizadas a leste do povoado e do riacho de Quixaba, que se encontram no nível mediano relativamente mais baixo (400-420m), com orientação das vertentes no quadrante SW e declives maiores chegando até 13%, o que retrata maior dissecação fluvial e ondulação do relevo. Este setor de vertente apresenta o desenvolvimento de solos como as associações de Luvisolos Crômicos, Planossolos Nátricos e Neossolos Litólicos (Ncv), conforme Embrapa, (1997, 1999). Estas associações de solos apresentam, em sua maioria, formação superficial argilo-arenosa com presença de cascalho e processos de erosão fracos a laminares em fácies de caatinga arbórea-arbustivas conservada. Estes processos erosivos podem ser acelerados em fácies de caatinga aclarada.

Dt(Ic) ou Geossistema das vertentes a oeste de Quixaba: encontra-se nas vertentes côncavo-convexas a oeste do do povoado e do riacho de Quixaba, no nível topográfico de 400-420m acima mencionado, com orientação no quadrante SE e declividade mediana (entre 0 e 8%). Este geossistema apresenta em sua superfície uma cobertura de solos que incluem as associações de grupos indiferenciados de Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos e Planossolos Háplicos (PAb1 4) de acordo com Embrapa (1997, 1999). Tais condições físicas, conjugadas com as características climáticas e à ação antrópica sobre a cobertura vegetal, propiciam o desenvolvimento de processos resistáticos ou geomorfogenéticos especialmente relacionados ao intemperismo mecânico.

Dt(Id) ou Geossistema dos topos aplainados a oeste de Quixaba: posiciona-se no setor de encosta dos topos aplainados situados também a oeste do povoado e do riacho de Quixaba, ao sul do geossistema anterior. Está compartimentado topograficamente em altitudes mais altas do que o geossistema anterior, isto é, entre 420-440m, com orientação das vertentes no quadrante SE-SW e declividade mediana que chega a 8%. A cobertura pedológica está relacionada com as associações de Argissolos Amarelos e Vermelho-

Amarelos, Luvisolos Crômicos e Planossolos Háplicos (PAb1 10), conforme Embrapa (1997, 1999). Como os outros geossistemas dos tabuleiros, este apresenta fatores físicos, ecológicos e sociais que o relacionam na sua dinâmica às condições resistáticas de geomorfogênese mecânica (Bertrand e Bertrand, 2002).

4.4.1.2 Geossistemas dos Platôs Ondulados Baixos

O modelado de platôs ondulados baixos são encontrados na porção N e NW da área de estudo, representados por níveis de aplainamento compartimentados em segmentos de vertente identificados como patamar superior aplainado e patamar inferior em rampa. Aparecem também em altitudes medianas (entre 400 e 450 m), com a mais baixa densidade de drenagem da área de estudo (0,80 km/km²) e amplitude interfluvial mais longa (1772 m). Apresentam base geológica de rochas cristalinas do Complexo Barro (Pb), de morfocronologia do Arqueano e Paleoproterozóico (tectogênese) ao Holoceno (morfogênese) (CPRM, 2001). Este modelado foi subdividido em três geossistemas com base em suas características paisagísticas.

Dp(IIa) ou Geossistema dos altos platôs da Volta: localizado no patamar superior em rampa orientado no quadrante S, à margem esquerda do Riacho da Volta e nas proximidades do povoado com mesmo nome. Nivelase nos compartimentos topográficos relativamente mais altos (440-450 e 420-430m), com declividades medianas entre 0 a 6%. Caracteriza-se por pavimentos detríticos ou rudáceos oriundos de processos de intemperismo mecânico em condições fisiográficas semi-áridas, como mencionado por Passos e Bigarella (2001). Estes pavimentos correspondem à associação de Neossolos Litólicos com Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos (Re2), de acordo com Embrapa (1997, 1999). Tais solos apresentam perfil bastante raso e transição abrupta de horizontes que facilitam processos resistáticos principalmente quando tem a cobertura original de caatinga arbórea submetida à ação antrópica como foi observado por Tricart e KiewietdeJonge (1992) e Guerra e Botelho (2001).

Dp(IIb) ou Geossistema dos baixos platôs de Quixaba: representado pelo patamar inferior em rampa orientado no quadrante SW, mais próximos ao povoado de Quixaba, ficando a oeste deste. Compartimenta-se em níveis medianos, mais baixos que o geossistema anterior (400-420 e 410-430m), e declividades entre 0 e 6%. Trata-se de um segmento de encosta mais baixo, caracterizado por maior dissecação fluvial em relação ao segmento superior. Sua superfície está coberta por associações de Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos e Planossolos Háplicos (PAb1 4), conforme Embrapa (1997, 1999). Trata-se, portanto, de uma formação superficial areno-argilosa com presença de sedimentos mais grosseiros. Tal conjugação de características físicas e ecológicas possibilita, em relação à dinâmica do geossistema, a evolução de processos geomorfológicos (resistasia natural) que são acelerados com os impactos antrópicos na fácies de cobertura vegetal de caatinga arbórea ou arbórea-arbustiva que caracterizam a área de estudo.

Dp(IIc) ou Geossistema dos baixos platôs da Volta: também localizado no patamar inferior em rampa com orientação de vertentes nos quadrantes SE e NW, à margem esquerda do riacho da Volta e a oeste do povoado com mesmo nome. Está compartimentado topograficamente num nível relativamente mais baixo de 400-420m (semelhante ao anterior) e com declividades entre 0 a 8%, pouco mais altas em relação aos dois geossistemas anteriores. Apresenta cobertura pedológica com associação de Neossolos Litólicos e Planossolos Háplicos (Re11E), de acordo com Embrapa (1997, 1999). As principais características deste geossistema são os depósitos rudáceos ou detríticos, descritos por Passos e Bigarella (2001), que influenciam nas condições naturais resistáticas em função da alta erodibilidade de tais solos, devido à transição abrupta entre horizontes, que são aceleradas pela ação do homem, como constatado por Guerra e Botelho (2001).

4.4.1.3 Geossistemas dos Relevos Residuais Aplainados

O modelado dos relevos residuais aplainados se localiza no setor centro-oeste da área de estudo. Corresponde a prováveis testemunhos de antigas superfícies de cimeira

devidamente aplainadas e rebaixadas no processo morfoescultural da paisagem, setorizados em patamares aplainados superiores e patamares em rampa inferiores. Ocorrem no nível altimétrico mediano de 390-430m, com baixa densidade de drenagem (0,86 km/km²) e longa dimensão interfluvial (1600m). A sua litologia corresponde ao Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiscriminados (Pgm4) com morfocronologia do Arqueano e Paleoproterozóico (tectogênese) ao Holoceno (morfogênese), conforme CPRM (2001). Este modelado foi subdividido em cinco geossistemas:

Dp(IIIa) ou Geossistema dos altos relevos residuais do Coxo com Planossolos: corresponde aos patamares superiores aplainados orientados no quadrante W, situados à margem direita do riacho da Volta, mais próximos do povoado do Coxo (a oeste do mesmo). Compartimenta-se no nível mediano de 410-430m, com declividade baixa entre 0 e 3,5% e dissecação fluvial praticamente inexistente. Sobre tais patamares altos se desenvolvem associações de Planossolos Háplicos e Nátricos, Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, e Neossolos Litólicos (PLS 5B), como mapeados por Embrapa (1997, 1999), Este ambiente se caracteriza, portanto, pela presença de condições naturais de resistasia relacionadas a pavimentos detríticos ou rudáceos originados por processos mecânicos de intemperismo.

Dp(IIIb) ou Geossistema dos altos relevos residuais do Coxo com Latossolos: como o geossistema anterior, está relacionado com os patamares superiores aplainados entre 410 e 430m, orientados no sentido W, localizados à margem direita do riacho da Volta e tendo como referencial ainda o povoado do Coxo (a oeste deste). Diferencia-se pelas declividades relativamente maiores (de 0 a 6%) e pela presença de formação superficial com maior manto de intemperismo, provável testemunho de condições biostáticas pretéritas no processo de geomorfogênese da paisagem. Esta característica diferenciadora se reflete na presença de associação de Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos distróficos e eutróficos (LA2de), conforme Embrapa (1997, 1999), com perfis bem desenvolvidos.

Dp(IIIc) ou Geossistema dos baixos relevos residuais do Coxo com Argissolos: está relacionado com patamares inferiores em rampa, localizados em ambas margens do riacho da Volta e tendo ainda como referencial o povoado do Coxo (localizado neste geossistema). Nivelado nos compartimentos topográficos medianos entre 390-420m, relativamente mais baixos que os dois geossistemas anteriores, orienta-se no quadrante S e apresenta encostas com declives medianos abaixo de 6%, com maior dissecação e rugosidade topográfica em relação aos patamares superiores. Sua cobertura pedológica é formada pelas associações de Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, Luvisolos Crômicos e Planossolos Háplicos (PAb1 10), de acordo com Embrapa (1997, 1999), com depósitos detríticos extensivos nas encostas que retratam os processos geomorfológicos resistáticos, naturalmente ligados ao sistema de erosão em regiões semi-áridas (Bertrand e Bertrand, 2002).

Dp(IIIId) ou Geossistema dos baixos relevos residuais do Coxo com Argissolos e Latossolos: apresenta as mesmas características geomorfológicas e de dinâmica resistática natural do geossistema anterior. Localiza-se à margem esquerda do riacho da Volta e a leste do povoado do Coxo. Nivelada-se no compartimento topográfico mediano entre 390-420m, com orientação das vertentes no quadrante S e apresenta encostas com declives medianos abaixo de 6%. Seus patamares inferiores da encosta apresentam o desenvolvimento de associações de grupos indiferenciados de Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos e Planossolos Háplicos (PAb1 4), de acordo com Embrapa (1997, 1999).

Dp(IIIe) ou Geossistema dos baixos relevos residuais do Coxo com Planossolos: encontra-se nos patamares inferiores em rampa localizados à margem direita do Riacho da Volta, a oeste do povoado do Coxo. Tem praticamente as mesmas características geomorfológicas dos dois geossistemas anteriores, com compartimentação topográfica no nível 390-420m. Diferencia-se pela orientação das vertentes no quadrante NE e declividade relativamente maior, chegando a 8%. Apresenta cobertura pedológica de associações de Planossolos Háplicos e Nátricos, Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, e Neossolos

Litólicos (PLS 5B), conforme Embrapa (1997, 1999), que representam as condições resistáticas naturais da modelagem geomorfogenética em climas semi-áridos.

4.4.1.4 Geossistemas dos Glacis Amplos Denudados

Os pedimentos em forma de glacis amplos denudados se localizam na porção centro-sul da área de estudo, no compartimento topográfico mediano de 390-430m, com média amplitude interfluvial (1465m) e alta densidade de drenagem para a área (1,50 km/km²), mostrando relevo suave ondulado a ondulado com formação de padrão de drenagem paralelo. Apresenta litologia do Complexo Barro (Pb) com morfocronologia do Arqueano e Paleoproterozóico (tectogênese) ao Holoceno (morfogênese), de acordo com CPRM (2001). Dividiu-se tal modelado de denudação plana em dois geossistemas relacionados aos setores de vertente definidos no mapeamento geomorfológico (patamar superior aplainado e patamar inferior em rampa).

Dp(IVa) ou Geossistema dos altos glacis de Icaçara: relaciona-se com o patamar superior aplainado, localizado à margem direita do riacho da Volta e com referencial geográfico o povoado de Icaçara, ficando ao sul deste. Compartimenta-se no nível altimétrico mediano entre 410-430m, com orientação de vertentes no quadrante N e declividades dominantes de 0 a 6%. Suas condições morfográficas, fraca dissecação fluvial e conseqüente déficit hídrico são fatores para a dominância de Planossolos Háplicos e Nátricos em associação com Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos e Neossolos Litólicos (PLS 5B), de acordo com Embrapa (1997, 1999). Estes solos apresentam sua suscetibilidade natural à resistasia acelerada com a rarefação da cobertura vegetal em processos de degradação como o desmatamento, de acordo com Guerra (2001).

Dp(IVb) ou Geossistema dos baixos glacis de Icaçara: posiciona-se no patamar inferior em rampa à margem direita do riacho da Volta e tem como referencial geográfico o povoado de Icaçara, que se localiza no interior deste geossistema. Orientado no quadrante N, tal geossistema é compartimentado no nível mediano entre 390-410m, relativamente

mais baixo que o geossistema anterior, tem declives médios entre 0 e 8% e concentra a dissecação de canais fluviais no modelado dos glacis amplos denudados. Este geossistema apresenta associações de Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, Luvisolos Crômicos e Planossolos Hápticos e Nátricos (PAb1 10), conforme Embrapa (1997, 1999). Tais tipos de solos facilitam a atuação de processos erosivos em áreas com cobertura vegetal de fâcies degradadas de caatinga pela saturação de atividades antrópicas agropecuárias (em especial a sobrepastagem), devido à localização próxima do setor aluvial.

4.4.1.5 Geossistemas dos Glacis Amplos Ondulados

O modelado de glacis amplos ondulados (Dp) está localizado na porção S-SW da área de estudo, atinge as posições mais altas entre 430-470m e se relaciona apenas aos patamares aplainados superiores; não apresentando dissecação significativa retratada nas variáveis morfométricas com valores nulos. Geologicamente, este modelado é relacionado a depósitos elúvio-colúviais terço-quadernários (Tqd) compostos de sedimentos detríticos areno-silticos e areno-argilosos inconsolidados ou pouco consolidados, conforme CPRM (2001), com morfocronologia entre o Terciário (Tectogênese) ao Pleistoceno - Holoceno (Esculturação). Este modelado foi dividido em três geossistemas conforme as diferenças nas variáveis componentes dos mosaicos paisagísticos em questão.

Dp(Va) ou Geossistema dos glacis ondulados com Latossolos: localizado na parte SW da área de estudo, sendo representado por patamar aplainado superior orientado no sentido N, com altitudes mais altas entre 430-470m e baixos declives (0 a 3,5%). Este geossistema apresenta condições biostáticas de pedogênese, com cobertura pedológica de associação de Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos distróficos e eutróficos (LA2de), segundo Embrapa (1997, 1999) bastante desenvolvidos em seu perfil.

