



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

RICARDO DA CUNHA CORREIA LIMA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO
PARAIBANO UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS.**

Campina Grande, PB
2010

RICARDO DA CUNHA CORREIA LIMA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO
PARAIBANO UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento aos requisitos necessários para obtenção do título de mestre.

ORIENTADOR: José Fideles Filho

Campina Grande, PB
2010

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na sua forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL-UEPB

L372a Lima, Ricardo da Cunha Correia.
Avaliação do processo de desertificação no semiárido paraibano utilizando geotecnologias [manuscrito] / Ricardo da Cunha Correia Lima. – 2010.
63 f. : il. color.

Digitado
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental), Centro de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual da Paraíba, 2010.

“Orientação: Prof. Dr. José Fideles Filho, Departamento de Física”.

1. Análise Ambiental. 2. Semiárido. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Desertificação. 5. Geoprocessamento. I. Título.

22. ed. CDD 333.71

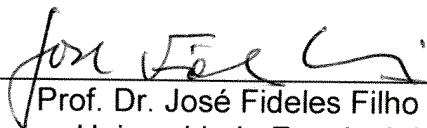
RICARDO DA CUNHA CORREIA LIMA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO
PARAIBANO UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS.**

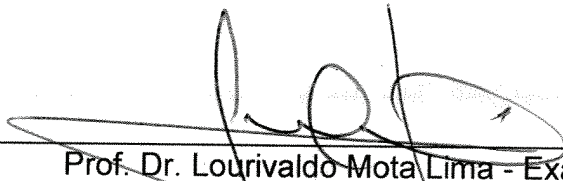
Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento aos requisitos necessários para obtenção do título de mestre.

Aprovada em 30 de julho de 2010

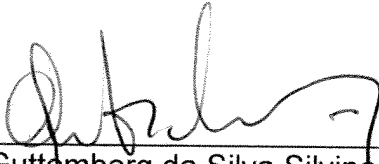
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Fideles Filho - Orientador
Universidade Estadual da Paraíba



Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima - Examinador
Universidade Estadual da Paraíba



Prof. Dr. Guttemberg da Silva Silvino - Examinador
Universidade Federal da Paraíba

Campina Grande, PB
2010

Dedicatória

Aos meus pais, pelo amor e dedicação com que cuidam de mim, até hoje. Aos meus filhos, para que, de alguma forma, sirva de exemplo para suas vidas.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos vão para todos que direta ou indiretamente colaboraram para que eu vencesse mais esse desafio em minha vida:

Ao orientador, Prof. Dr. José Fideles Filho, por seu apoio e direção nos momentos de indefinição do trabalho.

Ao meu amor maduro, Ana Paula Silva dos Santos, pelas insistentes palavras de incentivo para que eu seguisse adiante.

Ao Instituto Nacional do Semiárido, pelo reconhecimento da importância da pesquisa e pela autorização para essa capacitação em serviço.

Ao corpo docente do Programa de Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental, pela abertura de novos horizontes sobre a ciência e seu papel na preservação do meio ambiente.

Ao Prof. Dr. Marx Prestes Barbosa, da UFCG, pelas orientações iniciais e ensinamentos na disciplina de processamento digital de imagens.

Aos amigos Miguel José da Silva e Maria de Fátima Fernandes, da UFCG, pelo auxílio com o SPRING, com o reconhecimento de campo e com os assuntos relacionados à Pedologia.

Ao amigo Alexandre Magno Teodósio de Medeiros, da AESA, pelo fornecimento de importantes dados meteorológicos da região.

Aos colegas de turma do Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental, que, através de suas vitórias, me incentivaram também a alcançar o mesmo objetivo.

À Prof. Dra. Beatriz Susana Ovruski de Ceballos, pelas palavras duras e sinceras, mas amigas, de provocação e estímulo.

Aos professores e professoras da banca examinadora, pelas observações e orientações sobre a versão final dessa dissertação.

RESUMO

O presente estudo avaliou o processo de desertificação no município de Juazeirinho, localizado numa das áreas susceptíveis a desertificação no estado da Paraíba: a microrregião do Seridó Oriental. O indicador Cobertura Vegetal foi utilizado para estimar o avanço desse processo. Para tanto, imagens do satélite de sensoriamento remoto LANDSAT 5 TM dos anos de 1990 e 2005 foram processadas para obtenção do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) para os dois momentos citados. Com o apoio dos dados de classes de solo, relevo e precipitação, foi utilizado um sistema de informações geográficas (SIG) para classificação dos diferentes estados da cobertura vegetal. Foram empregadas técnicas de segmentação por crescimento de regiões da imagem IVDN e de classificação supervisionada por regiões, através do classificador Bhattacharya, para delimitar e quantificar as áreas com maior grau de degradação da cobertura vegetal e estimar a taxa de avanço das atividades antrópicas sobre a vegetação nativa. Constatou-se que, no período de 15 anos, o município perdeu uma área de vegetação densa e semi-densa, amplamente associada à Caatinga arbórea-arbustiva preservada ou em avançado estágio de sucessão natural, equivalente a 35,2 km², uma redução de 17,4% da área existente em 1990, o que corresponde a uma taxa de desmatamento de 2,3 km² ao ano. Em 2005, essas duas classes de vegetação somavam 168,8 km², ou seja, apenas 35,6% da área total do município permanecia coberta por vegetação nativa. Na direção oposta, as áreas ocupadas por vegetação rala e solos expostos, associadas à Caatinga degradada, agricultura e campos de pastagem experimentaram um crescimento de 29,9 km², um ritmo de avanço de 2,0 km² por ano, elevando a área degradada para 295,4 km², ou 63% da área total do município. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto e SIG permitiu avaliar o estágio do processo de desertificação na região através do mapeamento e monitoramento da cobertura vegetal.

Palavras-chave: Desertificação. Cobertura Vegetal. IVDN. Sensoriamento Remoto. SIG.

ABSTRACT

The following study evaluated the desertification process in the municipality of Juazeirinho, located in one of the areas susceptible to desertification in the state of Paraíba: the micro-region of Seridó Oriental. The Vegetation Covered Area indicator was used to estimate the evolution of this process. For that, images from remote sensing satellite Landsat 5 TM in 1990 and 2005 were processed in order to obtain the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the two time points mentioned. Supported by data from soil types, topography and rainfall, a Geographic Information System (GIS) was used to classify the different states of vegetation cover. Segmentation techniques by on growing region were employed on NDVI image, followed by supervised classification, using the regions Bhattacharya classifier, were used to define and quantify the areas with the highest degree of degradation of vegetation cover and estimate the rate of progress of human activities on native vegetation. It was found that, in 15 years, the municipality lost an area of dense and semi-dense vegetation, widely associated to forested-shrubby Caatinga, equivalent to 35.2 km², a reduction of 17.4% of the existing area in 1990, which corresponds to a deforestation rate of 2.3 km² per year. In 2005, both classes of vegetation totalized 168.8 km², that is, only 35.6% of total area of municipality remained covered by native vegetation. In the opposite direction, the areas occupied by sparse vegetation and exposed soils associated to the Caatinga degraded, agricultural and grazing fields have experienced a growth of 29.9 km², a rate of advance of 2.0 km² per year, growing the degraded area up to 295.4 km², or 63% of total area of municipality. The use of remote sensing techniques and GIS allowed to assess the stage of the process of desertification in the region by mapping and monitoring vegetation cover.

Key words: Desertification. Vegetation Cover. NDVI. Remote Sensing. GIS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro eletromagnético, evidenciando a faixa do espectro solar.	8
Figura 2 – Assinatura espectral dos alvos e sua relação com as bandas dos sensores dos satélites LANDSAT 5 e CBERS 2B.	10
Figura 3 – Estrutura de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).	13
Figura 4 – Localização do município de Juazeirinho – PB.	19
Figura 5 – Altimetria da área de estudo.	21
Figura 6 – Principais classes de solos ocorrentes na área de estudo.	22
Figura 7 – Fluxograma simplificado das etapas da metodologia.	26
Figura 8 – Imagens LANDSAT5 TM em composição RGB543 e respectivas imagens IVDN: (a) 1990, (b) 2005.	35
Figura 9 – Segmentação da imagem IVDN por crescimento de regiões: (a) 1990, (b) 2005.	36
Figura 10 – Classificação da cobertura vegetal por regiões, através do classificador Bhattacharya: (a) 1990, (b) 2005.	37
Figura 11 – Visualização 3D da (a) altimetria e da classificação da cobertura vegetal de (b) 1990 e (c) 2005 para o município de Juazeirinho.	38
Figura 12 – Caminhamento efetuado com auxílio de GPS, apresentado sobre o mapeamento da cobertura vegetal para 2005.	39
Figura 13 – Cultivo de cajueiro e palma na porção de neossolos regolíticos eutróficos (ponto P5).	41
Figura 14 – Caatinga rala em porção de neossolos litólicos eutróficos (ponto P12).	42
Figura 15 – Pastagem em porção de planossolo nátrico sálico (ponto P18).	43
Figura 16 – Caatinga semi-densa em porção de planossolo nátrico sálico (ponto P19).	44
Figura 17 – Mapa temático de Cobertura Vegetal para o município de Juazeirinho – PB, em 1990.	45
Figura 18 – Mapa temático de Cobertura Vegetal para o município de Juazeirinho – PB, em 2005.	46
Figura 19 – Representação das áreas ocupadas por cada classe de cobertura vegetal.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo dos Indicadores de Situação	4
Tabela 2. Resumo dos Indicadores de Desertificação	5
Tabela 3. Principais características dos satélites LANDSAT-5/7 e CBERS-2B	9
Tabela 4. Denominação das faixas espectrais do sensor TM do LANDSAT-5.	9
Tabela 5. Pluviometria mensal do município de Juazeirinho para os anos de 1990 e 2005.....	27
Tabela 6. Intervalos de variação do IVDN para fins de classificação das imagens...	32
Tabela 7. Anotações da inspeção de campo realizada em 04/12/2009 para validação dos resultados.	40
Tabela 8. Extensão das áreas ocupadas por cada classe de cobertura vegetal.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba

ASD - Áreas Suscetíveis à Desertificação

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETM – Mapeador Temático Aprimorado

GPS – Global Positioning System

IAP - Índice de Área de Planta

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INSA – Instituto Nacional do Semiárido

IVDN - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

MSS – Sensor Multiespectral

NASA – National Aeronautics and Space Administration

ONU - Organização das Nações Unidas

PAN-BRASIL - Plano Nacional de Combate à Desertificação

PST - Peso Seco Total

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas

SRTM - Shuttle Radar Topographic Mission

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

TM – Mapeador Temático

UNCCD - Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação

UTM - Universo Transverso de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Introdução.....	1
1.2	Objetivo.....	2
1.3	Objetivos Específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Desertificação.....	3
2.2	O Sensoriamento Remoto	7
2.3	Os Sistemas de Informações Geográficas.....	12
2.3.1	Interface com o usuário	13
2.3.2	Entrada e integração de dados.....	13
2.3.3	Funções de consulta e análise espacial	14
2.3.4	Visualização e plotagem.....	15
2.3.5	Armazenamento e recuperação de dados	15
2.4	Estudos sobre desertificação.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1	Caracterização da área de estudo	19
3.2	Materiais	24
3.3	Métodos	25
3.3.1	Definição do Modelo de Dados no SPRING	26
3.3.2	Definição da área do projeto e sistema de coordenadas.....	27
3.3.3	Levantamento de dados pluviométricos	27
3.3.4	Levantamento, seleção e conversão das imagens LANDSAT5-TM.....	28
3.3.5	Levantamento e importação dos dados cartográficos.....	28
3.3.6	Registro das imagens	29
3.3.7	Cálculo do IVDN.....	29
3.3.8	Segmentação das imagens.....	30
3.3.9	Classificação das imagens.....	31
3.3.10	Reconhecimento de campo	32
3.3.11	Elaboração dos Mapas Temáticos	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1	IVDN.....	34
4.2	Imagens segmentadas	36
4.3	Imagens classificadas	37
4.4	Mapas Temáticos.....	44
5	CONCLUSÕES.....	50
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A região semiárida brasileira, definida oficialmente pelo Decreto nº 11.701 de 10/03/05, abrange parte dos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais, totalizando uma área de 969.589,4 km², e abrigando uma população de aproximadamente 20,8 milhões de habitantes (BRASIL, 2005).

Em decorrência do baixo nível de desenvolvimento humano e das dificuldades naturais de clima, solo e recursos hídricos, a região vem sendo alvo de políticas públicas voltadas à melhoria das condições de saúde, educação, moradia, emprego e renda, agora com foco na sustentabilidade da qualidade de vida das populações e do meio ambiente. Dentre as iniciativas com foco no desenvolvimento sustentável da região, está o Plano Nacional de Combate à Desertificação (PAN-BRASIL, 2004), do Ministério do Meio Ambiente.

Segundo o PAN-Brasil (2004), a desertificação é a face mais visível da exploração irracional dos recursos naturais na região, caracterizada pela degradação do solo e dos recursos hídricos, pelo desmatamento e pela redução da biodiversidade. Tal fenômeno contribui diretamente para o empobrecimento das comunidades, especialmente na zona rural, na medida em que reduz ou mesmo elimina a capacidade produtiva das terras e coloca em risco a sustentabilidade do desenvolvimento e o futuro das próximas gerações.

Ainda de acordo com o PAN-Brasil (2004), o plano foi elaborado com foco no desenvolvimento sustentável nas Áreas Suscetíveis à Desertificação – ASD, para estimular e promover mudanças no modelo de desenvolvimento em curso nessas áreas. O combate à pobreza e às desigualdades são os elementos norteadores dessa mudança, aliados à recuperação, preservação e conservação dos recursos naturais. Dentre seus objetivos, o plano buscará aprimorar o conhecimento da situação dos processos de desertificação e de ocorrência de secas no Brasil, apoiando ações de delimitação e caracterização das áreas em processo de

desertificação através da avaliação da cobertura vegetal utilizando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

Neste sentido, o presente estudo poderá oferecer um contributo ao conhecimento do processo de desertificação numa das ASD do estado da Paraíba: a Microrregião do Seridó Oriental. O município de Juazeirinho foi escolhido por ainda não dispor de estudos dessa natureza e estar situado numa região com forte presença de indústrias de cerâmica e de cal, além de panificadoras, que constituem o grupo de grandes usuários que têm a lenha nativa como matriz energética em seus processos produtivos.

1.2 Objetivo

Avaliar o processo de desertificação no município de Juazeirinho - PB, através do indicador cobertura vegetal, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG).

1.3 Objetivos Específicos

- Classificar as áreas do município de Juazeirinho por grau de degradação da cobertura vegetal nativa, em dois momentos distintos (1990 e 2005), utilizando SIG para processamento digital de imagens de satélite de observação da Terra.
- Efetuar análise comparativa entre os dois momentos para identificar o grau de evolução do processo de degradação da vegetação nativa.
- Relacionar o processo de degradação da vegetação nativa às atividades econômicas da sociedade local e identificar as possíveis causas da alteração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desertificação

Segundo a UNCCD - Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (NAÇÕES UNIDAS, 1997), desertificação é definida como um processo que culmina com a degradação das terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, como resultado da ação de diversos fatores, com destaque para as variações climáticas e para as atividades humanas. Neste contexto, a degradação das terras, por sua vez, é compreendida como a redução ou perda da produtividade biológica ou econômica e da complexidade das terras agrícolas, das pastagens naturais, das florestas e matas nativas. As principais causas apontadas são os sistemas de utilização da terra pelo homem que terminam por promover a erosão e a deterioração das propriedades físicas, químicas, biológicas ou econômicas do solo, a destruição da vegetação por períodos prolongados, a degradação dos recursos hídricos e a redução da biodiversidade.

De acordo com o PAN-Brasil (2004), a degradação das terras e a conseqüente desertificação constituem graves problemas que ocorrem sobre um terço da superfície da terra, onde vivem cerca de 2,6 bilhões de pessoas (42% da população total). Esses problemas são particularmente agudos na região subsaariana, onde residem mais de 200 milhões de pessoas. Ali, cerca de 20% a 50% das terras estão degradadas. Tal degradação é também severa na Ásia e na América Latina, assim como em outras regiões do globo. Na América Latina, mais de 516 milhões de hectares são afetados pela desertificação. Como resultado desse processo, estima-se a perda de 24 bilhões de toneladas por ano da camada arável do solo, o que afeta negativamente a produção agrícola e o desenvolvimento sustentável.

De maneira geral, pode-se afirmar que a área susceptível à ocorrência da desertificação está razoavelmente bem definida como aquela na qual a razão entre precipitação e evapotranspiração potencial anuais fica abaixo de 0,65. No Brasil, essas áreas correspondem às zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas e estão

restritas à região Nordeste e a uma pequena parte do norte de Minas Gerais (SAMPAIO; ARAÚJO; SAMPAIO, 2006).

Para caracterizar o processo de desertificação inúmeros trabalhos foram realizados na tentativa de definir indicadores e a maneira de medi-los. O pioneiro na sistematização de critérios foi Vasconcelos Sobrinho (1978, apud MATALLO JR., 2001), quando definiu 36 indicadores, divididos em seis categorias: físicos, biológicos agrícolas, uso da terra, assentamento das populações, biológicos humanos e de processo social.

Para Matallo Jr. (2001), no entanto, um indicador deve ter um significado próprio, ser claro, simples, mensurável e sensível a mudanças, mostrando tendências ao longo do tempo. Os dados para sua medição, por sua vez, devem estar disponíveis e serem fáceis de coletar. O autor propôs, então, uma nova abordagem, ao classificar os indicadores em Indicadores de Situação e Indicadores de Desertificação. Na primeira categoria foram enquadrados aqueles relativos ao clima e a socioeconomia, indicadores que apontam os riscos de se iniciarem ou agravarem processos de desertificação. Não medem a desertificação *per si* (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo dos Indicadores de Situação.

Indicadores	Definição	Unidade de medida	Método	Periodicidade
Clima				
Precipitação	Quantidade de chuva que cai numa determinada região num certo período de tempo.	mm/dia/mês/ano	Coleta em estações meteorológicas	Diário
Insolação	Número de horas diárias (duração) e intensidade de radiação total.	horas/ano	Coleta em estações meteorológicas	Diário
Evapotranspiração	É a perda de água para a atmosfera, na forma de vapor.	mm/dia/mês/ano	Coleta em estações meteorológicas.	Diário
Sociais				
Estrutura de idades	Indicador dos efeitos da desertificação sobre a população humana local.	% de homens, mulheres, crianças e velhos.	Censo demográfico	Decenal
Taxa de mortalidade infantil	Número de mortes de crianças, com menos de 1 ano, para cada mil nascidas vivas.	Óbitos /1000	Censo e Pesquisa Hospitalar	10 anos (Censo) e 2 anos (pesq. hospit.)

(Continuação da Tabela 1)

Indicadores	Definição	Unidade de medida	Método	Periodicidade
Nível educacional	Número de anos com educação formal.	Pessoas /Número de anos de frequência à escola.	Pesquisa educacional.	Decenal ou quinquenal
Econômico				
Renda per capita	Expressa a média de rendimento por habitante.	US\$ por habitante por mês ou ano	Pesquisa amostral domiciliar	A cada dois anos
Outro				
Uso do solo agrícola	Ocupação do solo agrícola por tipo de cultura (permanente, temporária, pastos nativos, pastos plantados, matas nativas)	Área/tipo de cultura	Censo agropecuário.	Decenal

Fonte: MATALLO JR. (2001).

Já na categoria dos Indicadores de Desertificação (Tabela 2), foram incluídos aqueles que medem os aspectos biológicos e físicos do meio ambiente além de características agrícolas da área, tais como cobertura vegetal, índice de erosão e uso do solo agrícola, todos obtidos de imagens orbitais. Desta maneira, o autor consolidou uma relação de 18 indicadores, a forma de medi-los e a periodicidade da medição.

Tabela 2. Resumo dos Indicadores de Desertificação.

Indicadores	Definição	Unidade de medida	Método	Periodicidade
Biológicos				
Cobertura vegetal	Porcentagem de uma determinada área com cobertura vegetal nativa.	% de cobertura vegetal nativa em relação à área total	Imagens orbitais	A cada 5 anos
Estratificação da Vegetação	Número de estratos existente numa determinada área.	Número de estratos	Pesquisa amostral de campo	A determinar
Composição específica	Espécies nativas existentes na área.	Número de espécies	Pesquisa amostral de campo	A determinar
Espécies indicadoras	Espécies associadas ao fenômeno de degradação de um ecossistema.	Espécies	Pesquisa amostral de campo	A determinar
Físicos				
Índice de erosão	Identifica o processo de desagregação e transporte de sedimentos pela ação da água ou dos ventos.	Muito Grave, Grave e Moderada	Imagens orbitais	A cada 5 anos

(Continuação da Tabela 2)

Indicadores	Definição	Unidade de medida	Método	Periodicidade
Redução da disponibilidade hídrica	Redução da disponibilidade efetiva de recursos hídricos de superfície e/ou subterrâneos	Vazão e nível dos lençóis subterrâneos	Monitoramento hídrico	Anual ou a determinar
Agrícolas				
Uso do solo agrícola	Ocupação do solo agrícola por tipo de cultura (permanente, temporária, pastos nativos, pastos plantados, matas nativas)	Área/tipo de cultura	Imagens orbitais	A cada 5 anos
Rendimento dos Cultivos	Quantidade de um determinado produto colhido por unidade de área.	kg/ha	Pesquisa Agrícola	A cada um ou dois anos
Rendimento da Pecuária	Quantidade média de produção de carne e derivados para cada animal (por tipo de rebanho)	kg/animal	Coleta de informação sobre a produção animal	A cada um ou dois anos
Outro				
Densidade Demográfica	Razão do número de habitantes por quilômetro quadrado. Pode ser aplicado a um município, microrregião ou Estado.	hab/km ²	Censo	Decenal

Fonte: MATALLO JR. (2001).