Dp(Vb) ou Geossistema dos glacis ondulados com Planossolos: também relacionado com o patamar aplainado superior, mas localizado na porção S da área de estudo. Como todos os geossistemas deste modelado, compartimenta-se topograficamente no nível de

430-470m e está orientado no sentido N, porém se diferencia pela declividade que pode atingir valores medianos variando de 0 a 6%. Sua cobertura pedológica é formada por associações de Planossolos Háplicos e Nátricos, Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos e Neossolos Litólicos (PLS 5B), conforme Embrapa (1997, 1999), com alta suscetibilidade a processos geomorfológicos devido à transição brusca entre horizontes em seus perfis.

Dp(Vc) ou Geossistema dos glaciais ondulados com Argissolos: localizado na porção SE da área de estudo, apresenta-se ainda como patamar aplainado superior compartimentado topograficamente no nível de 430-470m. Diferencia-se dos dois geossistemas anteriores pelas vertentes orientadas no sentido NE e pela maior declividade, que chega a 13%. Sua superfície está coberta pela associação de grupos indiferenciados de Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos e Planossolos (PAb1 4), segundo Embrapa (1997, 1999), com diferentes condições para o incremento de processos erosivos.

4.4.1.6 Geossistemas Aluviais dos Fundos de Vales

O modelado de agradação com planícies de inundação e terraços fluviais corresponde às áreas onde a dinâmica fluvial domina os processos morfológicos. De morfochronologia recente, entre o Pleistoceno e o Holoceno, relacionada aos Depósitos Quaternários (Qha) é formada por sedimentos de origem aluvial, como mapeado por CPRM (2001). Este modelado se localiza nos fundos de vales amplos e estreitos de acordo com Embrapa-Orstom (1986). Estas unidades geomorfológicas serviram de base para a subdivisão em dois geossistemas com baixas altitudes entre 380-400m, baixa declividade (0 a 3,5%) e mais alta densidade de drenagem da área de estudo (2,0 km/km²).

Da(VIa) ou Geossistema aluvial dos riachos da Volta, Quixaba e da Favela: localizado nas várzeas dos principais riachos da área (da Volta, Quixaba e da Favela), este geossistema cruza a área de estudo no sentido NW-SE (riacho da Volta) e no sentido NE-SE (riachos

Quixaba e da Favela). Representa os fundos de vales amplos, compartimentados topograficamente no nível mais baixo da área de estudo (380-400m) e com baixos declives (0 a 3,5%). Estes apresentam a formação de planícies de inundação ocupadas por rios intermitentes com interrupção do fluxo superficial na longa estação seca. Apresenta grande importância em relação aos recursos hídricos e uma tipologia relacionada aos processos de biostasia com a dominância da pedogênese e favorecimento do desenvolvimento da cobertura vegetal de fâcies em galeria como indicado por Carvalho (1986). São áreas preferenciais ao uso antrópico com atividades agropecuárias e concentração de povoados, apresentam dominância de Neossolos Flúvicos associados com Luvisolos Crômicos e Planossolos Nátricos (Al), segundo Embrapa (1997, 1999), de textura areno-argilosa com a acumulação de detritos grosseiros em setores de meandros (soleiras e depressões).

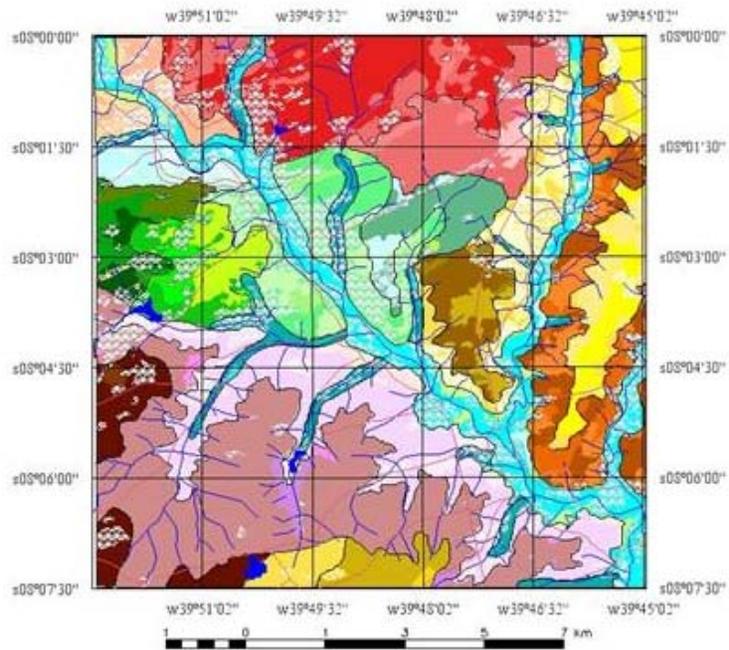
Da(VIb) ou Geossistema aluvial dos “riachos de caatinga”: geossistema relacionado aos fundos de vales estreitos, denominados popularmente de “riachos de caatinga”, que são áreas nos patamares e vertentes inferiores dos pedimentos que apresentam a formação de terraços fluviais gerados a partir das fortes enxurradas nos períodos chuvosos. Posiciona-se também no nível topográfico de 380-400m e com baixos de declives de 0 a 3,5%. Em tais áreas desenvolvem-se, como no geossistema anterior, Neossolos Flúvicos associados com Luvisolos Crômicos e Planossolos Nátricos (Al), como foi mapeado por Embrapa (1997, 1999). Este ambiente torna-se favorável para a presença de cobertura vegetal de fâcies em galeria com vegetais fotossintetizantes ao longo da estação seca, como indica Carvalho (1986).

4.4.2 Mapeamento das Geofâcies

As geofâcies mapeadas retratam a dinâmica dos geossistemas delimitados através da distinção entre sistemas de evolução global da paisagem, segundo Bertrand e Bertrand (2002), como foi apresentado nos dois capítulos anteriores. Tais sistemas exprimem áreas com quatro diferentes características em relação à dinâmica da paisagem: a de equilíbrio ou conservação das características naturais; a de recuperação de áreas antropizadas através da

sucessão secundária progressiva; a de degradação com rarefação ou regressão da cobertura vegetal; além de geofácies antrópicas de uso atual por práticas agropecuárias. Tais geofácies são descritas com ênfase nas características fitofisionômicas, florísticas e dinâmicas da cobertura vegetal e nos processos geomorfogenéticos da paisagem associados.

Ou seja, a delimitação das geofácies foi baseada nos critérios da dinâmica da cobertura vegetal e da antropização das unidades de paisagem em seus níveis hierárquicos mais elevados (modelados e geossistemas). Com isto, o principal elemento diferenciador das geofácies foi a cobertura vegetal e suas classes de mapeamento (critério qualitativo). Esta variável foi escolhida pela melhor interpretação do estado dinâmico das geofácies e do nível de antropização destas, possibilitando uma tipologia dos geossistemas. Em relação à legenda do mapeamento, às geofácies foram adicionados a denominação da dinâmica da paisagem, como pode ser visto no mapa apresentado na Figura 4.16. As áreas absolutas e relativas de cada unidade de mapeamento são apresentadas na Tabela 4.2.



Escala 1:100.000

FIGURA 4.16 - Mapa das geofácies da área de estudo.

TABELA 4.2 – Áreas das geofácies absolutas (km²), em relação aos geossistemas (%) e total em relação à área de estudo.

GEOSSISTEMA	CONSERVADO		RECUPERAÇÃO		DEGRADAÇÃO		CULTURA	
	%	KM ²						
Dt(Ia)	46,7	4,32	11,9	1,10	31,7	2,93	9,74	0,90
Dt(Ib)	36,7	4,91	25,16	3,36	27,41	3,67	10,48	1,40
Dt(Ic)	26,94	2,29	15,52	1,32	31,76	2,70	25,64	2,18
Dt(Id)	57,22	3,05	9,38	0,50	25,32	1,35	7,87	0,42
Dp(IIa)	57,8	10,66	17,95	3,31	2,33	0,43	21,58	3,98
Dp(IIb)	73,64	6,23	10,16	0,86	9,1	0,77	6,97	0,59
Dp(IIc)	42,78	1,72	4,72	0,19	15,92	0,64	36,06	1,45
Dp(IIIa)	20,5	0,98	31,3	1,50	28,4	1,36	19,2	0,92
Dp(IIIb)	26,2	1,90	10,7	0,78	39,9	2,89	22,9	1,66
Dp(IIIc)	29,2	3,51	7,2	0,87	22,8	2,75	40,5	4,87
Dp(III d)	70,4	3,81	1,6	0,09	19,2	1,04	8,5	0,46
Dp(III e)	19,8	0,60	23,4	0,71	13,2	0,40	42,9	1,30
Dp(IVa)	90,4	28,76	2,8	0,90	1,1	0,37	5,4	1,74
Dp(IVb)	70,7	13,68	6,6	1,29	6,8	1,33	15,8	3,06
Dp(Va)	77,1	4,32	3,3	0,19	0	0	19,2	1,08
Dp(Vb)	94,7	1,81	0	0	0	0	5,2	0,10
Dp(Vc)	88,9	2,49	6,4	0,18	0	0	4,6	0,13
Da(VIa)	35,2	7,27	6,8	1,42	9,7	2,00	48,4	9,98
Da(VIb)	42,2	3,34	8,3	0,66	4,9	0,39	42,4	3,36
TOTAL	62,68	119,6	10,18	19,4	13,62	26	20,43	39

4.4.2.1 Geofácies Conservadas

As geofácies conservadas são representadas por cobertura vegetal de fâcies de caatinga arbórea e arbórea-arbustiva e fâcies em galeria em estágios avançados de desenvolvimento sucessional com os três estratos verticais densamente ocupados e altura do dossel entre 8 e 15m. Estas geofácies representam a maior parte da área de estudo (119,6 km² ou 62,68%) o que mostra o bom estado de conservação da caatinga nesta área, confirmando dados de Carvalho (1986) e Maldonado (1999, 2005). Os geossistemas mais conservados, acima de 75%, foram os do modelado dos glaciais amplos ondulados como o Dp(Va) com 77,1%, o Dp(Vb) com 94,7% e o Dp(Vc) com 88,9%. Já os geossistemas menos conservados, em torno de 20%, foram os do modelado de relevos residuais aplainados como o Dp(IIIa) com 20,5% e o Dp(IIIe) com 19,8%.

Esta alta porcentagem de área conservada possibilita uma boa proteção do solo aos processos erosivos e conseqüentemente uma maior resistência aos processos de desertificação. Cabe, porém, a atenção nestas áreas à degradação de cunho antrópico por desmatamento (Figura 4.17) através de corte seletivo de espécies de maior porte e valor comercial, em especial pela presença de espécies oficialmente reconhecidas como ameaçadas de extinção como a aroeira e a braúna (Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Caatinga, 2004).



FIGURA 4.17 - Desmatamento por corte seletivo de aroeira na área de estudo.

4.4.2.2 Geofácies de Recuperação

As áreas que apresentaram dinâmica de sucessão secundária no intervalo de tempo estudado (20 anos) são caracterizadas por fâcies de caatinga arbórea-arbustiva e caatinga aclareirada, conforme o estágio de sucessão em que se encontra. Estas geofácies cobrem 19,4 km² ou 10,18% da área de estudo e estão diretamente relacionadas à ação antrópica pretérita com coberturas de caatinga aclareirada ou de cultura em 1983. Os geossistemas

com maior porcentagem em recuperação, acima de 25%, foram o Dt(Ib) com 25,16% e o Dp(IIIa) com 31,3%. Já o geossistema sem área em recuperação foi o Dp(Vb), quase totalmente preservado (94,7%) e com poucas áreas agrícolas (5,2%).

Tais geofácies representam áreas de recuperação que já foram usadas por atividades de plantio e pecuária, desmatamento, queimadas, produção de carvão vegetal e outras. De acordo com o grau da degradação anterior ou à continuação da ação antrópica em menor amplitude, estas áreas podem apresentar processos erosivos laminares ou em sulco que são fator da diminuição da resiliência e conseqüente aumento da vulnerabilidade a processos de desertificação destes ecossistemas em recuperação, como observado por Monteiro (1988).

4.4.2.3 Geofácies de Degradação

As geofácies de degradação correspondem a aproximadamente 26 km² ou 13,62% da área de estudo e englobam as áreas onde ocorreram processos de antropização da cobertura vegetal ou áreas que continuaram degradadas no intervalo de tempo estudado. Estas áreas apresentam fácies de caatinga aclareirada que se caracteriza pela menor cobertura de biomassa em relação ao solo. Os geossistemas com maior parte degradada, acima de 30%, foram o Dp(IIIb) com 39,9%, o Dt(Ic) com 31,76% e o Dt(Ia) com 31,7%. Todos os geossistemas do modelado dos glaciis amplos ondulados, Dp(Va, b e c), não apresentaram áreas degradadas.

Os processos de degradação da cobertura vegetal na área de estudo provêm do uso insustentável pela sociedade em relação aos recursos naturais com atividades agropecuárias levando em especial ao sobrepastejo (Figura 4.18), práticas de desmatamento como no corte seletivo (Figura 4.19) e na produção carvoeira (Figura 4.20), extração de material rochoso para a mineração e a construção de estradas (Figura 4.21); além de corte de lenha para construção de cercas.



FIGURA 4.18 - Uso antrópico em atividade agropecuária, é possível observar a presença de processos erosivos lineares (ravinamento).



FIGURA 4.19 - Atividade carvoeira com degradação da cobertura vegetal.



FIGURA 4.20 - Atividade de extração de rochas na área de estudo.



FIGURA 4.21 - Área degradada para construção de estrada na área de estudo.

Estas atividades antrópicas que degradam a cobertura vegetal desencadeiam processos muitas vezes irreversíveis de degradação do meio físico e biótico com a aceleração e intensificação da erosão dos solos, como indicado por Tricart e KiewietdeJonge (1992).

Elas também determinam a diminuição do poder de regeneração da caatinga, relacionada com a resiliência de tais ecossistemas como salienta Monteiro (1988), o que é influenciado diretamente pelas condições climáticas semi-áridas facilitadoras de tais processos erosivos, como também constataram Avenard e Michel (1985).