Embora sejam grandes os esforços para sistematizar e simplificar os indicadores do processo de desertificação, ainda persiste a complexidade de lidar com tantos deles. Os trabalhos mais recentes têm optado por avaliar alguns, especialmente aqueles ligados diretamente à cobertura vegetal e ao uso da terra. No conjunto de informações disponíveis para avaliar a cobertura vegetal, as imagens dos satélites de observação da Terra tornaram-se os dados mais adequados e confiáveis. Para Accioly et al. (2002), o sensoriamento remoto surgiu como ferramenta indispensável para avaliação dos processos de desertificação, especialmente pelo fato da Organização das Nações Unidas (ONU) recomendar o índice de vegetação derivado de imagens de satélite como um dos quatro principais indicadores desse processo.

2.2 O Sensoriamento Remoto

De uma maneira geral, sensoriamento remoto é a denominação dada à técnica de medir grandezas físicas de objetos, sem contato direto com os mesmos. Para tal, são utilizados sensores que captam a energia refletida ou emitida pelo objeto. Para o sensoriamento remoto de alvos na superfície da terra, são utilizados sensores passivos, que capturam a energia do sol refletida pelo objeto, ou ativos, que possuem uma fonte própria de energia que é irradiada em direção ao alvo para que sua reflexão seja captada.

Ao incidir sobre a Terra, a radiação solar sofre diversos processos enquanto ultrapassa a atmosfera e atinge os alvos na superfície, desde a reflexão ou absorção por alguns gases até o espalhamento em decorrência, especialmente, da presença de aerossóis e vapor d'água. Desta forma, a energia que alcança a superfície é apenas uma parte daquela que incide sobre a alta atmosfera. Ao atingir a superfície, a radiação solar interage com os diversos materiais que a constituem: água, vegetação, solos e rochas. Em cada um desses alvos, a radiação solar pode ser refletida, absorvida ou transmitida através do corpo do objeto. A porção que é refletida retorna em direção à atmosfera, submetendo-se novamente aos processos de absorção e espalhamento decorrente da presença de gases e aerossóis. A parte que é absorvida aquece a superfície e esta, como todo corpo aquecido, passa a emitir radiação térmica. São estas porções da energia solar, aquela refletida e essa em forma de radiação térmica, que são captadas por sensores remotos passivos instalados, normalmente, em satélites de observação da Terra.

Imagens de satélite são produtos digitais obtidos através de sensores remotos passivos, calibrados para captar a energia refletida ou irradiada pela superfície da Terra em faixas de frequência específicas do espectro eletromagnético (Figura 1). A radiação solar atinge a superfície em comprimentos de onda que vão desde o ultravioleta ($0,1 \mu\text{m}$) até o infravermelho próximo ($3 \mu\text{m}$). Os sensores, instalados nos satélites e apontados para a superfície da Terra, captam a energia refletida ou irradiada em cada uma das bandas de frequência da luz visível (azul, verde e vermelho) e do infravermelho (próximo, médio e distante), isoladamente. Estes sinais são então convertidos para níveis digitais, transmitidos para estações de recepção

em terra, onde são processados e armazenados em banco de dados na forma de arquivos de imagens, um para cada faixa de frequência.

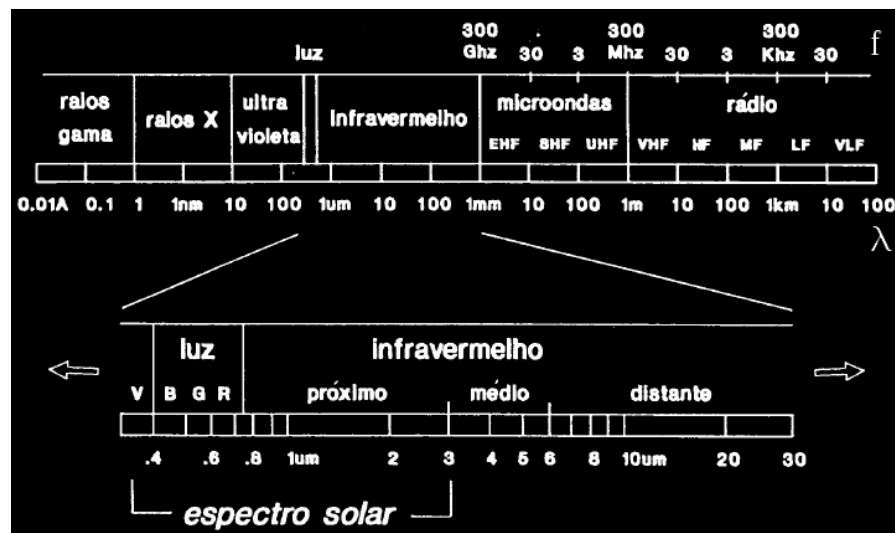


Figura 1 - Espectro eletromagnético, evidenciando a faixa do espectro solar.

Fonte: INPE (2001)

Atualmente, diversos satélites operam em órbita da Terra coletando imagens da superfície do planeta em várias resoluções espaciais e espectrais. São eles: ALOS, ASTER, CARTOSAT-1, CBERS, FORMOSAT-2, GeoEye-1, GeoEye-2, IKONOS, LANDSAT-7, QuickBird, SPOT-5, WorldView-1, WorldView-2, entre outros. Em sua maioria, os satélites de observação da Terra possuem órbita polar, heliossíncrona, entre 700 km e 1.000 km de altitude, com sensores multiespectrais de diversas resoluções espaciais, variando de 0,6 m a mais de 1.000 m (EPIPHANIO, 2002). A órbita polar sincronizada com o sol permite que as imagens sejam captadas sempre no mesmo horário local, ou seja, com as mesmas condições de iluminação da superfície a cada passagem do satélite.

Dentre as imagens disponíveis para o território brasileiro, aquelas geradas pelos satélites LANDSAT-5, LANDSAT-7 e CBERS-2B tornaram-se as mais utilizadas devido ao longo período de cobertura (desde 1984) e à gratuidade no acesso aos arquivos digitais. Suas principais características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Principais características dos satélites LANDSAT-5/7 e CBERS-2B.

Satélite	LANDSAT-5	LANDSAT-7	CBERS-2B
Data de lançamento	1984	1999	2007
Sensores (resolução espacial): resolução espectral das bandas de frequência	TM (30m): (0.45-0.52 μm) (0.52-0.60 μm) (0.63-0.69 μm) (0.76-0.90 μm) (1.55-1.75 μm) (2.08-2.35 μm) MSS (79m): (0.5-0.6 μm) (0.6-0.7 μm) (0.7-0.8 μm) (0.8-1.1 μm)	ETM+ (30m): (0.45-0.52 μm) (0.52-0.60 μm) (0.63-0.69 μm) (0.76-0.90 μm) (1.55-1.75 μm) (2.08-2.35 μm) (0.52-0.90 μm)* (*) 15m	WFI (260m): (0.63-0.69 μm) (0.77- 0.89 μm) CCD (20m): 0.45-0.52 μm 0.52-0.59 μm 0.63-0.69 μm 0.77-0.89 μm 0.51-0.73 μm HRC (2.7m): (0.50-0.80 μm)
Altitude	705 km	705 km	778 km
Inclinação	98.2°	98.2°	98.5°
Órbita	polar, heliossíncrona	polar, heliossíncrona	polar, heliossíncrona
Horário de cruzamento do equador	9:45h ($\pm 15\text{min.}$)	10:00h ($\pm 15\text{min.}$)	10:30h
Período de revolução	99 min	98,9 min	100,26 min
Período de revisita	16 dias	16 dias	26 dias
Faixa imageada	185 km	185 km	WFI: 890 km CCD: 113 km HRC: 27 km

Fonte: NASA (2009), INPE (2009)

Por se tratar de uma avaliação temporal da cobertura vegetal, o presente estudo utilizou imagens do satélite LANDSAT-5, tendo em vista a longa série de imagens disponíveis. Dentre seus sensores, o Mapeador Temático (TM) foi selecionado por possuir melhor resolução espacial (tamanho de pixel de 30 m x 30 m) e melhor separação espectral (faixas de frequência mais bem definidas) (Tabela 4).

Tabela 4. Denominação das faixas espectrais do sensor TM do LANDSAT-5.

Faixa espectral	Banda	Denominação
0,45 a 0,52 μm	1	azul
0,52 a 0,60 μm	2	verde
0,63 a 0,69 μm	3	vermelho
0,76 a 0,90 μm	4	infravermelho próximo
1,55 a 1,75 μm	5	infravermelho médio
2,08 a 2,35 μm	7	infravermelho distante

Fonte: NASA (2009)

A geração de seis arquivos para cada imagem TM do satélite LANDSAT-5 permite avaliar o comportamento dos diversos alvos no solo em cada faixa de frequência, visto que cada tipo de superfície, tais como água, vegetação, solo arenoso, solo argiloso, tem uma resposta diferente em cada uma dessas faixas do espectro eletromagnético. É a chamada assinatura espectral do alvo (Figura 2). São essas características que permitem mapear os diversos temas a partir da imagem de satélite (LILLESAND; KIEFER, 1994).

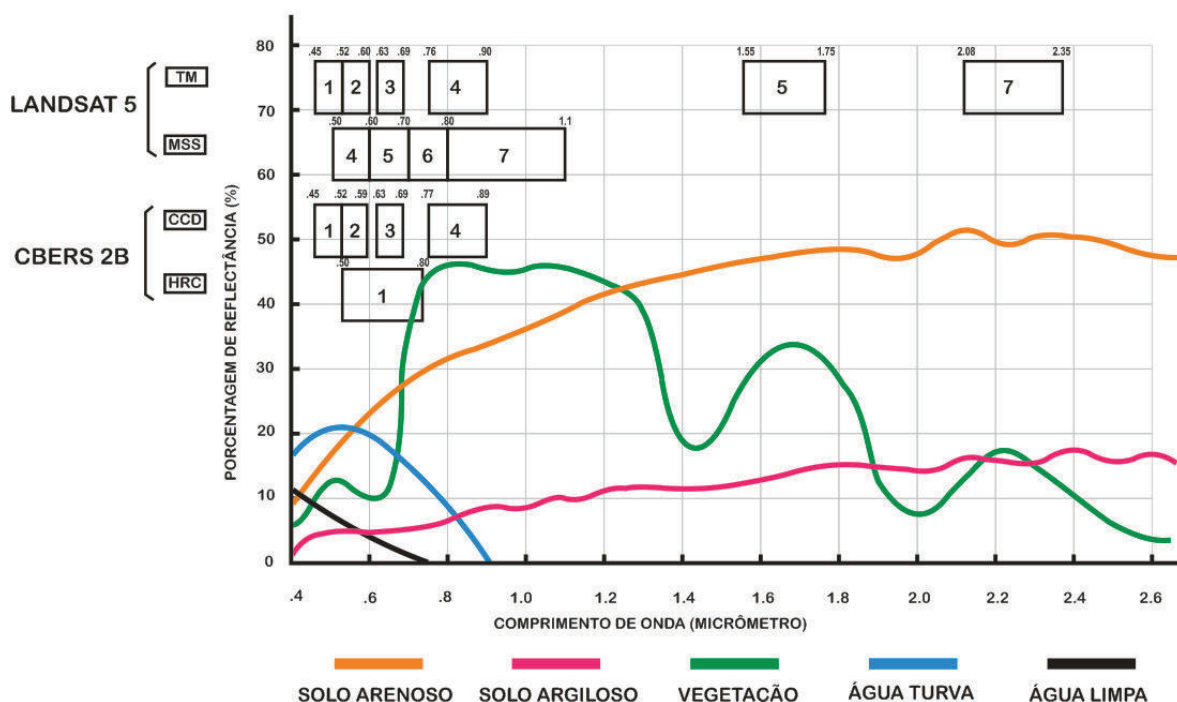


Figura 2 – Assinatura espectral dos alvos e sua relação com as bandas dos sensores dos satélites LANDSAT 5 e CBERS 2B.