Esses processos de degradação estão relacionados ao intemperismo mecânico causado pela ação da água e do vento, sendo comandados pelo aumento do escoamento superficial, que por sua vez desencadeia o escoamento laminar que inicia o processo de erosão laminar com pequenas incisões, como destacado por Guerra (2003). Este se desenvolve chegando ao escoamento difuso, com formação de formas erosivas denominadas pedestais, ocasionadas pelas enxurradas, com característica de micro-relevo tabular (Figura 4.22). Por último, conforme Avenard e Michel (1985), este processo de erosão chega ao escoamento concentrado com ampliação dos processos anteriores e formação de processos erosivos em sulco ou lineares como ravinas e voçorocas, como pode ser visto na Figura 4.23.



FIGURA 4.22 - Processos erosivos relacionados ao escoamento difuso (denominados como pedestais).



FIGURA 4.23- Processo erosivo linear ou em sulco (voçoroca) na área de estudo.

4.4.2.4 Geofácies de Cultura

As geofácies de cultura equivalem a aproximadamente 39 km² ou 20,43% da área de estudo, sendo predominantemente caracterizadas por atividades agropecuárias tradicionais de subsistência. Os geossistemas mais utilizados em práticas de agricultura, acima de 40%, são o Da(VIa) com 48,4%, o Dp(IIIe) com 42,9%, o Da(VIb) com 42,4% e o Dp(IIIc) com 40,5%. Os geossistemas com menos atividades agrícolas, em torno de 5%, são o Dp(IVa) com 5,4%, o Dp (Vb) com 5,2% e o Dp(Vc) com 4,6%.

As principais atividades são a pecuária, especialmente a caprinocultura, e agriculturas de subsistência (milho, feijão, mandioca e outras) pouco mecanizadas e com poucos tratamentos culturais (irrigação, gradagem, aradura, etc.), relacionadas diretamente em seu ritmo anual de produção pelas condições climáticas da área. Estas atividades são diferenciadas conforme a área em que se situam, com as culturas nos espaços colinosos intermontanos sendo popularmente conhecidas como “culturas de sequeiro” (Figura 4.24) e nos fundos de

vale com características aluviais denominadas “culturas de vazante” (Figura 4.25), como observado por Ab’Sáber (2002).



FIGURA 4.24 - Geofácies de cultura da área de estudo localizada no geossistema aluvial Da(VIa).



FIGURA 4.25 - Geofácies de cultura da área de estudo no geossistema de platôs Dp(IIa).

4.4.3 Índice de Vulnerabilidade à Perda de Solo (IVPS)

A seguir são apresentados os resultados da integração das variáveis ambientais (clima, geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal e declividade) e discutidos os valores de vulnerabilidade de cada uma destas variáveis integradas, além do mapeamento final do IVPS. A geração do IVPS se relaciona com o terceiro e quarto objetivos específicos que se apresentam para a discussão dos processos de degradação ambiental através da detecção de mudanças e também na identificação de variáveis ambientais que sejam indicadoras ou significativas para a avaliação de processos de desertificação.

4.4.3.1 Clima

A variável climática foi calculada como única para toda a área de estudo devido a pequena densidade de estações meteorológicas para o uso como amostras para a interpolação e geração de grades numéricas. A característica física do clima mensurada que mais se relaciona com processos erosivos foi a intensidade pluviométrica. Esta variável climática representa a relação entre a pluviosidade total e a distribuição sazonal através da razão entre a precipitação média anual (no caso 750 mm) e a duração da estação chuvosa (3 meses na área de estudo), conforme metodologia de Crepani et al. (2001).

O valor obtido dessa razão ($750/3$) foi igual a 250 mm/mês que representa um valor de vulnerabilidade à perda de solo de 1,9 conforme (Crepani et al., 2001), em escala que pode ser vista na Tabela 4.3. Este valor expressa as condições climáticas semi-áridas em relação aos processos erosivos, com longos períodos de seca que propiciam processos de intemperismo mecânico conjugados com estações chuvosas que desencadeiam processos erosivos e transporte de sedimentos pela ação das enxurradas.

TABELA 4.3 - Escala de erodibilidade da chuva e valores de vulnerabilidade à perda de solo conforme Crepani et al. (2001).

Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade
< 50	1,0	200 - 225	1,7	375 - 400	2,4
50 - 75	1,1	225 - 250	1,8	400 - 425	2,5
75 - 100	1,2	250 - 275	1,9	425 - 450	2,6
100 - 125	1,3	275 - 300	2,0	450 - 475	2,7
125 - 150	1,4	300 - 325	2,1	475 - 500	2,8
150 - 175	1,5	325 - 350	2,2	500 - 525	2,9
175 - 200	1,6	350 - 375	2,3	> 525	3,0

4.4.3.2 Geologia

Os valores de vulnerabilidade à perda de solos atribuídos às rochas pela sua resistência aos processos erosivos foram determinados a partir das unidades litológicas caracterizadas e mapeadas por CPRM (2001). O mapa geológico devidamente ajustado para a área de estudo pode ser visto na Figura 4.26. Ele representa as condições geológicas da área com predomínio de rochas cristalinas e metamórficas de origem pré-cambriana (unidades Pb e Pgm4), permeadas por depósitos sedimentares mais recentes de idade terço-quadernária relacionados às condições aluviais e à relevos residuais (unidades Tqd e Qha).

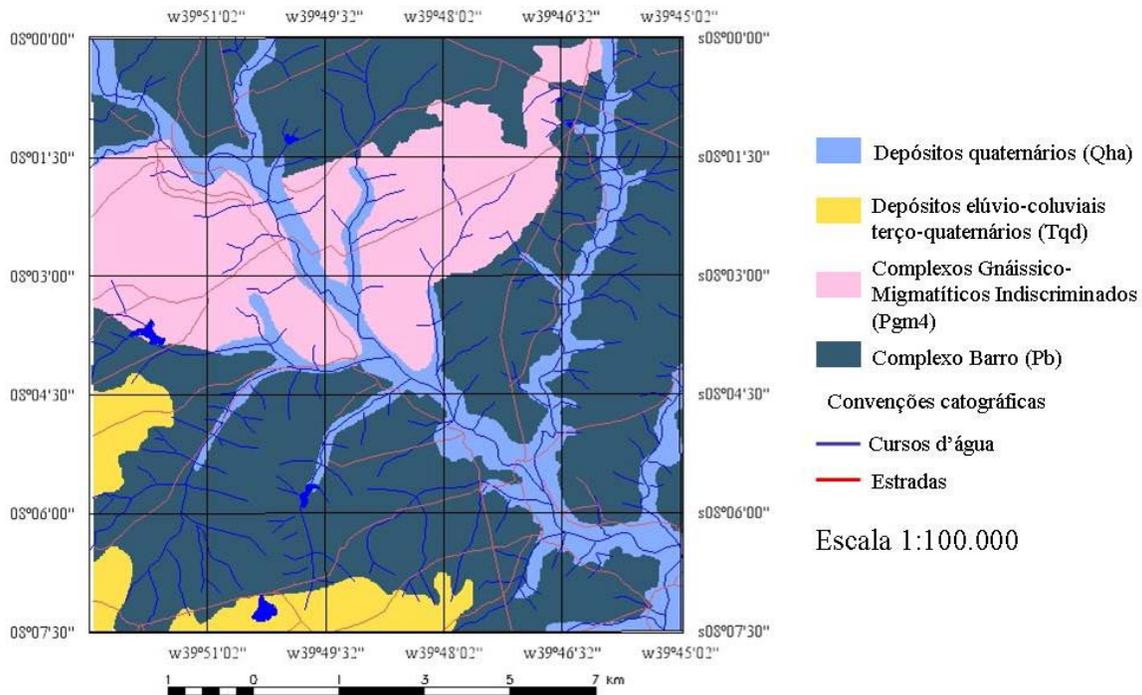


FIGURA 4.26 - Mapa geológico da área de estudo.

Os valores calculados para cada unidade litológica representaram a média aritmética entre os valores mencionados por Crepani et al. (2001) das principais rochas existentes nas associações litológicas, com resultados que podem ser vistos na Tabela 4.4. Tais valores refletem as condições de maior estabilidade em relação aos processos erosivos proporcionada pela base geológica cristalina e metamórfica da Província da Borborema, no caso as unidades do Complexo Barro (Pb) e dos Complexos Gnáissicos-Migmatíticos Indiscriminados (Pgm4), e a alta vulnerabilidade das áreas com depósitos sedimentares recentes inconsolidados ou pouco consolidados como Depósitos elúvio-colúviais terço-quaternários (Tqd) e os Depósitos Quaternários (Qha).

TABELA 4.4 - Valores de vulnerabilidade à perda de solo das unidades litológicas, adaptado de Crepani et al. (2001).

Unidade litológica	Valores de vulnerabilidade das rochas	Valor de vulnerabilidade final
Complexo Barro (Pb)	granada-biotita xistos (1.7) + estauroлита e cianita (2.0) + paragneisses (1.3) + calcários cristalinos (2.9) + sillimanita quartzitos (1.0) + muscovita xistos (1.7) + anfíbolitos (1.8)	1.75
Complexos Gnáissicos-Migmatíticos Indiscriminados (Pgm4)	biotita (1.7) + <i>augengnaisses</i> (1.3)	1.5
Depósitos elúvio-colúviais terço-quaternários (Tqd)	sedimentos detriticos arenosílticos e areno-argilosos inconsolidados ou pouco consolidados (3.0)	3.0
Depósitos Quaternários (Qha)	sedimentos terrígenos (3.0)	3.0

4.4.3.3 Pedologia

Os solos tiveram seu grau de vulnerabilidade calculado a partir da média ponderada entre os valores definidos por Crepani et al. (2001) para cada tipo de solo, em função da sua participação (foram considerados, em associações com 3 tipos de solo, os valores de 60%, 30% e 10% para a ponderação de cada um deles na média ponderada) em cada associação de solos mapeada pela Embrapa (1997) e ajustada nesta pesquisa conforme o mapeamento pedológico já apresentado na Figura 4.27. Os resultados finais exprimem o grau de vulnerabilidade de cada associação pedológica, das mais estáveis (dominadas por Latossolos), passando pelas intermediárias (dominadas em especial por Argissolos, Planossolos e Luvisolos), até as mais instáveis (dominadas por Neossolos Regolíticos e Flúvicos), conforme pode ser visto na Tabela 4.5.

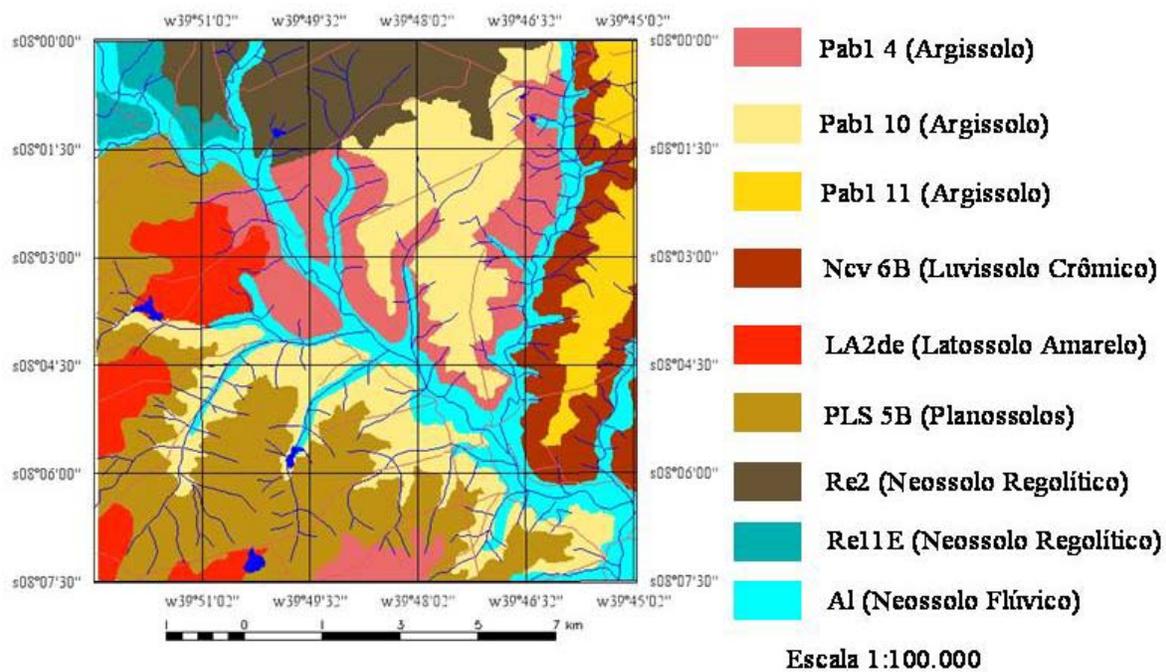


FIGURA 4.27- Mapa pedológico das associações de solos da área de estudo.

TABELA 4.5 - Valores de vulnerabilidade à perda de solos das associações de solo da área de estudo, adaptado de Crepani et al. (2001).

Associação de solos	Valor
PAb1 4 (Argissolo): Associação de Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo (2.0) + Grupo indiferenciado de Latossolos Amarelo e Vermelho-Amarelo (1.0) + Grupo indiferenciado de Planossolos Háplicos e Nátricos (2.0 + 3.0)	1.75
PAb1 10 (Argissolo): Associação de Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo pedregosos (2.0) + Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo distróficos e eutróficos (2.0) + Bruno não-cálcico (2.0) + Grupo indiferenciado de Planossolos Háplicos e Nátricos (2.0 + 3.0).	2.02
PAb1 11 (Argissolo): Associação de Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo pedregosos (2.0) + Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo distróficos e eutróficos (2.0) + Luvissole Crômico (2.0) + Neossolos Regolíticos (3.0)	2.05
PAb1 14 (Argissolo): Associação de Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo (2.0) + Grupo indiferenciado de Planossolos Háplicos e Nátricos (2.0 + 3.0) + Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo distróficos e eutróficos (2.0)	2.15
Ncv 6B (Luvissole): Associação de Luvissole Crômico (2.0) + Planossolo Nátrico (3.0) + Neossolos Regolíticos (3.0)	2.4
LA2de (Latossole): Associação de Latossole Amarelo (1.0) + Latossole Vermelho-Amarelo (1.0)	1
PLS 5B (Planossolo): Associação de Grupo indiferenciado de Planossolos Háplicos e Nátricos (2.0 + 3.0) + Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo cálcico (2.0) + Neossolos Regolíticos eutróficos (3.0)	2.4
Re2 (Neossolo regolítico): Associação de Neossolos Regolíticos (3.0)+ Grupo indiferenciado de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo (2.0)	2.6
Re11E (Neossolo regolítico): Associação de Neossolos Regolíticos (3.0) + Grupo indiferenciado de Planossolos Háplicos e Nátricos (2.0 + 3.0)	2.8
Al (Neossolo Flúvico): Associação de Neossolos Flúvicos (3.0) + Luvissoles Crômicos (2.0) + Planossolos Nátricos (3.0)	2.8

4.4.3.4 Geomorfologia

O grau de vulnerabilidade da variável geomorfológica foi calculado em relação aos modelados e aos segmentos de vertente, conforme seus aspectos morfométricos, como as amplitudes altimétrica e interfluvial. O valor do índice para cada aspecto morfométrico seguiu a valoração proposta por Crepani et al. (2001), como pode ser visto na Tabela 4.6. A amplitude altimétrica pequena está relacionada aos valores próximos da estabilidade, enquanto a amplitude interfluvial mais alta, em modelados e segmentos de vertentes mais dissecados, aos maiores graus de vulnerabilidade.

Os valores médios de vulnerabilidade à perda de solo indicam condições de estabilidade na maioria dos patamares aplainados superiores dos diferentes modelados e nos topos aplainados. Já os patamares em rampa inferiores e as vertentes côncavo-convexas sugeriram um nível intermediário em relação a sua morfodinâmica. Aos ambientes fluviais de fundo de vale foram dados valores que refletem a alta morfogênese de tais áreas de planícies de inundação e terraços fluviais, concentradores do grande escoamento superficial que ocorre durante os irregulares períodos chuvosos.

TABELA 4.6 - Valores de vulnerabilidade à perda de solo em relação aos modelados e segmentos de vertentes, adaptado de Crepani et al. (2001).

Morfografia (Tipologias do modelado)	Segmentos da vertente	Amplitude altimétrica (m)	Valor de vuln.	Dimensão interfluvial (m)	Valor de vuln.	Vuln. média
Tabuleiros (Dt 23)	Topos aplainados (Tp)	20	1	-	1	1
	Vertentes côncavo – convexas (Vc)	20	1	1220	2.6	1.8
Platôs ondulados baixos (Dp)	Patamares aplainados (Pa)	10	1	1772	2.3	1.65
	Patamares em rampa (Pr)	20	1	1772	2.3	1.65
Relevos residuais aplainados (Dp)	Patamares aplainados (Pa)	20	1	-	1	1
	Patamares em rampa (Pr)	20 30	1.1	1600	2.4	1.75
Glacis amplos denudados (Dp)	Patamares aplainados (Pa)	20	1	1465	2.5	1.75
	Patamares em rampa (Pr)	20	1	1465	2.5	1.75
Glacis amplos ondulados (Dp)	Patamares aplainados (Pa)	40	1.2	-	1	1.1
Fundos de vale (Da)	Fundos de vales amplos	20	-	-	-	3
	Fundos de vales estreitos	20	-	-	-	2.8

4.4.3.5 Cobertura Vegetal

Os graus de vulnerabilidade das classes de cobertura vegetal são indicados pela maior ou menor proteção ao solo que facilita ou não os processos erosivos. Tais valores, que podem ser vistos na Tabela 4.7, seguiram a adaptação para fácies de cobertura vegetal com características fitofisionômicas e dinâmicas do Bioma Caatinga, como proposto por Freitas et al. (2005). Assim, os valores refletiram condições de estabilidade na fácies em galeria; meios intermediários nas fácies de caatinga arbórea e arbórea-arbustiva; e meios com predomínio de processos morfogenéticos nas fácies antrópicas e de caatinga aclareirada.

TABELA 4.7 - Valores de vulnerabilidade à perda de solos das fácies de cobertura vegetal, adaptado de Crepani et al. (2001).

Fácies	Tipo	Valor
Galeria	Floresta galeria	1.2
	Complexo galeria	1.4
Antrópica	Cultura	2.9
	Solo exposto	3.0
Caatinga aclareirada	Caatinga aclareirada recuperação	2.5
	Caatinga aclareirada degradação	2.6
Caatinga arbórea-arbustiva	Caatinga arbórea-arbustiva conservada	2.0
	Caatinga arbórea-arbustiva recuperação	2.3
Caatinga arbórea	Caatinga arbórea conservada	1.8
	Caatinga arbórea recuperação	1.9

4.4.3.6 Declividade

A declividade foi calculada no IVPS como um campo contínuo, com base no produto gerado no MDE (Figura 4.28), e não relacionada com um valor médio para cada unidade geomorfológica. Acredita-se que assim a variável declividade é mais respeitada em seu valor com relação ao conjunto de dados integrados no IVPS. A área de estudo

não apresenta altos valores de declividade, com predomínio do intervalo de declives mais baixos (0 a 3,5%). Seguiu-se, na interpretação de valores, a escala de vulnerabilidade de Crepani et al. (2001) para a variável que pode ser vista na Tabela 4.8.

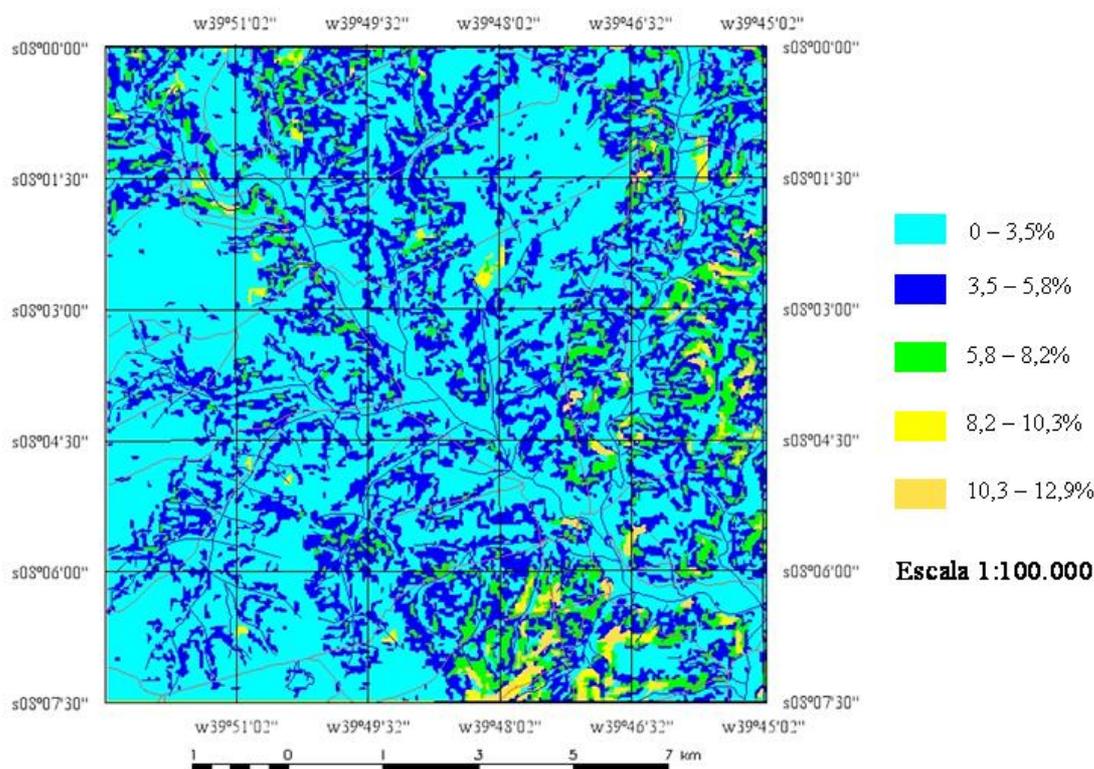


FIGURA 4.28 - Mapa de declividades da área de estudo gerado a partir de MDE.

TABELA 4.8 - Valores de vulnerabilidade à perda de solos para a variável declividade, conforme Crepani et al. (2001).

Declividade		Valor de vuln.	Declividade		Valor de vuln.	Declividade		Valor de vuln.
Graus	%		Graus	%		Graus	%	
<2	<3,5	1,0	9,9-1,2	17,4-19,8	1,7	19,1-20,4	34,6-37,2	2,4
2-3,3	3,5-5,8	1,1	11,2-12,5	19,8-22,2	1,8	20,4-21,7	37,2-39,8	2,5
3,3-4,6	5,8-8,2	1,2	12,5-13,8	22,2-24,5	1,9	21,7-23,0	39,8-42,4	2,6
4,6-5,9	8,2-10,3	1,3	13,8-15,2	24,5-27,2	2,0	23,0-24,4	42,4-45,3	2,7
5,9-7,3	10,3-12,9	1,4	15,2-16,5	27,2-29,6	2,1	24,4-25,7	45,3-48,1	2,8
7,3-8,6	12,9-15,1	1,5	16,5-17,8	29,6-32,1	2,2	25,7-27	48,1-50	2,9
8,6-9,9	15,1-17,4	1,6	17,8-19,1	32,1-34,6	2,3	>27	>50	3,0

4.4.3.7 Índice de Vulnerabilidade à Perda de Solo Final

A integração dos planos de informação, através da média aritmética dos graus de vulnerabilidades entre as variáveis físicas, ecológicas e antrópicas acima apresentadas, gerou os valores do IVPS final (**IVPS final = Clima + Geologia + Geomorfologia + Pedologia + Declividade + Cobertura vegetal / 6**). A grade numérica gerada foi devidamente fatiada em intervalos de classes de vulnerabilidade, de acordo com Crepani et al. (2001) e Medeiros e Câmara (2004), como pode ser visto na Tabela 4.9 e na Figura 4.29. A discussão dos resultados finais privilegiou os aspectos referentes ao uso do IVPS para o reconhecimento de áreas susceptíveis aos processos de desertificação, principalmente em relação às potencialidades e limitações do uso dessa metodologia.

TABELA 4.9 - Escala de valores de vulnerabilidade à perda de solos por classe de acordo com Crepani et al. (2001).

Classe de vulnerabilidade	Valor de vuln.
Vulnerável	3,0 – 2,7
Moderadamente Vulnerável	2,6 - 2,3
Medianamente Estável - Vulnerável	2,2 – 1,8
Moderadamente Estável	1,7 – 1,4
Estável	1,3 – 1,0

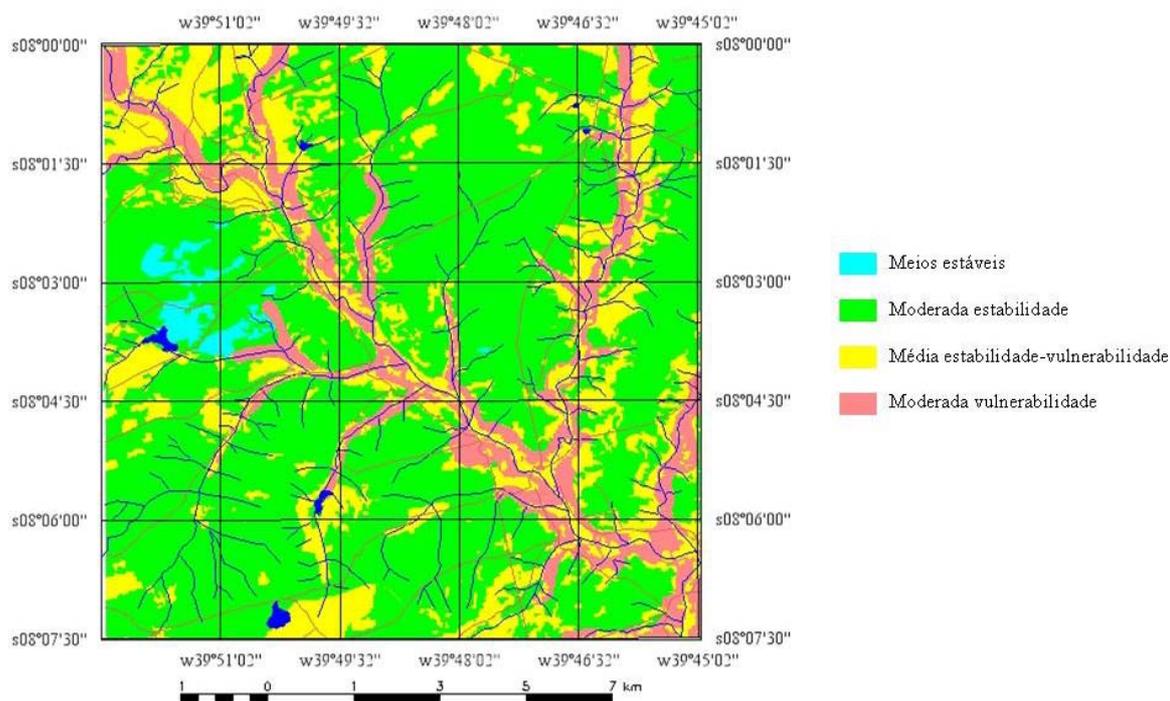


FIGURA 4.29 - Mapa final do Índice de Vulnerabilidade à Perda de Solo.

4.4.3.7.1 Meios de Moderada Vulnerabilidade

A combinação de fatores ambientais que propiciou maiores condições à perda de solo na área, com 21,541 km² ou 11,36% da área, foram os fundos de vales amplos e estreitos, com neossolos flúvicos e cobertura vegetal antropizada (culturas, solo exposto e caatinga aclareirada). Estes altos valores de moderada vulnerabilidade do IVPS retratam a potencialidade destas áreas aos processos erosivos devido ao escoamento concentrado durante as enxurradas típicas das estações chuvosas em climas semi-áridos que facilitam o intenso transporte de sedimentos e a respectiva acumulação sedimentar. Estas mesmas áreas aluviais, porém com cobertura vegetal de fâcies em galerias conservadas, apresentou condições de meios intermediários, o que mostra a proteção das comunidades vegetais aos processos erosivos.