Fonte: Adaptado de LILLESAND e KIEFER (1994).

Moraes (2002) explica que a vegetação apresenta alta absorção da energia eletromagnética na região do espectro visível, pois essa é capturada pela clorofila para a realização da fotossíntese. A alta reflectância no infravermelho próximo (até 1,3 μm) é devido à estrutura celular, sendo que a partir deste comprimento de onda é o conteúdo de água na vegetação quem define as bandas de absorção presentes em seu comportamento espectral. No caso do solo, as combinações e arranjos dos materiais constituintes é que definem o seu comportamento espectral, sendo que os principais fatores são a composição mineral, a matéria orgânica, a umidade e a granulometria (textura e estrutura). Já o comportamento espectral da água pura

apresenta baixa reflectância (menor do que 10%) na faixa do visível (entre 0,38 e 0,7 μm) e máxima absorção na banda do infravermelho (acima de 0,7 μm). A autora observa ainda que o comportamento espectral de corpos d'água é modulado principalmente pelos processos de absorção e espalhamento da radiação produzidos por materiais dissolvidos e em suspensão. É verificado que a presença de matéria orgânica dissolvida desloca o máximo de reflectância espectral para o verde-amarelo, enquanto que a presença de matéria inorgânica em suspensão resulta num deslocamento em direção ao vermelho.

Para fazer uso da característica peculiar da assinatura espectral da vegetação (alta absorção no visível e alta reflectância no infravermelho próximo), diversos índices foram propostos na literatura. Estes índices são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como fitomassa e índice de área foliar (SHIMABUKURO; NOVO; PONZONI, 1998)

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN) é o mais conhecido e utilizado para mapeamento de cobertura vegetal. Proposto por Rouse et al. (1974, apud SÁ et al., 2008), o IVDN é obtido pela equação (1).

$$\text{IVDN} = (\text{IV} - \text{VIS})/(\text{IV} + \text{VIS}), \quad (1)$$

onde IV é a resposta espectral do pixel na banda do infravermelho próximo (LANDSAT-5/TM4) e VIS é a resposta espectral do pixel na banda do visível vermelho (LANDSAT-5/TM3).

Diferentes coberturas vegetais têm sido avaliadas por meio da relação existente entre bandas espectrais individuais, e/ou técnicas de realce das imagens, com parâmetros biofísicos da vegetação, entre eles a fitomassa (QI et al., 2000).

No caso da Caatinga, vegetação típica do semiárido brasileiro, a fitomassa foi especificamente avaliada por Costa et al. (2002) em uma área piloto do núcleo de desertificação do Seridó e relacionada ao IVDN. Dezesseis transectos de 500 m, georeferenciados, foram selecionados e usados para a coleta de dados de fitomassa (Peso Seco Total – PST) e de Índice de Área de Planta (IAP), para árvores e arbustos com diâmetro na base igual ou superior a 1 cm. Foram então estabelecidas as equações de regressão entre o IAP, PST e dados espectrais do sensor LANDSAT-5/TM, realçados por meio do IVDN.

Com base nessas equações, o autor propôs a seguinte classificação em função do IVDN: as áreas ocupadas com caatinga com fitomassa inferior a 5 ton/ha podem ser consideradas em avançado estágio de desertificação ou desertificadas. As áreas de caatinga com fitomassa igual ou superior a 20 ton/ha podem ser consideradas como preservadas. As áreas de caatinga no intervalo entre 5 e 20 ton/ha de fitomassa apresentam diferentes estágios de desertificação.

2.3 Os Sistemas de Informações Geográficas

O termo geoprocessamento representa a área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e ferramentas computacionais para o tratamento da informação geográfica. Tais ferramentas computacionais, conhecidas como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas a partir da integração de dados de diversas fontes e da criação de banco de dados georreferenciados. Os SIGs vêm influenciando de maneira crescente as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional.

Segundo Câmara, Davis e Monteiro (2001), um SIG é normalmente composto pelos seguintes componentes (Figura 3):

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Funções de consulta e análise espacial;
- Visualização e plotagem;
- Armazenamento e recuperação de dados.

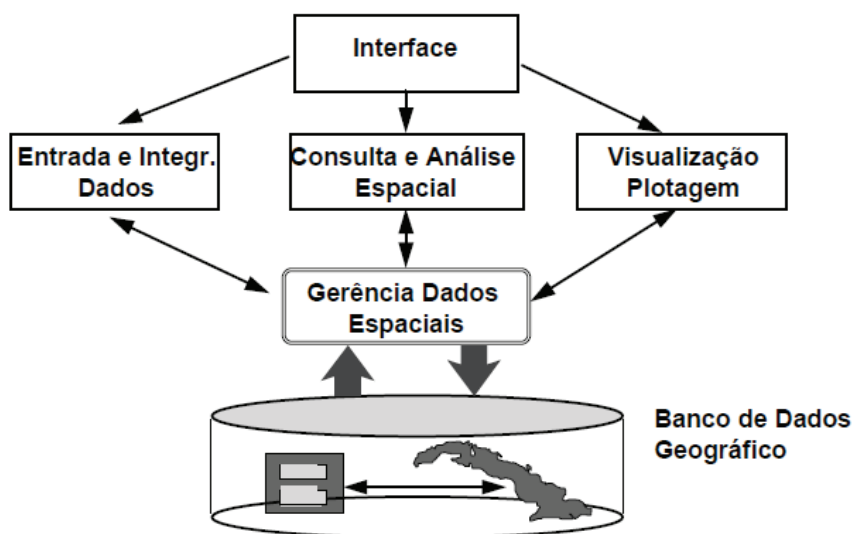


Figura 3 – Estrutura de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Fonte: CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO (2001)

2.3.1 Interface com o usuário

A interface com o usuário, também denominada interface homem-máquina, define como o sistema é operado e controlado. Através de janelas, todos os comandos são executados, desde a entrada de dados, consultas, processamento e análise espacial, até a visualização de resultados na forma de tabelas, gráficos e mapas. Em face da grande complexidade das operações disponíveis num SIG, a interface com o usuário representa um dos componentes fundamentais para sua plena utilização e eficácia.

2.3.2 Entrada e integração de dados

Todo SIG deve permitir a digitalização de dados gráficos em formato vetorial, associar imagens digitais ao banco de dados, realizar análises de consistência sobre os dados vetoriais, efetuar procedimentos de “limpeza” ou correção sobre os dados adquiridos, receber, converter e tratar dados provenientes de outros sistemas de informação etc. Os dados num SIG podem ser classificados em cinco tipos a saber:

- Temáticos: descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica, expressa de forma qualitativa, como os mapas de pedologia e cobertura vegetal de uma região.
- Imagens: representam formas de captura indireta de informação espacial, tais como imagem de satélite, fotografia aérea entre outras. São armazenadas como matrizes, sendo cada ponto (pixel) caracterizado por um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre correspondente.
- Modelos Numéricos de Terreno: utilizados para representar quantitativa uma grandeza que varia continuamente no espaço, a exemplo da altimetria, e para gerar mapas topográficos, análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens, mapas de declividade para análises de erodibilidade etc.
- Cadastrais: distingue-se de um temático, pois cada um de seus elementos é um objeto geográfico, que possui atributos e pode estar associado a várias representações gráficas. Por exemplo, as propriedades rurais de um município são elementos do espaço geográfico que possuem atributos, tais como dono, valor venal, ITR devido etc.
- Redes: utilizados para armazenar informações associadas a redes de drenagem (bacias hidrográficas), rodovias, serviços de utilidade pública, como água, luz e telefone etc.

2.3.3 Funções de consulta e análise espacial

As funções de manipulação, consulta e análise espacial de dados geográficos são realizadas de acordo com o tipo de dado a ser tratado, por exemplo:

- Análise geográfica: permite a combinação de informações temáticas e cadastrais através de procedimentos de reclassificação, intersecção, operações booleanas e matemáticas entre mapas, consulta espacial ao banco de dados etc.

- Processamento de imagens: possibilita a manipulação de imagens por meio de funções de realce por modificação de histograma, filtragem espacial, classificação estatística, rotação espectral (componentes principais), registro etc.
- Modelagem de terreno: permite cálculo de declividade, volumes, cortes transversais e linha de visada, geração de mapas de isolinhas, de declividade e de aspecto, visualização 3D etc.
- Modelagem de redes: além do cálculo de percurso ótimo e crítico, permite operações de consulta e cálculo de fluxos em decorrência da interligação dos elementos vetoriais ao banco de dados.

2.3.4 Visualização e plotagem

As funções de visualização e plotagem de um SIG disponibilizam ferramentas para visualização de dados em tela ou produção de cartas impressas. Com recursos sofisticados de apresentação gráfica, estas ferramentas permitem a definição interativa de uma área de plotagem, aplicação de legendas, textos explicativos e notas de crédito, representação gráfica e numérica de escala, utilização de bibliotecas de símbolos etc.

2.3.5 Armazenamento e recuperação de dados

As funções de armazenamento e recuperação de dados são normalmente desempenhadas por sistemas gerenciadores de banco de dados (SGBD). São sistemas que funcionam independentemente do sistema aplicativo, armazenando os dados em arquivos no disco rígido e carregando-os em memória para sua manipulação. Assegura três requisitos importantes na operação de dados:

- Integridade: controle de acesso por vários usuários;
- Eficiência: acesso e modificações de grande volume de dados;

- Persistência: manutenção de dados por longo tempo, independente dos aplicativos que dão acesso ao dado.

2.4 Estudos sobre desertificação

Num esforço contínuo de mapear o processo de desertificação no Semiárido Brasileiro, diversas pesquisas têm sido realizadas utilizando técnicas de sensoriamento remoto e SIG. Sá e Angelotti (2009) apresentaram estudos em escala regional realizados pela Embrapa Semiárido (no prelo) sobre a espacialização dos processos de desertificação no bioma Caatinga. Mapas temáticos foram elaborados para os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia apontando o estado atual do processo de desertificação numa escala de degradação que vai desde a ausência do processo até o nível de maior severidade.

Nos estudos em escalas mais detalhadas, diferentes áreas na região semiárida do Nordeste foram avaliadas quanto à degradação de suas terras, com ênfase para as áreas conhecidas como Núcleos de Desertificação.

No **Núcleo de Desertificação do Seridó**, no Rio Grande do Norte, estudos foram conduzidos por Costa et al. (2002) para mapeamento da fitomassa da caatinga através do IVDN derivado de imagens do satélite TM/LANDSAT-5. Após a utilização de técnicas de processamento de imagens e aplicação de equações de Peso Seco Total (PST) em função do IAP e do IVDN, obteve-se que 28% da área de estudo é ocupada por pastagens, agricultura, açudes e zonas urbanas, enquanto que 33% é coberta por caatinga aberta (PST entre 0,1 e 5 ton/ha), 36% por caatinga semi- densa (PST entre 5 e 20 ton/ha), e 3% com caatinga densa (PST maior ou igual a 20 ton/ha), ocupando principalmente áreas de relevo acentuado.

Sá, Sá e Silva (2006) avaliaram a cobertura vegetal remanescente e o uso atual das terras do **Núcleo de Desertificação de Cabrobó**, que compreende os municípios de Santa Maria da Boa Vista, Orocó, Cabrobó e Belém do São Francisco, todos na região sul do estado de Pernambuco. Foram utilizadas imagens do satélite ETM/LANDSAT-7, datadas de 2002, para mapeamento das áreas em processo de desertificação através de interpretação visual e automática, analisando-se os

aspectos espaciais e espectrais dos alvos. A área foi então classificada em diversos graus de severidade dos processos de desertificação: severo, correspondendo à ocupação com agropecuária (15%); acentuado, para a Savana Estépica Arborizada (76%); moderado, para a Savana Estépica Florestada (3%), e baixo, correspondendo à área de vegetação com influência fluvial (6%).

Sá et al (2008) estudaram ainda os municípios de Araripina, Bodocó, Ouricuri, Trindade e Ipubi que formam o pólo gesseiro do Araripe Pernambucano para avaliar a cobertura vegetal através de imagens de satélites. Foi utilizado o IVDN, estratificado em 14 classes, para separação das fisionomias existentes na região estudada. Como resultado encontraram que a região possui cerca de 44% de áreas degradadas e 54% de remanescentes de vegetação passíveis de exploração sustentável com vistas a preservar a matriz energética (lenha) das indústrias de gesso da região.

Carvalho e Almeida Filho (2007), por sua vez, avaliaram a extensão da degradação no **Núcleo de Desertificação de Gilbués**, sul do estado do Piauí, utilizando imagens do satélite TM/LANDSAT-5 dos meses de junho/2005 (estação seca) e novembro de 2005 (início da estação chuvosa). Aplicando técnicas de classificação automática durante o processamento das imagens, constataram que na estação chuvosa as áreas de solos nus, indicativas do processo de desertificação, ocupavam cerca de 14% do total da região investigada. A área de solos com cobertura vegetal rala representava 10%, enquanto que a região com cobertura vegetal degradada ocupava 49% e, por fim, os remanescentes de caatinga e cerrado preservados atingiram apenas 27% da região de estudo. Uma análise também foi efetuada com imagens do período seco e constatou-se que há diferenças significativas na avaliação da cobertura vegetal em função da característica caducifolia da vegetação. Para mapeamento e monitoramento de solos expostos, os autores recomendam o uso de imagens de satélite colhidas durante a estação chuvosa.

Pinto, Carvalho e Alvalá (2009) utilizaram imagens do satélite LANDSAT (sensores MSS, TM e ETM+) para monitorar o uso e cobertura da terra nos municípios de Sobral, Irauçuba e Forquilha, localizados na região noroeste do estado do Ceará, conhecida como **Núcleo de desertificação de Irauçuba**. Imagens dos anos de 1976, 1987, 1999 e 2006 foram processadas, classificadas e associadas a oito categorias de uso e ocupação do solo (floresta perene, floresta

decídua, caatinga, agropecuária, solo exposto, zona urbana, água e estradas). Observou-se no período de 30 anos que houve uma redução contínua das três primeiras classes sendo a caatinga a mais afetada, com redução de 41% para 22% da área ocupada. Coerentemente, a atividade agropecuária cresceu no mesmo período e ampliou de 55% para 74% a área utilizada.

Na Paraíba, Sousa et al (2007) promoveram estudos sobre a dinâmica da cobertura vegetal no município de Itaporanga, estado da Paraíba, no período de 1987 a 2005. Utilizando imagens dos satélites TM/LANDSAT-5 e CCD/CBERS-2, constataram que houve uma recuperação da cobertura vegetal em função da interrupção da cotonicultura arbórea, a partir de 1986, e da conseqüente migração da população rural para o meio urbano. A classe de cobertura densa a semidensa teve um acréscimo de 14% no período enquanto que as classes mais comprometidas - semidensa a semi-rala, semi-rala a rala e rala + solo exposto, foram diminuídas em 5%, 3% e 6%, respectivamente.

Ainda na Paraíba, Sousa et al (2008) aplicaram geotecnologias para diagnosticar a degradação das terras do município de São João do Cariri, situado na microrregião dos Cariris Velhos, utilizando imagens de 1987 e 2004 do satélite TM/Lansat-5. No processamento digital das imagens foram usadas técnicas de realce de contraste, operações aritméticas (IVDN), composição multiespectral ajustada, segmentação da imagem e classificação em regiões homólogas. Foram definidos seis níveis de degradação das terras. Os níveis de degradação muito baixo, baixo e moderado tiveram suas áreas de ocorrência diminuídas em 2,59%; 11,80% e 12,86%, respectivamente, durante o período de 1987 a 2004. De modo oposto, as áreas de degradação moderado grave e muito grave aumentaram em 20,14% e 7,95%, respectivamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde ao município de Juazeirinho, no estado da Paraíba, cuja posição geográfica está limitada pelas longitudes 36°28'13''O e 36°40'37''O e latitudes 6°53'20''S e 7°11'18''S. O município está localizado na Mesorregião da Borborema e na Microrregião do Seridó Oriental, ocupando uma área de 467,5 km². Limita-se com os municípios de Soledade, Gurjão, Santo André, Taperoá, Assunção, Tenório e Seridó (Figura 4).

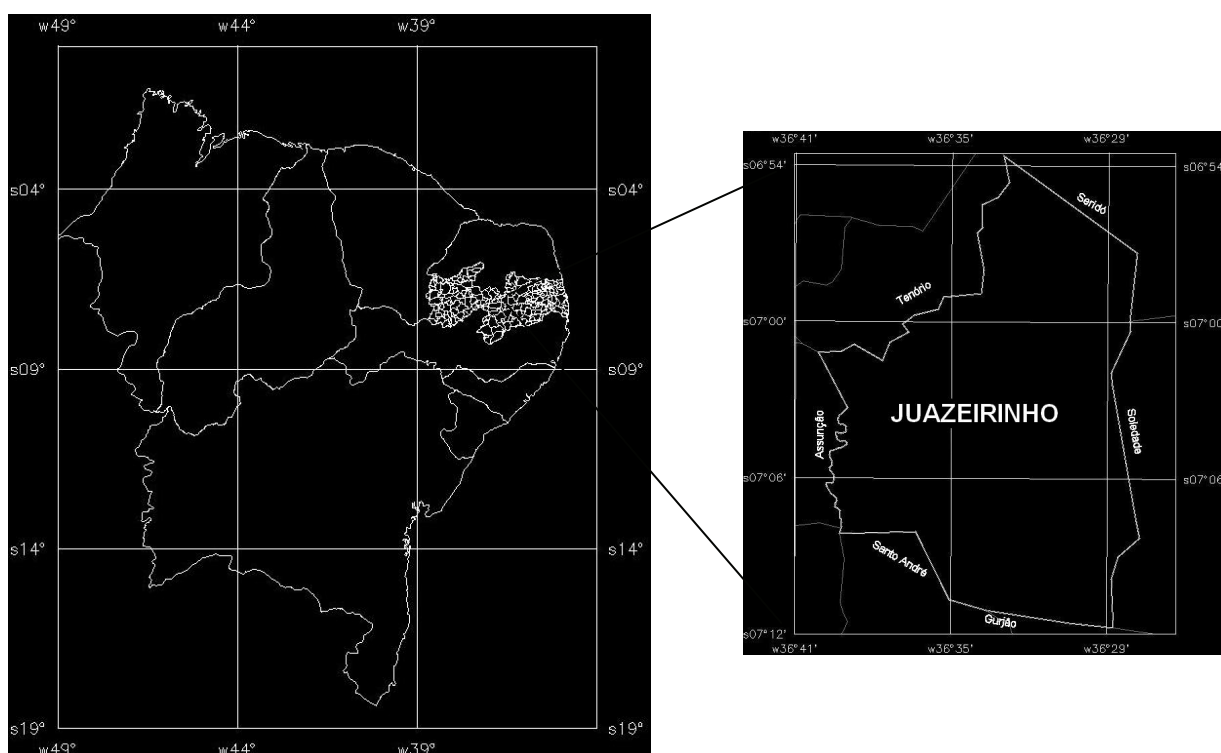


Figura 4 – Localização do município de Juazeirinho – PB.

Fonte: IBGE (2007).

De acordo com a Estimativa das Populações Residentes (IBGE, 2008), o município possui uma população total de 16.339 habitantes, sendo 8.403 habitantes na sede urbana (51%) e 7.936 distribuídos pela zona rural (49%).

A vegetação primária (natural) é dominada pela classe de formação Savana Estépica (IBGE, 1992), caracterizada por uma florística própria dos climas de

semiárido a áridos, com chuvas intermitentes torrenciais seguidas por longo período seco, e predominância de plantas espinhosas decíduais. Esta fisionomia foi extrapolada como sinônimo universalizado do termo indígena Tupi-Guarani “Caatinga” que, segundo o botânico Dárdano de Andrade-Lima, caracteriza muito bem os tipos de vegetação das áreas áridas nordestinas. Ainda segundo o IBGE (1992), essa classe de formação subdivide-se em quatro subgrupos de formação, a saber:

- Savana Estépica Florestada: caracterizada por micro e/ou nanofanerófitos, com média de até 5 metros, ultrapassando excepcionalmente os 7 metros de altura, mais ou menos densos, com grossos troncos e esgalhamento bastante ramificado em geral provido de espinhos e/ou acúleos, com total decidualidade na época sem chuvas.
- Savana Estépica Arborizada: apresenta as mesmas características florísticas da fitofisionomia florestada, no entanto os indivíduos que a compõe são mais baixos, com claros entre eles.
- Savana Estépica Parque: apresenta características fisionômicas mais típicas, com nanofanerófitos de um mesmo ecótipo bastante espaçados, como se fossem plantados, em virtude de uma pseudo-ordenação de plantas lenhosas raquíticas sobre um denso tapete gramíneo-lenhoso de hemicriptófitos e caméfitos.
- Savana Estépica Gramíneo-Lenhosa: também conhecido por campo espinhoso, é caracterizado por um extenso tapete graminoso salpicado de plantas lenhosas anãs espinhosas.

A vegetação secundária (antropizada) é encontrada em extensas áreas que estão sob a influência das atividades agropecuárias ou foram abandonadas por mau uso do solo ou exaustão de sua fertilidade, e passam por um processo de recuperação através de sucessão natural.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Bsh, ou seja, semiárido quente, com chuvas de verão. A temperatura média anual situa-se em torno de 26° C. A pluviometria média anual é de 522 mm, concentrada nos meses de fevereiro a maio (72%) e caracterizada por uma forte irregularidade anual e interanual (PARAÍBA, 2006).