4.4.3.7.2 Meios de Média Estabilidade-Vulnerabilidade

As áreas que foram classificadas como médias entre condições de estabilidade e vulnerabilidade ocupam uma área total de 43,724 km² (23,03% da área de estudo) e se

relacionaram especialmente aos modelados de denudação planar (Dp) e tabular (Dt), com diferentes solos como Neossolos Regolíticos, Planossolos, Argissolos e Luvisolos e fácies antropizadas de cobertura vegetal (culturas e caatinga aclareirada). Esta classificação reflete a erodibilidade destes tipos de solos que apresentam fortes gradientes entre horizontes (transições abruptas) e baixas taxas de infiltração que facilitam o escoamento superficial e o transporte de sedimentos finos (argilas e areias em especial) para os fundos de vales, como observado por Guerra e Botelho (2001). Como resultado destes processos erosivos a formação superficial da paisagem destas áreas apresenta o desenvolvimento de pavimentos rudáceos ou detríticos de finos a grosseiros com predominância de seixos e cascalho, como indicam Passos e Bigarella (2001).

4.4.3.7.3 Meios de Moderada Estabilidade

A classe de moderada estabilidade ocupa a maior parte (64,11%) da extensão da área de estudo, ou seja, 121,722 km². Localiza-se nas vertentes e nos patamares dos modelados de denudação planar e tabular, onde se desenvolveram diferentes tipos de solos como os da classe anterior, mas que apresentam cobertura vegetal de caatinga arbórea e arbórea-arbustiva em diferentes estágios de sucessão. Tal tipo de cobertura vegetal promove uma boa proteção da formação superficial pela redução do impacto das gotas de chuva (salpicamento ou *splash*) e conseqüente diminuição do escoamento superficial, conforme Guerra (2003). Cabe ressaltar que o uso destas fácies de cobertura vegetal pela pecuária extensiva acaba resultando na degradação de estratos inferiores (herbáceo e arbustivo) o que diminui a capacidade de proteção aos processos erosivos e condena a sucessão vegetal natural.

4.4.3.7.4 Meios Estáveis

A classe de meios estáveis ocupa menos de 2% (1,47%) da área de estudo, ou seja, 2,805 km². Ela se refere aos meios biostáticos com predomínio de processos pedogenéticos. Localmente ela está relacionada com as áreas de modelado de denudação planar, cobertos por Latossolos e por cobertura vegetal de fácies de caatinga arbórea em diferentes estágios de sucessão. O elemento de diferenciação fundamental

nestas áreas são os Latossolos. Estes solos são bastante desenvolvidos, com horizontes profundos e com pouca diferenciação nos teores de argila nos horizontes A e B, o que possibilita boa drenabilidade e permeabilidade, elementos que garantem eficiência na resistência à erosão como já foi observado por Guerra e Botelho (2001). As áreas de Latossolos com cobertura vegetal antropizada foram classificadas na classe de média estabilidade e vulnerabilidade pela menor proteção ao solo. Isto demonstra mais uma vez que a cobertura vegetal é o elemento fundamental para a estabilidade destes ambientes.

4.5 Análise Integrada dos Resultados com Relação ao Processo de Desertificação

Neste tópico é apresentada a análise integrada dos resultados vistos anteriormente, tendo como pano de fundo a problemática da desertificação. Assim, são vistos os resultados da análise de agrupamento das unidades geossistêmicas a partir dos dados de campo. Bem como, também é realizada uma análise de síntese dos resultados dos mapeamentos integrados (geossistemas, geofácies e índice de vulnerabilidade à perda de solo). Esta análise se relaciona diretamente com o objetivo específico quatro, que está relacionado com a identificação de variáveis ambientais indicadoras de processos de desertificação.

4.5.1 Análise de Agrupamento das Unidades Geossistêmicas

A análise estatística multivariada de agrupamento foi utilizada nos níveis de geossistemas e de geofácies para avaliar os dados florísticos coletados em campo como instrumento de diferenciação entre unidades de paisagem. Este tipo de análise já foi realizada em estudos envolvendo unidades de paisagem no Bioma Caatinga, tanto com diversas variáveis ambientais (Oliveira et al., 1987), quanto com dados de similaridade florística (Silva et al., 2003). Neste estudo, foi utilizada esta técnica em relação aos geossistemas para a identificação de padrões florísticos entre as geofácies conservadas de cada geossistema e nas geofácies para a classificação de estágios da dinâmica sucessional da vegetação a partir de suas características florísticas.

4.5.1.1 Análise de Agrupamento dos Geossistemas

A análise de agrupamento aplicada às geofácies conservadas dos geossistemas buscou a definição de padrões em tais unidades com base na similaridade florística. Esta análise partiu da premissa geral de que as unidades de paisagem são diretamente relacionadas com a distribuição espacial da vegetação de caatinga como defende Silva et al. (2003). Esta premissa se fundamenta em estudos a respeito da distribuição e abundância de plantas da caatinga, como aqueles realizados por Andrade-Lima (1981), Rodal (1992) e Sá et al. (1994). Tais autores sustentam a hipótese de que a distribuição fitogeográfica da caatinga está diretamente correlacionada com unidades de paisagem baseadas nas características geomorfológicas, pedológicas e climáticas, em diferentes escalas de análise.

O resultado do agrupamento das comunidades vegetais amostradas em campo, através de um dendrograma baseado na distância 1-Pearson r (Figura 4.30), não corroborou inteiramente a hipótese de predição dos geossistemas na distribuição fitogeográfica, o que pode ser atribuído à limitação do levantamento florístico realizado, bem como pela especificidade da ação antrópica local. Porém, alguns agrupamentos sugerem a existência de tal relação, apresentando alguns padrões que remetem a relações envolvendo fatores geomorfológicos, pedológicos e também da integração de variáveis de um mosaico paisagístico específico. Entre os agrupamentos que merecem atenção, pode-se destacar:

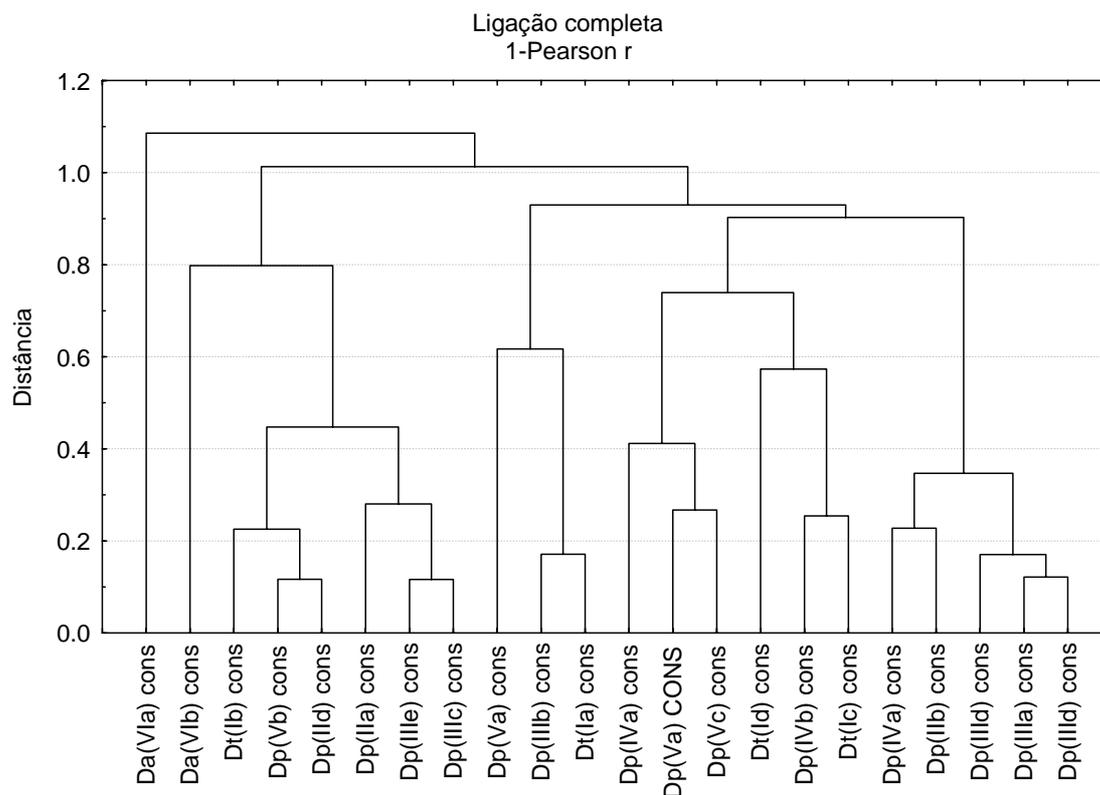


FIGURA 4.30 - Dendrograma representativo do agrupamento das geofácies conservadas dos geossistemas da área de estudo.

- A principal relação da integração de variáveis paisagísticas em nível de geossistemas observada a partir da análise de agrupamento de tais dados ocorreu em relação aos geossistemas aluviais. Primeiramente, cabe destacar o geossistema Da(VIa) que se diferenciou de todos os demais a partir do limite de significância de 1,0. O geossistema Da(VIb) também se diferenciou dos outros agrupamentos no limite de significância de 0,8. Esta diferenciação reflete a diversidade de condições paisagísticas nestes geossistemas de fundo de vale, com solos aluviais e cobertura vegetal de fâcies em galeria, em relação aos outros geossistemas elúvio-colúviais com fâcies de caatinga arbórea.
- Com limite de significância abaixo de 0,8, ocorreu a formação de três grandes grupos com os geossistemas de cunho elúvio-colúvial e de fâcies de caatinga arbórea, indicando a participação da geomorfologia e da cobertura vegetal na

distribuição florística. Dentro destes agrupamentos, podem ser vistas outras relações interessantes enfatizadas abaixo.

- Um agrupamento que sugere relação da distribuição de espécies com a geomorfologia se refere aos geossistemas do modelado de relevo residual aplainado que, num limite de significância baixo (0,2), apresentam-se agrupados em dois sub-grupos com apenas um geossistema não agrupado. O agrupamento de todos os geossistemas de tal modelado acontece com o limite de significância mais amplo de 0,7.
- Um agrupamento que reflete a relação dos modelados geomorfológicos está relacionado com o agrupamento de três geossistemas dos glaciais amplos denudados e ondulados, Dp(IVa), Dp(Va) e Dp(Vc) com limite de significância em torno de 0,4.
- Um agrupamento que sugere relação da pedologia com os dados florísticos amostrados é o existente entre os geossistemas Dp(IVb), Dt(Ic) e Dt(Id) no limite de significância de 0,6. Todos estes geossistemas apresentam associações de solos dominadas por Argissolos.

Como visto, a análise de agrupamento se mostrou uma ferramenta importante para a avaliação dos geossistemas em relação aos dados florísticos de campo. Apesar das limitações em relação ao levantamento florístico, tal análise possibilitou algumas correlações importantes que mostraram a participação de variáveis paisagísticas e de unidades de paisagem na distribuição fitogeográfica da área de estudo.

4.5.1.2 Análise de Agrupamento das Geofácies

A análise de agrupamento com todas as geofácies amostradas, que pode ser vista no dendrograma da Figura 4.31, apresentou boa relação entre os estágios da dinâmica de evolução global da paisagem, definidos por Bertrand e Bertrand (2002), com a similaridade florística entre as geofácies. A premissa geral levada em consideração para esta análise foi a de que a distribuição florística das geofácies responde diretamente ao

manutenção de espécies consideradas importantes pela população ou protegidas por leis ambientais.

Assim, o agrupamento das geofácies com diferentes fases em sua dinâmica (conservadas, em recuperação e degradadas) possibilitou a melhor interpretação do sistema de evolução global da paisagem. Os diferentes estágios em relação à sucessão vegetal puderam ser avaliados diretamente em tal análise de agrupamentos, o que é fundamental para o melhor conhecimento da dinâmica das paisagens semi-áridas.

4.5.2 Unidades Geossistêmicas, ZEE e Desertificação

A análise integrada em relação aos processos de desertificação dos mapeamentos dos geossistemas, das geofácies e do índice de vulnerabilidade à perda de solo (IVPS) é etapa fundamental para a avaliação final dos resultados em relação ao quarto objetivo específico. O fio condutor de tal integração foi o IVPS que teve o seu mapeamento final analisado em relação aos geossistemas e geofácies.

A desertificação, como salienta Ab'Sáber (1977), ocorre preferencialmente nas áreas de afloramentos rochosos e solos muito rasos praticamente desprovidos de cobertura vegetal (chamados como “lajedos”) e dos extensos pedimentos cobertos por depósitos rudáceos de material detrítico (denominadas de “malhadas”), sujeitos aos processos mecânicos dos climas semi-áridos. Estes ambientes de encostas, quando apresentam degradação antrópica com impactos na cobertura vegetal das caatingas arbóreas-arbustivas, têm sua resiliência diminuída o que desencadeia processos de desertificação como já afirmado por Monteiro (1988).