Quanto à geomorfologia, o município é dominado pelo Planalto da Borborema com formas tabulares em sua maior parte, aguçadas numa pequena porção a sudeste da sede municipal e convexas noutra pequena área ao norte (ibidem). A altitude média é de 574 m, variando de 452 m a 690 m, conforme dados SRTM - Shuttle Radar Topographic Mission, disponibilizados por Miranda (2005) (Figura 5).

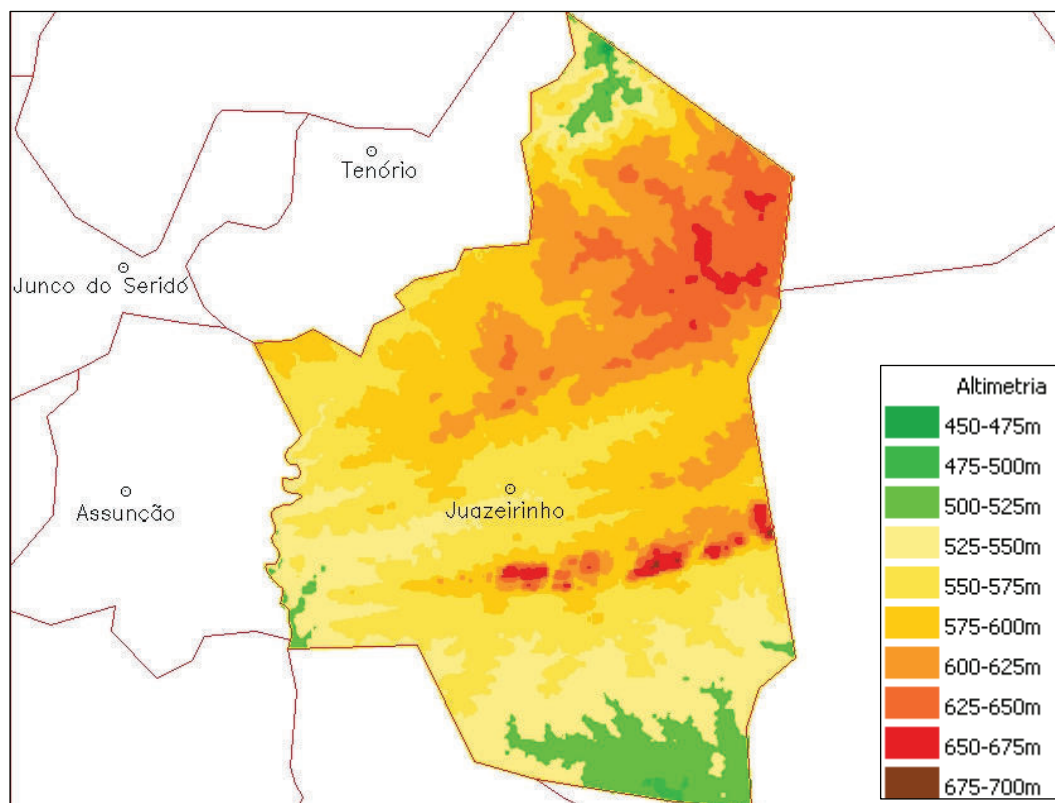


Figura 5 – Altimetria da área de estudo.

Fonte: MIRANDA (2005)

As principais unidades de solo que ocorrem na área de estudo estão apresentadas na Figura 6 e descritas a seguir conforme os critérios contidos nos levantamentos de solos existentes: Brasil (1972), Paraíba (1978) e, sempre que possível, de acordo com as determinações preconizadas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).

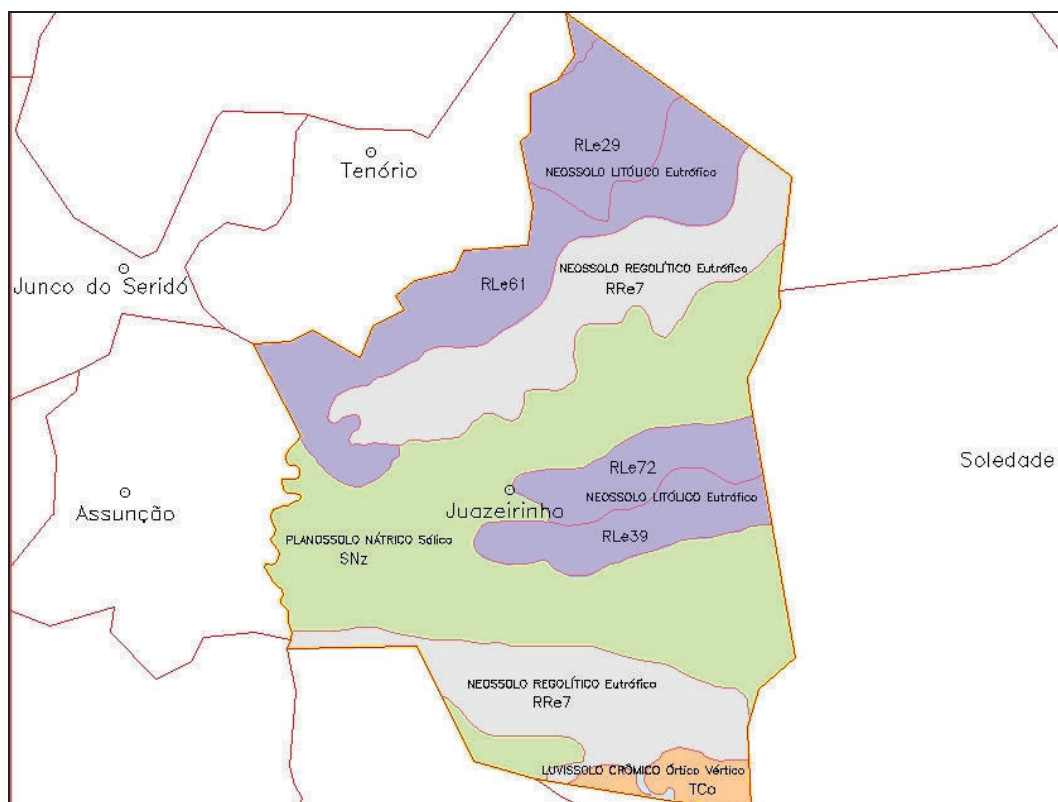


Figura 6 – Principais classes de solos ocorrentes na área de estudo.

Fonte: PARAÍBA (1978), atualizado por EMBRAPA (1999).

- **PLANOSSOLO NÁTRICO Sálíco - SNz:** solos moderadamente profundos, com horizonte A fraco e moderadamente desenvolvido, imperfeitamente drenados, com permeabilidade lenta a muito lenta na parte subsuperficial. Quimicamente, são solos que se caracterizam pelo elevado percentual de sódio trocável nos horizontes subsuperficiais. Apresentam limitações muito fortes para o seu aproveitamento agrícola em vista da forte alcalinidade juntamente com as más condições físicas do horizonte B e a alta percentagem de saturação de sódio nos horizontes subjacentes. Podem ser utilizados com pecuária extensiva e com o cultivo da palma forrageira. Ocupam a parte central do município de relevo plano e suave ondulado.
- **NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico - RLe:** solos pouco desenvolvidos, rasos ou muito rasos, não hidromórficos, que apresentam um horizonte A assente diretamente sobre a rocha, fracamente desenvolvido e com textura desde arenosa até média. Na área de estudo, sua fase pedregosa

e rochosa pode ser encontrada nas porções central e setentrional, associada aos seguintes tipos de relevo:

- Suave ondulado (RLe61): solos muito pouco cultivados, devendo ser aproveitados com a pecuária extensiva, com a roçagem da vegetação natural.
- Ondulado (RLe29), ondulado e forte ondulado (RLe72) e forte ondulado e montanhoso (RLe39): solos pouco aproveitados com agricultura devido às severas limitações impostas pela deficiência de água, pedregosidade e rochosidade. Devem ser utilizados para conservação da flora e fauna regionais.
- NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico – RRe7: solos muito arenosos, pouco desenvolvidos, medianamente profundos ou profundos, com bastante materiais primários de fácil intemperização, localizados sobre relevo suave ondulado. Estes solos requerem intenso controle da erosão, bem como adubações que supram as deficiências de fósforo e nitrogênio. Apresentam graves limitações em função da forte carência de água em decorrência do longo período de estiagem e da irregularidade de chuvas. Encontrado sobre as porções centro-norte e centro-sul do município.
- LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vértico – TCo: solos com horizonte argílico (B textural), argila de atividade alta, textura média, situados em relevo suave ondulado. As principais restrições a sua utilização agrícola estão relacionadas à presença de argilas expansivas, às condições de drenagem e as más propriedades físicas, aliadas à pedregosidade e forte escassez d'água. Podem ser aproveitados para pecuária, com plantio de pastagens artificiais resistentes à seca, e para cultivos de algumas culturas de subsistência no período de inverno. Situa-se numa pequena porção ao sul da área de estudo.

3.2 Materiais

Os materiais utilizados no desenvolvimento do estudo foram:

- Um conjunto de imagens LANDSAT5, sensor TM, órbita ponto 215/65, Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, de 18/06/1990 e 29/07/2005, selecionadas a partir do grau de cobertura de nuvens e do período de chuvas na região, disponível gratuitamente em <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>, acesso em 30/07/2009.
- Modelo Digital de Elevação extraído dos dados do SRTM, malha 90 m X 90 m, disponível em <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/pb/pb.htm>, acesso em 27/11/2009.
- Dados pluviométricos do posto de Juazeirinho obtidos da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), disponíveis em <http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/monitoramentoPluviometria.do?metodo=listarMesesChuvvasMensais>, acesso em 30/07/2009.
- Cartas Topográficas da SUDENE, escala 1:100.000, digitalizadas pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro, disponível na AESA (<http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/cad.html>), acesso em 30/07/2009.
- Arquivos do tipo shape, contendo as principais estradas, drenagens, sedes municipais, sedes distritais, limites de município e açudes da Paraíba. disponível na AESA (<http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/shapes.html>), acesso em 30/07/2009.
- Software SPRING 5.1 - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (CÂMARA et al., 1996), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, disponível em <http://www.dpi.inpe.br/spring/>, acesso em 29/09/2009.
- Dados sócio-econômicos do município de Juazeirinho obtidos do Censo 2000 e Estimativa de Populações Residentes 2008 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, disponíveis em <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>, acesso em 06/08/2009.
- Equipamento GPS Garmin modelo GPSMAP 76CSx.