O uso do IVPS para correlação com fenômenos de desertificação apresenta grandes potencialidades, mas também requer alguns cuidados principalmente em relação à classificação dos ambientes fluviais. A principal potencialidade do IVPS na análise de processos de desertificação provém de seu caráter integrado na busca de uma interpretação ecodinâmica da paisagem calcada nos princípios bioresistáticos que possibilitam uma visão holística fundamental para o entendimento de fenômenos

ambientais complexos como a desertificação (Erhart, 1962 e 1966; Tricart, 1977; Crepani et al., 2001). Em relação aos geossistemas da área de estudo, pôde ser notado:

- Os meios classificados como de moderada vulnerabilidade correspondem ao modelado de agradação, os geossistemas Da(VIa) e Da(VIb). Ou seja, relaciona-se com as planícies de inundação (Apf) e terraços fluviais (Atf) em suas geofácies degradadas, em recuperação e antrópicas no caso dos valores de moderada vulnerabilidade. Como visto na análise de agrupamento, estes geossistemas foram um dos principais agrupamentos que se diferenciaram.
- Os meios de média estabilidade-vulnerabilidade se relacionam aos geossistemas dos modelados de tabuleiros (DtI), de platôs ondulados baixos (DpII), de relevos residuais aplainados (DpIII), de glaciais amplos denudados (DpIV) e ondulados (Dp(V), em suas geofácies de degradação, em casos de recuperação ainda inicial (caatinga aclareirada) e nas geofácies de cultura. Estas geofácies apresentam alta vulnerabilidade aos processos erosivos devido às suas condições paisagísticas, em especial a interação entre o clima semi-árido, classes de solos e degradação da cobertura vegetal e seu poder de proteção do solo. De acordo com a análise agrupamento, estes geossistemas estavam também bem diferenciados, com a formação de três grupos principais.
- Os meios de moderada estabilidade representam os mesmos geossistemas e modelados dos meios intermediários vistos acima, porém com as geofácies conservadas dos mesmos. Isto representa as condições de maior estabilidade em relação a tais processos de degradação do meio físico, relacionadas com a cobertura de caatinga arbórea e arbórea-arbustiva. Como visto anteriormente, esta classificação corrobora a análise de agrupamento em relação a tais geossistemas com cobertura vegetal de fâcies de caatinga e dos setores geomorfológicos de elúvio e colúvio.
- No caso dos meios estáveis, os únicos geossistemas que se relacionam com esta classe de estabilidade são o Dp(IIIb) e o Dp(Va) que apresentam condições

pedológicas de menor vulnerabilidade aos processos erosivos, no caso em suas geofácies conservadas. O grande diferencial destas geofácies é a conjugação de cobertura vegetal conservada com solos profundos e desenvolvidos, como os Latossolos. Não foi possível uma diferenciação clara com a análise de agrupamentos de tais geossistemas com os seus dados florísticos.

A característica a ser notada nesta aplicação particular da metodologia do ZEE é a sua capacidade de diferenciação entre meios estáveis (com cobertura de caatinga de maior porte e conservação) e meios com maior vulnerabilidade (de cobertura vegetal antropizada), o que ressalta o papel da cobertura vegetal na capacidade de resiliência dos sistemas ambientais. Como exemplos de limitações da metodologia do IVPS para a indicação de processos de desertificação estão as áreas aluviais que, apesar da alta vulnerabilidade à perda de solo pelo escoamento concentrado, representam na realidade uma unidade ambiental com pouca vulnerabilidade aos processos de desertificação pela presença de umidade ao longo de todo ano principalmente no lençol freático e solos com acumulação de detritos finos (Vasconcelos Sobrinho, 1983). Outra observação, realizada em campo, é em relação à vulnerabilidade da classe de associações de Argissolos que apresentaram a maior incidência de processos erosivos visíveis (ravinas e voçorocas) quando relacionadas com coberturas vegetais degradadas.

O processo de desertificação necessita de maior aprofundamento em relação à dinâmica de recuperação e degradação da cobertura vegetal, conforme Verdum (2004), que se reflete na dinâmica das unidades de paisagem e no IVPS. Procurou-se, com este trabalho, contribuir com o conhecimento da dinâmica das paisagens semi-áridas no Brasil e, conseqüentemente, com a avaliação do processo de desertificação através da integração de variáveis ambientais. Este estudo mostrou a necessidade de integração de variáveis físicas, ecológicas e sociais para a análise da desertificação, com ênfase no papel da dinâmica da cobertura vegetal em tal processo.

O processo de desertificação apresenta necessidade do uso de diversos indicadores socioambientais para a indicação de vulnerabilidades que só recentemente começaram a serem discutidos mais profundamente, como mostram Herrmann e Hutchinson (2005).

A vulnerabilidade aos processos erosivos é um destes indicadores que necessita de uma adaptação cuidadosa às condições ambientais do semi-árido brasileiro. Estes indicadores são classificados quanto à escala global, nacional e local e estão relacionadas a parâmetros físicos (erosão e salinização dos solos, qualidade da água, albedo da superfície, assoreamento, sedimentação e outros), ecológicos (cobertura vegetal, biomassa de caatinga, biodiversidade, espécies indicadoras, entre outros) e sócio-econômicos (uso do solo e da água, desmatamento, estrutura fundiária, fatores demográficos, escolaridade, saneamento e outros), conforme o Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Caatinga (2004).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Os resultados desta pesquisa reafirmam as potencialidades do uso de produtos e metodologias de Sensoriamento Remoto e de SIG em estudos integrados da paisagem, levando em consideração a escala de espaço e tempo abordada, o que corroborou a hipótese geral desta pesquisa. A utilização conjugada de tais geotecnologias possibilitou uma análise integrada e complexa da paisagem e suas variáveis físicas ecológicas e sociais, com a ajuda dos materiais cartográficos e bibliográficos que contemplam a área de estudo. Para o seu desenvolvimento foram definidos, na sua proposta inicial, um conjunto de objetivos geral e específicos cuja análise final se apresenta a seguir.

5.1.1 Primeiro Objetivo Específico: Mapeamentos Temáticos

Para atingir o primeiro objetivo específico, relacionado com a geração de mapeamentos temáticos, cabe destacar o uso das técnicas de MDE (Modelo Digital de Elevação), baseado em dados topográficos do radar SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e o processamento digital de imagem CBERS 2 – CCD (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres). Estas possibilitaram o mapeamento geomorfológico e da cobertura vegetal:

- O mapeamento geomorfológico foi fundamentado no MDE gerado por diferentes interpolações, convolução cúbica e krigagem, que apresentaram resultados semelhantes do ponto de vista do MDE, porém com destaque para a krigagem em relação aos seus produtos derivados. Este procedimento de refinamento escalar dos dados originais melhorou a interpretação das formas de relevo e processos geomorfológicos associados, principalmente devido à qualidade dos produtos derivados (declividade, orientação de vertentes, curvas de nível, etc.).

- Para a classificação da dinâmica da cobertura vegetal e uso do solo foram utilizadas operações de processamento digital de imagem, como o MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral) e a ACP (Análise de Componentes Principais). Estes procedimentos propiciaram o realce de diferentes fácies de cobertura vegetal, facilitando a interpretação visual da imagem e, conseqüentemente, o seu poder analítico. A escolha de método manual de detecção de mudanças, com a delimitação de classes baseada na interpretação visual da imagem de 2004, em comparação com o mapa da cobertura vegetal de 1983, mostrou-se uma técnica eficaz no reconhecimento da dinâmica da sucessão vegetal e da ocupação do solo.
- Além destes, também facilitaram o ajuste e refinamento de mapeamentos temáticos anteriormente existentes do meio físico (geologia e pedologia);

5.1.2 Segundo Objetivo Específico: Mapeamento Integrado da Paisagem

Já o segundo objetivo específico, que se relaciona com o mapeamento integrado da paisagem, foi realizado através do uso conjunto do sensoriamento remoto e geoprocessamento, empregando uma análise integrada de seus produtos. Estes produtos, no caso o MDE e a imagem CBERS 2 - CCD (além de seus produtos derivados) permitiram:

- a delimitação das unidades geossistêmicas através de processo semi-automático, com o cruzamento inicial automatizado e refinamento manual através interpretação visual de mosaicos paisagísticos (geossistemas);
- a sobreposição, por operações automatizadas de geoprocessamento, dos mapeamentos dos geossistemas e da dinâmica da cobertura vegetal, gerando o mapa de geofácies.

A abordagem integrada das variáveis físicas, ecológicas e sociais, que interagem dialeticamente na formação da paisagem, pode ser usada de forma promissora no planejamento ambiental e na gestão ambiental da área de estudo. Trata-se de um estudo

sintético extremamente importante para a tomada de decisões em relação às questões sócio-ambientais, como o processo de degradação ambiental, entre outras.

5.1.3 Terceiro Objetivo Específico: Detecção de Mudanças e Degradação Ambiental

O terceiro objetivo específico, preocupado em detectar mudanças indicadoras de processos de degradação ambiental, está relacionado com o mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal entre os anos de 1983 e 2004. Com este mapeamento foi possível o reconhecimento e a interpretação das principais mudanças da cobertura vegetal e do uso da terra de cada unidade de mapeamento. Estes resultados foram fundamentais tanto para a análise temática quanto para os mapeamentos integrados, como dos geossistemas, das geofácies e do índice de vulnerabilidade à perda de solo.

5.1.4 Quarto Objetivo Específico: Indicadores Ambientais e Desertificação

O quarto objetivo específico, relacionado com a identificação de variáveis ambientais para análise de processos de desertificação, envolveu a análise integrada dos resultados apoiada na abordagem geossistêmica e no modelo de avaliação de vulnerabilidade a processos erosivos do ZEE (Zoneamento Ecológico-Econômico). A geração do índice de vulnerabilidade à perda de solo para a identificação de áreas sujeitas a processos de desertificação em área do semi-árido brasileiro apresentou características metodológicas importantes, como a integração de variáveis ambientais a partir do referencial da teoria ecodinâmica. Seus resultados, ainda, retrataram relações importantes entre tais variáveis para a interpretação de processos de desertificação, como a diferenciação de áreas antropizadas. Porém, também mostraram uma subestimação dos processos mecânicos de intemperismo que são fundamentais, em conjunto com o uso antrópico da paisagem, no processo de desertificação em regiões de clima semi-árido.

A análise estatística multivariada de agrupamento também mostrou potencialidades na sua utilização na análise integrada dos resultados da abordagem geossistêmica, possibilitando a interpretação da distribuição espacial dos dados florísticos levantados em campo em relação às unidades geossistêmicas mapeadas com base em

geotecnologias. Esta técnica permitiu, ainda, uma melhor interpretação em relação à análise comparativa dos mapeamentos das unidades geossistêmicas e do índice de vulnerabilidade à perda de solo.

5.1.5 Objetivo Geral: Avaliação da Dinâmica

O objetivo geral deste trabalho, ou seja, a avaliação da dinâmica de variáveis ambientais indicadoras de processos de desertificação no período de 20 anos, foi abordado pelos diferentes produtos relacionados com os objetivos específicos. Assim, para a realização deste objetivo geral foram utilizados desde mapeamentos temáticos até a integração das variáveis estudadas no mapeamento dos geossistemas e do índice de vulnerabilidade à perda de solo, além da verificação em campo das condições paisagísticas da área de estudo. Os resultados mostraram um equilíbrio dinâmico em relação a tais condições paisagísticas, o que se expressa na dinâmica de uso e abandono das terras, sem um aumento incontrolado do uso do solo e a degradação generalizada da caatinga. Não foi possível a identificação exata de variáveis ambientais indicadoras dos processos de desertificação, porém a principal contribuição desta pesquisa se relaciona com o enfoque integrado e sintético da paisagem no qual vale mais o conhecimento da interação entre as variáveis físicas, ecológicas e sociais para a análise de tais processos de degradação ambiental em ambientes secos.

5.2 Recomendações

Uma característica a ser salientada deste trabalho é a conjugação de análises baseadas em sensores remotos com a identificação e reconhecimento de padrões da paisagem em campo, o que possibilita uma análise mais aprofundada da realidade estudada e dos seus processos e características, tanto em nível analítico quanto sintético. Em relação ao trabalho de campo, a recomendação fundamental é a ampliação do seu tempo, com a realização de expedições nas estações seca e chuvosa; além de infraestrutura para a coleta e medição de variáveis ambientais quantitativas que possibilitem a melhoria da análise estatística em estudos integrados da paisagem.

Em relação aos resultados de tal pesquisa, recomenda-se a utilização das técnicas de MDE e de processamento digital de imagens anteriormente mencionadas, porém com a análise comparativa em relação a outras técnicas aqui não utilizadas. Esta recomendação se deve às diferenças existentes entre cada paisagem que chegam às questões temporais como data de aquisição de imagens, entre outras considerações particulares para cada área de estudo.

A realização de um estudo hierárquico da paisagem através de uma abordagem multi-escala com o uso de produtos de sensoriamento remoto em resoluções espaciais e espectrais mais e menos detalhadas também é recomendada. Este tipo de abordagem possibilita o maior refinamento em relação à escala espacial e poderia ser realizado com a utilização de imagens de alta resolução espacial, como a SPOT-5 que foi adquirida durante o trabalho de campo mas não foi processada a tempo para esta pesquisa.

As potencialidades paisagísticas da área podem ser relacionadas com as unidades geossistêmicas mapeadas, com a identificação de suscetibilidades para o uso antrópico dos recursos naturais de forma sustentável. A associação das características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e de cobertura vegetal nestes mosaicos paisagísticos representa tais potencialidades e cuidados em relação ao uso sustentável da terra pela sociedade. Entre as atividades que podem ser recomendadas estão práticas de silvicultura em consórcio com usos agropecuários seguindo preceitos de manejo e conservação das características físicas, ecológicas e culturais da paisagem. Este tipo de análise referente às potencialidades e restrições ao uso antrópico das unidades de paisagem é um assunto que pode ser aprofundado em estudos posteriores.