3.3 Métodos

A metodologia para desenvolvimento do estudo envolveu as seguintes etapas, apresentadas de maneira simplificada no fluxograma da Figura 7:

- Revisão bibliográfica dos estudos prévios sobre desertificação em áreas semiáridas no mundo, no Semiárido Brasileiro e em particular na região dos Cariris Velhos e Curimataú (PB) e Seridó (PB/RN), utilizando técnicas de sensoriamento remoto.
- Definição do Modelo de Dados no software SPRING 5.1 para possibilitar o armazenamento dos diversos planos de informação a serem gerados (imagens LANDSAT TM, rodovias, rede de drenagem, modelo numérico do terreno, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN, classes de cobertura vegetal entre outras).
- Definição da área do projeto e sistema de coordenadas a ser utilizado.
- Levantamento de dados pluviométricos da região de Juazeirinho – PB junto à AESA.
- Levantamento e seleção das imagens LANDSAT junto ao INPE.
- Levantamento dos dados cartográficos junto à AESA.
- Pré-processamento (correção geométrica) e processamento (IVDN, segmentação, classificação e mapeamento temático) das imagens LANDSAT selecionadas.
- Avaliação das classificações finais, edição matricial e obtenção da área das classes de cobertura vegetal para os dois momentos selecionados.
- Avaliação do grau de evolução do processo de degradação das terras.
- Relacionamento da redução da cobertura vegetal com a produção industrial na região, que tem a lenha como matriz energética (cal, cerâmica, panificação etc).
- Identificação das possíveis causas das alterações da cobertura vegetal no município.

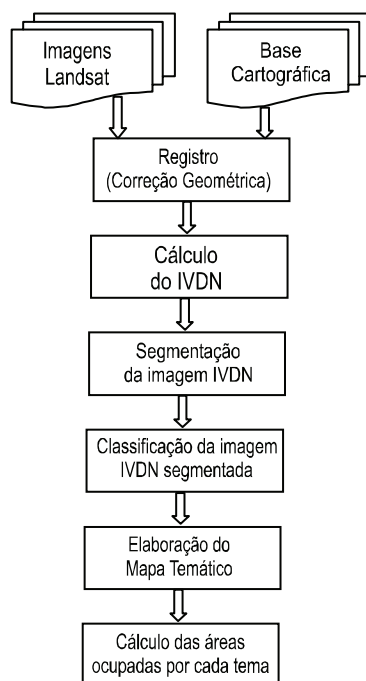


Figura 7 – Fluxograma simplificado das etapas da metodologia.

3.3.1 Definição do Modelo de Dados no SPRING

Para possibilitar o armazenamento dos diversos planos de informação a serem gerados e manipulados pelo SPRING (INPE, 2004), foi definido um modelo de dados com as seguintes categorias:

- **Imagens:** para armazenamento das imagens LANDSAT5 TM dos anos de 1990 e 2005, nas seis bandas espectrais, e todas as imagens derivadas, tais como IVDN, CMA (composição multiespectral ajustada), segmentada, classificada, sintética e relevo com sombras.
- **Temático:** para armazenamento dos diversos temas tais como estradas, drenagem, divisões municipais e estadual, altimetria, unidades de solos, cobertura vegetal, caminhamento de reconhecimento da área, entre outros.
- **Numérico:** para arquivamento do modelo numérico do terreno.

3.3.2 Definição da área do projeto e sistema de coordenadas

Por se tratar de uma área de pequenas proporções e totalmente contida na zona 24 do sistema de projeção Universal Transversa de Mercator – UTM, cujo meridiano central é 39° Oeste, este foi selecionado juntamente com o modelo da Terra descrito pelo datum SIRGAS 2000 como sistema de coordenadas do projeto no software SPRING 5.1. Como área do projeto foi definido o retângulo limitado pelas longitudes O36°46' e O36°22' e pelas latitudes S7°20' e S6°44' envolvendo, além do município de Juazeirinho, todo o seu entorno.

3.3.3 Levantamento de dados pluviométricos

O levantamento dos dados pluviométricos do município de Juazeirinho e seu entorno foi realizado com o objetivo de garantir que as imagens de satélites fossem selecionadas dentro do período chuvoso da região. Para tanto, obteve-se a série de dados diários e mensais da SUDENE (1986 a 1993) e da AESA (1994 a 2009), ambas disponíveis na Gerência Executiva de Monitoramento e Hidrometria da AESA. Conforme a Tabela 5, o período chuvoso da região (climatologia) estende-se de janeiro a julho com concentração nos meses de fevereiro a maio. Para o ano de 1990 observou-se uma grande redução no volume das chuvas (55% abaixo da média histórica) e uma forte variabilidade, mas ainda assim totais mensais expressivos, especialmente nos meses de fevereiro, abril, junho e julho. Em 2005 a ocorrência das chuvas foi mais regular e mais intensa, acumulando 19% acima da média anual.

Tabela 5. Pluviometria mensal do município de Juazeirinho para os anos de 1990 e 2005.

Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Total
1990	0,0	78,0	0,0	63,4	1,9	18,0	70,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	231,3
Desvio 1990	-100%	-7%	-100%	-54%	-96%	-15%	85%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-55%
2005	155,1	21,3	168,5	45,0	27,8	84,4	22,3	24,2	0,5	0,0	0,0	58,2	607,3
Desvio 2005	350%	-75%	51%	-68%	-36%	300%	-41%	178%	-83%	-100%	-100%	251%	19%
Climatologia	34,5	84,0	111,9	138,6	43,4	21,1	37,8	8,7	2,9	7,6	4,4	16,6	511,5

Fonte: SUDENE e AESA

3.3.4 Levantamento, seleção e conversão das imagens LANDSAT5-TM

Acessando o site do Departamento de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, www.dpi.inpe.br, efetuou-se a busca por imagens do satélite LANDSAT5-TM da órbita/ponto 215/65 que atendessem ao critério de 10% de máxima cobertura de nuvens no quadrante Q2, onde se localiza o município de Juazeirinho.

Dentre as imagens disponíveis, foram selecionadas a mais recente e a mais remota coletadas entre os meses de fevereiro a julho, período da estação chuvosa na região em que é plena a recuperação da folhagem da Caatinga. Foram então escolhidas as imagens de 18/06/1990 e 29/07/2005, e efetuado o download dos arquivos referentes às bandas B1 a B7.

De posse das imagens, foi utilizado o aplicativo IMPIMA 5.1, do pacote do software SPRING 5.1, para efetuar a conversão dos arquivos do formato original TIF para o formato SPG (SPRING), em todas as bandas B1 a B7.

Uma vez convertidas, as imagens foram importadas para o banco de dados do SPRING em planos de informações temporários. Como as imagens ainda não possuíam registro cartográfico, ou seja, não haviam sofrido qualquer processo de correção geográfica, foi necessário obter dados cartográficos georreferenciados, confiáveis e compatíveis com a escala de trabalho.

3.3.5 Levantamento e importação dos dados cartográficos

Como referências cartográficas, foram utilizados os arquivos do tipo SHAPE (*.shp) disponíveis no site da AESA. Tais arquivos foram concebidos com base nas Cartas Topográficas da SUDENE, escala 1:100.000, digitalizadas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. Para importação foi utilizada a opção *Importar dados vetoriais e matriciais* do menu *Arquivo* do SPRING, definindo para todos os shapes os seguintes parâmetros:

- Unidades: graus
- Escala: 1/100.000

- Projeção: LatLong/Sad69
- Retângulo Envolvente: projeto

No ato de importação dos arquivos, foram criados Planos de Informação (PI) para limite municipal, estradas e drenagem.

3.3.6 Registro das imagens

Com esta base cartográfica, foram então registradas as imagens do ano de 1990 utilizando-se 10 pontos de controle e erro admissível de 2 pixels (60 m). Os pontos de controle foram posicionados nas bifurcações e pontos de inflexão da rede de drenagem e de estradas que pudessem ser facilmente visualizados na imagem.

Para registro das imagens de 2005, foram repetidos os mesmos procedimentos citados acima tomando como pontos de controle não mais a cartografia de referência, mas pontos notáveis facilmente identificados nas imagens de 1990, já registrada.

3.3.7 Cálculo do IVDN

Para identificação dos diferentes tipos de cobertura vegetal, optou-se por utilizar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN, calculado a partir da equação (2)

$$IVDN = (B4 - B3) / (B4 + B3), \quad (2)$$

onde B4 é a imagem LANDSAT-5/TM da banda 4 (infravermelho próximo) e B3 é a imagem LANDSAT-5/TM da banda 3 (vermelho).

Esta manipulação matemática das bandas 3 e 4 resultou, em virtude da assinatura espectral diferenciada da vegetação frente aos demais alvos, numa nova imagem onde as áreas com vegetação são realçadas, assumindo tons de cinza mais

claros, enquanto que as áreas com solo exposto aparecem em tons de cinza mais escuros.

Para fins de cálculo, o SPRING possui uma operação aritmética pré-definida para obtenção do IVDN, acessada através da opção *Operações Aritméticas* do menu *Imagem*, dada pela equação $C = \text{Ganho} \times ((A-B)/(A+B)) + \text{Offset}$. Por se tratar de um índice normalizado, com variação entre -1 a 1, foi necessário ajustar seu resultado à escala de cinza das imagens de satélite. Para tanto, foi definido na fórmula o ganho em 256 e offset em 64.

3.3.8 Segmentação das imagens

Para delinear as regiões na imagem IVDN que possuem tonalidades semelhantes, ou seja, representam vegetação em estágio similar de degradação, foi utilizado o método de segmentação de imagem por crescimento de regiões.

Trata-se de uma técnica de agrupamento de dados implementada no SPRING, na qual somente as regiões adjacentes, espacialmente, podem ser agrupadas. Inicialmente, este processo de segmentação rotula cada pixel como uma região distinta. Calcula-se um critério de similaridade para cada par de região adjacente espacialmente. O critério de similaridade baseia-se em um teste de hipótese estatístico que testa a média entre as regiões. A seguir, divide-se a imagem em um conjunto de sub-imagens e então efetua-se a união entre elas, segundo um limiar de agregação definido. Para que duas regiões A e B vizinhas sejam unidas, é necessário que estas atendam aos três critérios abaixo:

- A e B são similares (teste das médias);
- A similaridade satisfaz o limiar estabelecido; e
- A e B são mutuamente próximas (dentre os vizinhos de A, B é a mais próxima, e dentre os vizinhos de B, A é a mais próxima).

A medida de Similaridade está baseada na distância Euclidiana entre os valores médios dos níveis de cinza de cada região. Assim duas regiões são consideradas distintas se a distância entre suas médias for superior ao limite de similaridade escolhido.

Um segundo critério de agregação é também utilizado. Trata-se da área mínima de agrupamento, expressa em quantidade de pixels. Caso o processo acima resulte em áreas menores que a área mínima definida, esta é então incorporada pela área adjacente de maior similaridade.

Para o processo de segmentação, utilizou-se a opção *Segmentação* do menu *Imagem* do SPRING, ocasião em que o limiar de similaridade foi definido em 14 e a área mínima de agrupamento em 15 pixels, equivalente a aproximadamente 1,35 ha, compatível com a escala de trabalho de 1:100.00. Os limites de similaridade e área mínima foram obtidos por experimentação e verificação visual, quando foram observadas a regularidade de bordas e a preservação de feições lineares e regiões isoladas.

3.3.9 Classificação das imagens

Para efetuar a classificação da cobertura vegetal, foi utilizado o método de classificação por regiões, através do classificador Bhattacharya, aplicado à imagem IVDN segmentada anteriormente, acessando-se para tanto a opção *Classificação* do menu *Imagem* do SPRING.