5.3 Considerações Finais

Como visto, a abordagem holística aplicada aos estudos da paisagem permite uma visão mais sintética das interações entre as variáveis ambientais, sem perder de vista a abordagem analítica destas. Esta visão integrada se apresenta como instrumento fundamental para estudos e ações de planejamento e gestão ambientais que são essenciais para políticas públicas, visando o desenvolvimento sustentável, a melhoria da qualidade de vida e ambiental da natureza e sociedade representativas do Bioma

Caatinga. Tal bioma, assolado por sérias dificuldades relacionadas ao clima e às outras variáveis paisagísticas que se refletem diretamente nas condições de vida dos sertanejos, necessita de iniciativas que busquem uma transformação ampla da relação do homem com o meio natural em diferentes áreas, de forma conjugada, como educação básica e ambiental, projetos agroecológicos e de silvicultura para convivência com a seca, gestão dos recursos hídricos e tantos outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A. N.. Um conceito de Geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia**, IGEOG-USP, n.18, 1969, 19p.
- _____. Problemática da desertificação e da savanização no Brasil intertropical. **Geomorfologia**, IGEOG-USP, n.53, 1977, 19p.
- _____. Megageomorfologia do território brasileiro. In: Cunha, S. B.; Guerra, A. J. T. (orgs.). **Geomorfologia do Brasil**. 2.ed., Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2001, p.71-106.
- _____. Bases conceptuais e papel do conhecimento na previsão de impactos. In: Muller-Plantenberg, C.; Ab'Sáber, A. N. (Orgs.). **Previsão de impactos: o estudo de impacto ambiental no leste, oeste e sul. Experiências no Brasil, na Rússia e na Alemanha**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2002, p.27-49.
- _____. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo, Ateliê Editorial, 2003, 159 p.
- ANDERBERG, M. R. **Cluster analysis for applications**. New York: Academic Press, 1973, 326p.
- ANDRADE, J. B.; OLIVEIRA, T. S. Análise espaço-temporal do uso da terra em parte do semi-árido cearense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.28, p.393-401, 2004.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.64, n.3, p.234-253, 1998.
- ASNER, G. P.; WESSMAN, C. A.; BATESON, C. A.; PRIVETTE, J. L. Impact of tissue, canopy, and landscape factors on the hyperspectral reflectance variability of arid ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v.74, n.1, p.69-84, 2000.
- ASNER, G. P.; HEIDEBRECHT, K. B. Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon cover in arid regions: comparing multispectral and hyperspectral observations. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.19, p.3939-3958, 2002.
- AVENARD, J-M.; MICHEL, P. Aspects of present-day processes in the seasonally wet tropics of west Africa. In: Douglas, I.; Spencer, T. (Eds.). **Environmental change and tropical geomorphology**. London: George Allen & Unwin, 1985, p.75-92.
- BERTALANFFY, L. von. **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1975, 351p.
- BERTRAND, G. **Paisagem e geografia física global: esboço metodológico**. Caderno de Ciências da Terra, São Paulo, IGEOG-USP, n.13, 1972, 27p.
- _____. **Essai sur la systématique du paysage: les montagnes cantabriques centrales (Nord-ouest de l'Espagne)**. Tome I: Recherche d'une méthode. These pour le Doctorat d'Etat, Université de Toulouse-Le Mirail, 1974, 194p.
- BERTRAND, C; BERTRAND, G. **Une géographie traversière: l'environnement à travers territoires et temporalités**. Paris, Éditions Arguments, 2002, 311p.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. (INPE-8568- PRE/4312). Disponível em: <goto-/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.15.08>. Acesso em: 23 abr. 2004.

CAPRA, F. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo: Cultrix/Amana Key, 2000, 256p.

CARVALHO, V.C. **Structure et dynamique de la vegetation en milieu tropical semi-aride. La Caatinga de Quixaba (Pernambouc, Brésil) du terrain a l'analyse des données MSS/Landsat**. (INPE-4049-RPE/524). Tese (Doutorado) - Université de Toulouse-Le Mirail, São José dos Campos, INPE, 1986, 332p.

CARVALHO, V. C.; PINHEIRO JÚNIOR, O. J. **Mapeamento semidetalhado da cobertura vegetal das áreas de estudo, com o uso de sensoriamento remoto e sistema geográfico de informações**. (INPE-10476-PRP/241). Relatório técnico – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004, 356p.

CARVALHO, V. C.; FREITAS, M. W. D. Mapeamento das paisagens em nível de geossistema de três áreas representativas do bioma Caatinga. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005a p.2087-2099.

_____. Abordagem integrada para mapeamento da dinâmica da cobertura da terra em três áreas piloto do bioma Caatinga. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005b, p.1459-1468.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991, 147p.

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

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec/Edusp, 1979, 106p.

_____. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002, 236p.

CONSELHO NACIONAL DA RESERVA DA BIOSFERA DA CAATINGA (BRASIL). **Cenários para o Bioma Caatinga**. Recife: SECTMA, 2004. 283p.

COSTA, T. C. C. ; ACCIOLY, L. J. ; O.; OLIVEIRA, M. A. J. ; SILVA, F. H. B. Phytomass mapping of the “Seridó Caatinga” vegetation by the plant area and the normalized difference vegetation indices. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.707-715, 2002.

Companhia de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil). **Geologia e recursos naturais do Estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/Governo do Estado de Pernambuco/AD-DIPER, 2001, 215p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. ; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. (INPE-8454-RPQ/722). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001, 124p.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p.

CUNHA, S. B. ; GUERRA, A. J. T. Degradação ambiental In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (orgs.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000, p. 337-379.

DUQUE, J. G. **O Nordeste e as lavouras xerófilas**. Mossoró: Centro Gráfico Senado Federal, 1980. 332p.

EMBRAPA/ORSTOM. **Esboço morfopedológico da Região de Ouricuri – PE**. Petrolina, 1986.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Zoneamento agroecológico do Estado do Pernambuco - levantamento de reconhecimento de baixa intensidade de solos**. Recife, EMBRAPA, 1997.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 1999. 180 p.

ENVI. **ENVI user's guide**. Boulder, Sept. 2003, 1084p.

ERHART, H. Biostasia e resistasia: esboço de uma teoria que considera a pedogênese como um fenômeno geológico. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, n.9-10, p.23-25, 1962.

_____. A teoria bio-resistática e os problemas biogeográficos e paleobiológicos. **Notícia Geomorfológica**, n.11, p.51-58, 1966.

FEYERABEND, P. **Contra o método**: esboço de uma teoria anárquica da teoria do conhecimento. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1989, 488p.

FLORENZANO, T.G. **Avaliação de dados MSS-LANDSAT-4 para o mapeamento geomorfológico no semi-árido como suporte ao planejamento regional**: uma abordagem integrada (área-teste região de Juazeiro - BA). 197p. (INPE-3984 - TDL/236). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

_____. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002, 104 p.

FOURNIER, J. A natureza da Geografia e a Geografia da natureza. **Boletim Paulista de Geografia**, São Paulo: AGB-SP, n.78, p.97-120, 2001.

FREITAS, M. W. D. ; CUNHA, S. B. Fisiologia da paisagem e geossistemas: contribuições metodológicas integradoras do pensamento geográfico. **Geouerj-Revista do Departamento de Geografia**, Rio de Janeiro, UERJ, núm. esp., 2003, em cd-rom.

FREITAS, M. W. D. ; CARVALHO, V. C. ; CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. ; ESPIG, S. A. Aplicações de geoprocessamento no estudo dos geossistemas e Zoneamento Ecológico-Econômico de Serra das Almas (CE/PI). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005 p.2153-2160.

FROLOVA, M. Los orígenes de la ciencia del paisaje em la geografia rusa. **Scripta Nova: revista eletrônica de geografia e ciências**, v.5, n.102, 2001.

GOMES, A. R. **Análise da vulnerabilidade à perda de solo em ambiente semi-árido utilizando Sensoriamento Remoto e geoprocessamento: área-piloto de Parnamirim – PE.** 2000. 160p. (INPE-12295-TDI/987). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/iris@1913/2005/04.14.17.01>> Acesso em: 20 de maio de 2005.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p.149-209.

_____. Encostas e questão ambiental. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **A questão ambiental: diferentes abordagens.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003, p.191-218.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Erosão dos solos. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia do Brasil.** Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2001, p. 181-227.

HERRMANN, S. M.; HUTCHINSON, C. F. The changing contexts of the desertification debate. **Journal of Arid Environments**, n.63, p.538-555, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de geomorfologia.** Rio de Janeiro, 1995. 113 p.

_____. **Recursos naturais e meio ambiente: uma visão do Brasil.** 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997, 208p.

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

KAZMIERCZAK, M.L. **Índice de vegetação derivado do NOAA/AVHRR: análise da sazonalidade da cobertura vegetal em região de clima semi-árido (caatinga).** Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 1993. 106p.

KING, R. B. Land cover mapping principles: a return to interpretation fundamentals. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.18, p.3525-3545, 2002.

KOESTLER, A. **Jano.** São Paulo: Melhoramentos, 1981, 326p.

KUHN, T. **A estrutura das revoluções científicas.** São Paulo: Perspectiva, 1989, 257p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2002, 178p.

MALDONADO, F. D. **Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semi-árido brasileiro: Quixaba-PE.** 1999. 134p. (INPE-7180-TDI/680). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/deise/1999/10.20.17.19>> Acesso em 20 de maio de 2005.

_____. **Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semi-árido.** 2004. 311p. (INPE-12679-TDI/1007). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

- MALDONADO, F.D.; SANTOS, J.R.; CARVALHO, V.C. Land use dynamics in the semi-arid region of Brazil (Quixaba-PE): characterization by principal components analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.23, p.5005-5013, 2002.
- MATHER, P. M. **Computer of remotely-sensed images: an introduction** . Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 352p.
- MATURANA, H. R.; VARELA, F. J. **A árvore do conhecimento: as bases biológicas da compreensão humana**. São Paulo: Palas Athena, 2001, 288p.
- MEDEIROS, J. S.; CÂMARA, G. Geoprocessamento para projetos ambientais. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (ed.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. (INPE-8568- PRE/4312). Disponível em: <goto-/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.15.08>. Acesso em: 23 abr. 2004.
- MEGALE, J. (org.). **Max. Sorre**. São Paulo: Ática, 1985, 176p.
- MESCERJAKOV, J.P. Les Concepts de Morphostruture et de Morphosculture: un nouvel instrument de analysis geomorphologique. **Annales de Geographie**, v.77, n.423, p.539-552, 1968.
- MONTEIRO, C. A. F. On the 'desertification' in Northeast Brazil and man's role in this process. **Latin American Studies**, University of Tsukuba, n.9, p. 1-40, 1988.
- _____. William Morris Davis e a teoria geográfica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, UGB, v.2, n.1, p.1-20, 2001a.
- _____. **Geossistemas: a história de uma procura** . São Paulo: Contexto, 2001b, 125p.
- _____. Derivações antropogenéticas dos geossistemas terrestres no Brasil e alterações climáticas: perspectivas urbanas e agrárias ao problema da elaboração de modelos de avaliação. **Ra'ega**, Curitiba: Ed. UFPR, n.5, p.197-226, 2001c.
- MOREIRA, I. de C. Fractais. In: NUSSENZVEIG, H. M. (org.). **Complexidade e caos**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA, 1999, p.51-82.
- MORIN, E. **O método 1: a natureza da natureza**. Porto Alegre: Sulina, 2002, 479p.
- NUSSENZVEIG, H. M. Introdução à complexidade. In: Nussenzveig, H. M. (org.). **Complexidade e caos**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA, 1999, p.9-26.
- OKIN, G. S.; ROBERTS, D. A.; MURRAY, B.; OKIN, W. J. Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments. **Remote Sensing of Environment**, v.77, n.2, p.212-225, 2001.
- OLIVEIRA, J. G. B. ; FERNANDES, A. G.; BEZERRA, C. L. F.; NUNES, E. P.; LIMA, F. A. M.; MOTA, F. O. B.; QUESADO, H. L. C.; SOUZA, M. J. N. ; SALES, M. C. L.; LIMA, M. F.; OLIVEIRA, S. T. ; OLIVEIRA, V. P. V. **Zoneamento geo-ambiental da região de Canindé**. Relatório Técnico de Projeto de Pesquisa, Fortaleza, CNPq/PDCT-NE/UFC/SUEP/NECO, 1987, 110p.

OLIVEIRA, V. P. V.; PRINTZ, A.; SCHMIDT, S.; BEZERRA, C. L. F. Sustainable use of natural resources in the municipality of Tauá-Ceará. In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H; ARAÚJO, J. C. de (Eds.). **Global change and regional impacts: water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid northeast of Brazil**. Berlin, Springer, 2003, p.305-322.

PALMEIRA, A. F. **Técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicadas à gestão do território do Município de Paragominas (Estado do Pará)**. 2004. 270p. (INPE-12910-TDI/1012). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível na biblioteca digital URLib:

<<http://mtc-m17.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/jeferson/2004/04.02.16.08> > Acesso em 15 de maio de 2005.

PASSOS, E.; BIGARELLA, J. J. Superfícies de erosão. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p.107-141.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **A Nova Aliança**. Brasília: UNB, 1991.

PRINTZ, A.; LANG, R. The GIS-based model for sustainable development of land use (MOSDEL). In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H; ARAÚJO, J. C. (Eds.). **Global change and regional impacts: water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid northeast of Brazil**. Berlin: Springer, 2003, p.57-78.

RADAMBRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria-Geral. Folhas SC 24/25. **Aracaju/Recife: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1983. 744 p. (Levantamento de Recursos Naturais, 30).

RODRIGUES, C. A teoria geossistêmica e sua contribuição aos estudos geográficos e ambientais. **Revista do Departamento de Geografia**, Dept^o de Geografia/USP, n.14, p.69-77, 2001.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. São Paulo, Contexto, 2000, 84p.

ROUGERIE, G.; BEROUTCHACHVILI, N. **Géosystèmes et paysages: bilan et méthodes**. Paris: Armand Colin, 1991, 302p.

SÁ, I. B.; FOTIUS, G. A.; RICHÉ, G. R. Degradação ambiental e reabilitação natural no trópico no trópico semi-árido brasileiro. In: Conferência Nacional e Seminário Latinoamericano da Desertificação (CONSLAD), Fortaleza, 1994. **Anais...** 1 CD-ROM.

SALINERO, E. C. **Teledetcción ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio**. Barcelona: Editorial Ariel, 2002, 586p.

SHIMABUKURO, Y. E. **Shade images derived from linear mixing models of multispectral measurements of forested areas**. Phd. Thesis, Fort Collins, Colorado State University, 1987, 274p.

SILVA, F.B.R.; RICHÉ, G.R.; TONNEAU, J.P.; SOUZA NETO, N.C. de; BRITO, L.T.L.; CORREIA, R.C.; CAVALCANTI, A.C.; SILVA, F.H.B.B.; SILVA, A.B.; ARAÚJO FILHO, J.C.; LEITE, A.P. **Zoneamento Agroecológico do Nordeste:** diagnóstico e prognóstico. Recife: Embrapa Solos Escritório Regional de Pesquisa e Desenvolvimento Nordeste ERP/NE; Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2000. (Embrapa Solos, Documentos, 14). em CD ROM.