Diferentemente dos classificadores pixel a pixel, que utilizam apenas a informação espectral de cada pixel, isoladamente, para identificar regiões homogêneas, os classificadores por regiões utilizam, além do comportamento espectral, a informação espacial que envolve a relação entre os pixels e seus vizinhos. Estes classificadores procuram simular o comportamento de um foto-intérprete, ao reconhecer áreas homogêneas de imagens, baseados nas propriedades espectrais e espaciais dos alvos. A informação de borda é utilizada inicialmente para separar as regiões enquanto que as propriedades espaciais e espectrais definirão a união das áreas com mesma textura.

O classificador Bhattacharya é um dos algoritmos disponíveis no SPRING para classificar regiões de uma imagem segmentada. É um algoritmo supervisionado de agrupamento de dados, aplicado sobre o conjunto de regiões, que por sua vez são caracterizadas por seus atributos estatísticos de média, matriz de covariância e área. É uma técnica de classificação que procura agrupar regiões, a partir de uma

medida de similaridade entre elas, utilizando amostras escolhidas pelo operador como descritoras das classes. A medida de similaridade utilizada consiste na distância de Bhattacharya entre as amostras e as regiões candidatas a relação de pertinência com esta amostra.

Para fins de classificação da cobertura vegetal e coleta de amostras de treinamento do Classificador Bhattacharya, foram utilizados os intervalos de variação do IVDN listados na Tabela 6, obtidos por leitura de pixels da imagem. A associação das amostras às classes de cobertura vegetal foi realizada visualmente levando-se em conta, além da tonalidade de cinza, a geometria da amostra, o tipo de solo e o relevo da região, observado através do modelo numérico do terreno. Desta forma foi possível distinguir as áreas fortemente antropizadas, representadas por solos expostos e vegetação rala, daquelas em bom estado de conservação, ocupadas por vegetação densa e semi-densa.

Tabela 6. Intervalos de variação do IVDN para fins de classificação das imagens.

Classificação	IVDN	
	Mín	Máx
Solo Exposto		<100
Vegetação Rala	100	135
Vegetação Semi-densa	135	170
Vegetação Densa	>170	

Baseado nas amostras colhidas, foi realizada a classificação propriamente dita, etapa em que o SPRING agrupou por critério de semelhança todas as áreas segmentadas. Desta maneira, as imagens de 1990 e 2005 foram classificadas de acordo com a cobertura vegetal presente a época da passagem do satélite.

3.3.10 Reconhecimento de campo

Encerrada a etapa de processamento das imagens, foi executada a viagem de reconhecimento das áreas classificadas utilizando-se equipamento GPS para posicionamento geográfico e o software SPRING para navegação em tempo real, através da opção *Importação via GPS* do menu *Arquivo*. Foram visitadas as principais classes de cobertura vegetal identificadas no mapeamento, ocasião em

que foram observadas as características predominantes da vegetação, do solo, do relevo e da atividade agrícola, quando havia.

Todo o percurso foi registrado e adicionado à base de dados do SPRING para comparação da verdade de campo em 2009 com a classificação proposta através da análise das imagens de 2005, as mais recentes. As situações em desacordo foram investigadas através de entrevistas informais com a população local, especialmente aquela de mais idade, quando se buscou informação sobre a história de ocupação da área em questão a partir de 1990.

3.3.11 Elaboração dos Mapas Temáticos

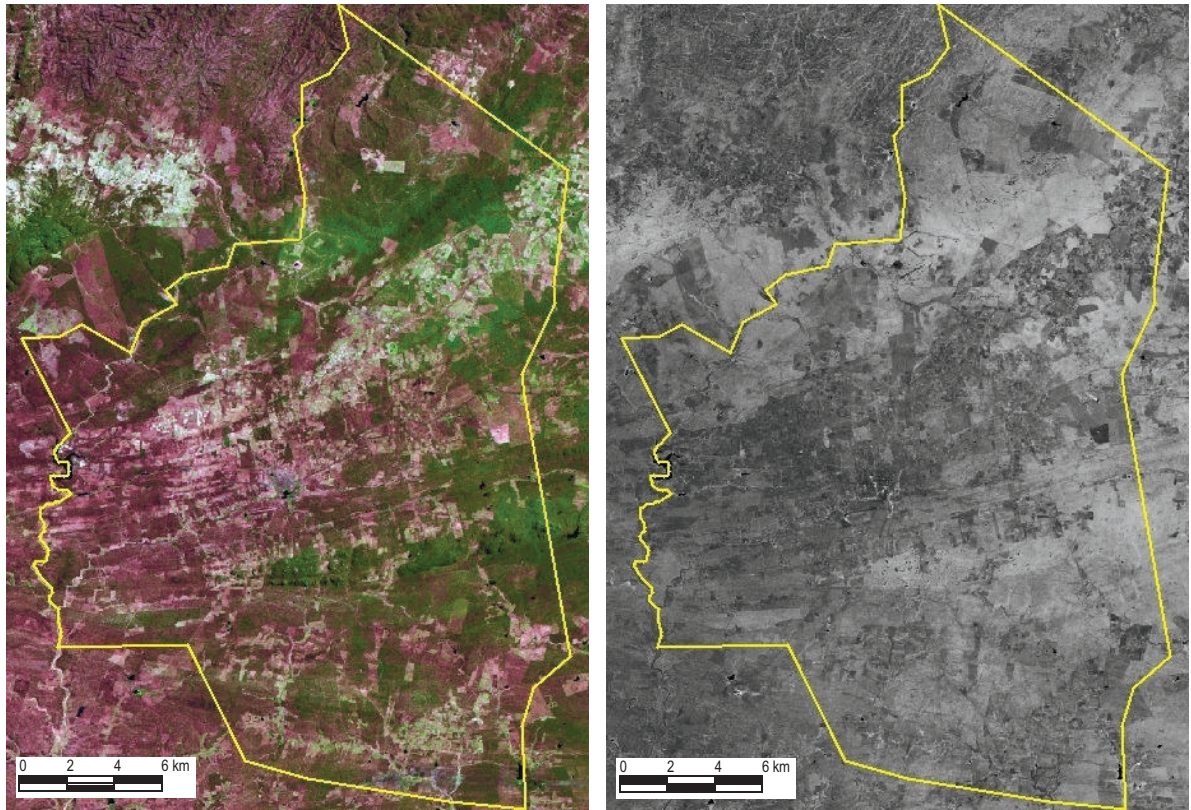
Para geração dos mapas temáticos de cobertura vegetal, foi executada a etapa de mapeamento das áreas classificadas seguida de edição matricial para definição e identificação das regiões ocupadas por espelhos d'água, área urbana, nuvens e suas respectivas sombras. A partir do mapa temático, foi calculada então a extensão das áreas ocupadas por cada tema utilizando-se, para tanto, a ferramenta *Medida de Classes* no menu *Temático* do SPRING. O mapa final, incluindo malha rodoviária, rede de drenagem e divisão municipal, foi elaborado através do aplicativo SCARTA, também pertencente ao pacote do SPRING.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

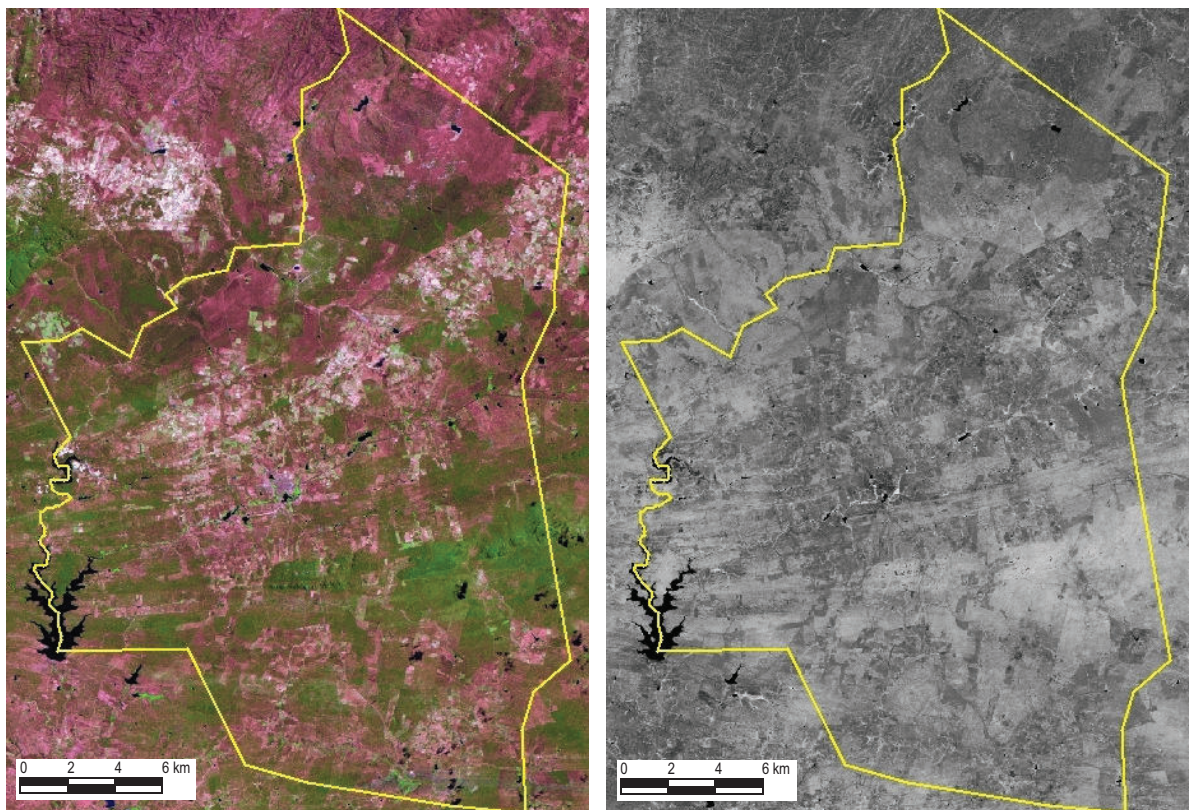
4.1 IVDN

Para efeito de visualização, a Figura 8 mostra o resultado do cálculo do IVDN para as imagens de (a) 1990 e (b) 2005 acompanhado das respectivas composições coloridas, em falsa cor, obtidas pela associação das bandas infravermelho médio (TM5), infravermelho próximo (TM4) e vermelho (TM3) aos canhões de cores vermelho (R), verde (G) e azul (B) do monitor, respectivamente, representado simplesmente por RGB543. Nesta composição, a vegetação densa é representada pela cor verde, o solo exposto pela cor magenta e as áreas com diferentes estágios de degradação da vegetação em combinações de verde e magenta.

Ao efetuar a manipulação matemática das bandas 3 e 4, calculando a diferença normalizada pela equação $IVDN = 256 \cdot (B4 - B3) / (B4 + B3) + 64$, gerou-se uma nova imagem monocromática representativa do IVDN. Observa-se que a vegetação apresenta-se nessa imagem em tons mais claros de cinza enquanto que os solos expostos se mostram em tons mais escuros. A área destacada corresponde ao município de Juazeirinho.



(a)



(b)

Figura 8 – Imagens LANDSAT5 TM em composição RGB543 e respectivas imagens IVDN: (a) 1990, (b) 2005.