SILVA, R. A.; SANTOS, A. M. M.; TABARELLI, M. Riqueza e diversidade de plantas lenhosas em cinco unidades de paisagem da caatinga. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. C. M. (Eds.). **Ecologia e conservação da caatinga.** Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003, p.337-365.

SOARES, D. de M.; FREITAS, M. W. D. de; ARRAUT, E. M. Análise comparativa entre imagens dos sensores CCD/CBERS2 e ETM+ na classificação da cobertura vegetal no semi-árido brasileiro. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p.1091-109.

SOCHAVA, V. B. Por uma teoria de classificação de geossistemas de vida terrestre. **Biogeografia**, São Paulo: IGEO-USP, n.14, 1978, 25p.

SOUZA, C. L. Análise multitemporal da cobertura vegetal para detecção de mudanças no município de Cedro-PE. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003, p.2907-2912.

SOUZA, M. J. N.; OLIVEIRA, V. P. V. Physical and environmental context in the State of Ceará.). In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H; ARAÚJO, J. C. (Eds.). **Global change and regional impacts:** water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid northeast of Brazil. Berlin: Springer, 2003, p.95-104.

STATSOFT, INC. **STATISTICA (data analysis software system), version 6.** Tulsa, 2001, Disponível em: <www.statsoft.com>. Acesso em: 01 nov. 2005

Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE (Brasil). **Dados pluviométricos mensais do Nordeste:** Estado de Pernambuco. Recife, 1990. 363p. (SUDENE. Série Pluviometria, 6).

TEOTIA, H. S.; SILVA, I. F.; SANTOS, J. R.; VELOSO JÚNIOR, J. F.; GONÇALVES, J. L. G. Classificação da cobertura vegetal e capacidade de uso da terra na região do Cariri Velho (Paraíba) através de sensoriamento remoto e geoprocessamento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003, p.1969-1976.

TRICART, J. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro, SUPREN/IBGE, 1977, 91p.

_____. Evidence of Upper Pleistocene dry climates in northern South America. In: Douglas, I.; Spencer, T. (Eds.). **Environmental change and tropical geomorphology.** London, George Allen & Unwin, 1985, p.197-217.

TRICART, J.; KIEWIETDEJONGE, C. **Ecogeography and rural management:** a contribution to the International Geosphere-Biosphere Programme. London: Longman, 1992, 267p.

- VALENTIN, J. L. **Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000, 117p.
- VALERIANO, M. M. Programação do cálculo da declividade em SIG pelo método de vetores ortogonais. **Espaço e Geografia**, Brasília, v. 5, n. 1, p. 69-85, 2002.
- _____. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003.
- _____. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004, 72p. (INPE-10550-RPQ/756).
- VALERIANO, M. M.; GARCIA, G. The estimate of topographical variables for soil erosion modelling through geoprocessing. **International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing**, n. 33, p. 678-685, 2000.
- VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Goiânia, GO, v. 4, n. 1, p. 17-29, 2003.
- VASCONCELOS SOBRINHO, J. **As regiões naturais do Nordeste, o meio e a civilização**. Recife: Conselho de Desenvolvimento de Pernambuco, 1971, 571p.
- _____. **Processos de desertificação ocorrentes no Nordeste do Brasil: sua gênese e sua contenção**. Recife: SUDENE, 1983, 101p.
- VERDUM, R. Tratados internacionais e implicações locais: a desertificação. Niterói, **GEOgraphia – Revista da Pós-Graduação em Geografia da UFF**, UFF/EGG, v.6, n.11, p.79-88, 2004.
- ZONNEVELD, I. S. Reflection, absorption and transmission of light and infrared radiation through plant tissues. In: KÜCHLER, A. W.; ZONNEVELD, I. S. (eds.). **Vegetation mapping**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988, p.223-231.
- _____. The land unit: a fundamental concept in landscape ecology and its applications. **Landscape Ecology**, v.3, n. 2, p.67-86, 1989.
- WALTER, H. **Vegetação e zonas climáticas: tratado de ecologia global**. São Paulo: Editora Pedagógica Universitária, 1986, 327p.
- WIENER, N. **Cibernética e sociedade: o uso humano de seres humanos**. São Paulo: Cultrix, 1968, 190p.

APÊNDICE A

PROGRAMAS EM LEGAL

1 – PROGRAMA PARA PONDERAÇÃO DE PLANO DE INFORMAÇÃO (EX. VEGETAÇÃO)

```
{  
// Variaveis  
Tematico EntraPIveg ("Cobertura_Vegetal_2004");  
Numerico SaiPIvegpond ("Grades_vuln");  
Tabela TabVeg (Ponderacao);  
  
// Associacao variaveis  
EntraPIveg = Recupere (Nome = "vegetacao_2004_1");  
SaiPIvegpond = Novo (Nome = "MNT_veg", ResX = 20, ResY = 20, Escala = 40000,  
Min = 1, Max = 3);  
TabVeg = Novo ( CategoriaIni = "Cobertura_Vegetal_2004",  
"Solo_exposto" : 3.0,  
"cultura" : 2.9,  
"complexo_galeria" : 1.2,  
"floresta_galeria" : 1.4,  
"caa_arborea_conservada" : 1.8,  
"caa_arborea_recuperacao" : 1.9,  
"caa_arbo_arbus_conservada" : 2.0,  
"caa_arbo_arbus_recuperacao" : 2.3,  
"caa_aclareirada_recuperacao" : 2.5,  
"caa_aclareirada_degradacao" : 2.6);  
  
// Operacao  
SaiPIvegpond = Pondere (EntraPIveg, TabVeg);  
}
```

2 – PROGRAMA PARA OBTENÇÃO DE MÉDIA ARITMÉTICA A PARTIR DAS GRADES GERADAS PELA PONDERAÇÃO DOS SEIS PIS DO MEIO FÍSICO

```
{
//OBTENCAO DE PI MEDIA ARITMETICA

//DECLARACOES
Numerico EntraGeolpond ("Grades_vuln");
Numerico EntraGeomorfopond ("Grades_vuln");
Numerico EntraPedopond ("Grades_vuln");
Numerico EntraVegpond ("Grades_vuln");
Numerico EntraClimaPond ("Grades_vuln");
Numerico EntraDecPond ("Grades_vuln");
Numerico SaiMedia6pi ("Grades_vuln");

//RECUPERACAO DOS DADOS
EntraGeolpond = Recuperere (Nome= "MNT_geologia");
EntraGeomorfopond = Recuperere (Nome= "MNT_geomorfo");
EntraPedopond = Recuperere (Nome= "MNT_pedo");
EntraVegpond = Recuperere (Nome= "MNT_veg");
EntraClimaPond = Recuperere (Nome= "MNT_clima");
EntraDecPond = Recuperere (Nome= "MNT_dec");

//CRIACAO DO PI COM O RESULTADO
SaiMedia6pi = Novo (Nome="mapa_vulnerabilidade", ResX=20,
ResY=20, Escala=40000, Min=0, Max=3);
// CALCULO DA MEDIA ARITMETICA
SaiMedia6pi = (EntraGeolpond + EntraGeomorfopond + EntraPedopond +
EntraVegpond + EntraClimaPond + EntraDecPond)/6.0;
}
```

3 – PROGRAMA PARA FATIAMENTO

```
{
Numerico entramnt ("Grades_vuln");
Tematico fatiamnt ("Vulnerabilidade");
Tabela TabVuln (Fatiamento);

entramnt = Recuperar (Nome = "mapa_vulnerabilidade");

fatiamnt = Novo (Nome = "vuln_med", ResX=20, ResY=20, Escala=40000);

TBvuln = Novo (CategoriaFim = "Vulnerabilidade",
[1.00, 1.40] : "estaveis",
[1.4, 1.8] : "moderada_estabilidade",
[1.8, 2.2] : "media_est-vuln",
[2.2, 2.6] : "moderada_vulnerabilidade",
[2.6, 3.0] : "vulneraveis");

fatiamnt = Fatia (entramnt, TabVuln);
}
```

4 – PROGRAMA DE OPERAÇÃO BOOLEANA PARA GEOFÁCIES (EXEMPLO DT(Ia))

```
{
Tematico t0 ("Geofacies"), t1 ("Geossistemas"), t2 ("Cobertura_Vegetal_2004");
t1 = Recuperar (Nome="geossistemas");
t2 = Recuperar (Nome="vegetacao_2004_1");
t0 = Novo (Nome="geofacies1", ResX=20, ResY=20, Escala=40000);
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="caa_arborea_conservada" ?
Classe("Dt(Ia)_conservada") : t0;
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="caa_arbo_arbus_conservada" ?
Classe("Dt(Ia)_conservada") : t0;
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="complexo_galeria" ?
Classe("Dt(Ia)_conservada") : t0;
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="caa_arborea_recuperacao" ?
Classe("Dt(Ia)_recuperacao") : t0;
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="caa_arbo_arbus_recuperacao" ?
Classe("Dt(Ia)_recuperacao") : t0;
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="caa_aclareirada_recuperacao" ?
Classe("Dt(Ia)_recuperacao") : t0;
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="caa_aclareirada_degradacao" ?
Classe("Dt(Ia)_degradacao") : t0;
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="cultura" ?
Classe("Dt(Ia)_cultura") : t0;
t0 = t1.Classe == "Dt(Ia)" && t2.Classe=="Solo_exposto" ?
Classe("Dt(Ia)_cultura") : t0;
}
```


APÊNDICE B

LISTA DE ESPÉCIES COM NOMES VULGARES E CIENTÍFICOS AMOSTRADAS EM QUIXABA

PORTE	NOME POPULAR	NOME CIENTÍFICO	
Trepadeira	Alento		
	Anário de peba		
	Batata de teiú	<i>Jatropha isabelli</i>	
	Cipó de cururu		
	Cipó mole		
	Crista de galo		
	Cunhão de boi		
	Jericó	<i>Selaginella convoluta</i>	
	Jetirana	<i>Centrosema Sp.</i>	
	Laça vaqueiro		
	Tilansia	<i>Tilandsia Sp.</i>	
	Urtiga de boi		
	Herbáceo	Alfavaca	<i>Ocimum basillicum</i>
		Beija-flor	
Camará		<i>Lantana Sp.</i>	
Cansanção		<i>Jatropha gossypifolia</i>	
Cardo santo		<i>Argemone mexicana</i>	
Caroá		<i>Neoglaziovia variegata</i>	
Carqueja		<i>Calliandra depauperata</i>	
Coroa de frade		<i>Melacactus bahiensis</i>	
Erva de Santa Luzia			
Macambira		<i>Bromelia laciniosa</i>	
Macela		<i>Egletes viscosa</i>	
Malva branca		<i>Herissantia crispa</i>	
Moçambê		<i>Buchenavia Sp.</i>	
Mela peru			
Para-raio		<i>Nicotiana glauca</i>	
Quebra panela		<i>Alternanthera polygonoides</i>	
Quipá		<i>Opuntia inamoema</i>	
Salsa		<i>Petroselinum petroselinum</i>	
Arbustivo		Anilho	
		Budim	
	Candeia	<i>Sclerolobium paniculatum</i>	
	Canela de ema	<i>Vellozia Sp.</i>	
	Chumbinho	<i>Trema micrantha</i>	
	Esp. desconhecida		
	Guaxum		

Arbóreo

Jurema branca	<i>Pithecellobium viridiflorum</i>
Maniçoba braba	<i>Manihot pseudoglaziovii</i>
Marmeleiro preto	<i>Croton sonderianus</i>
Moleque duro	<i>Cordia leucocephala</i>
Mororó	<i>Bauhinia cheilantha</i>
Palmatória braba	<i>Opuntia palmadora</i>
Pinhão de lagoa	<i>Jatropha mutabilis</i>
Pinhão brabo	<i>Jatropha pohliana</i>
Quebra faca	<i>Acácia rhamnifolius</i>
Rabo de cachorro	<i>Commelina erecta</i>
Rabo de raposa	<i>Arrojadoa rhodantha</i>
Rama de boi	<i>Acácia piauhyensis</i>
Rompe gibão	<i>Bumelia sertorum</i>
Xique xique	<i>Pilosocereus gounelli, P. setosus</i>
Angico bravo	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>
Angico manso	<i>Piptadenia zenhieri</i>
Arapiraca	
Aroeira	<i>Myracrodruon urundeuva</i>
Bom nome	<i>Maytenus rigida</i>
Braúna	<i>Schinopsis brasiliensis</i>
Burra leiteira	<i>Euphorbia hyssopifolia</i>
Canafístula	<i>Cássia excelsa</i>
Cascudo ou 7 cascas	<i>Tabebuia spongiosa</i>
Catingueira	<i>Caesalpinia pyramidalis</i>
Esp. desconhecida	
Facheiro	<i>Pilosocereus glaucescens</i>
Favela de cachorro	<i>Cnidoscolus phyllacanthus</i>
Favela de tingui	<i>Mascagnia cartácea Loefg.</i>
Feijão brabo	<i>Capparis flexuosa</i>
Icó	
Imbiratanha	<i>Bombax coreacea</i>
Imburana de cambão	<i>Bursera leptophloeos</i>
Imburana de cheiro	<i>Amburana cearensis</i>
Imbuzeiro	<i>Spodias tuberosa</i>
Ingazeiro	<i>Inga Sp.</i>
Jaramataia	<i>Vitex gardneriana</i>
Juazeiro	<i>Zizyphus joazeiro</i>
Jurema branca esp. grande	<i>Mimosa Sp.</i>
Jurema preta	<i>Mimosa hostilis</i>
Jurema vermelha	<i>Mimosa arenosa</i>
Mandacaru	<i>Cereus jamacaru</i>
Muquem	<i>Pithecellobium multiflorum</i>
Pajeú	<i>Triplaris gardneriana</i>
Pau branco	<i>Fraunhoferia multiflora</i>
Pau de leite	<i>Himatanthus Sp.</i>

Pau ferro	<i>Caesalpinia ferrea</i>
Pau mocó	<i>Luetzelburgia auriculata</i>
Pau piranha	<i>Pisonia tomentosa</i>
Pereiro	<i>Aspidosperma pyrifolium</i>
Quixabeira	<i>Bumelia sartorum</i>
Sipaúba	<i>Thiloa glaucocarpa</i>

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.