



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**MODELO DE MAPEAMENTO DA DETERIORAÇÃO DO BIOMA
CAATINGA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAPEROÁ, PB**

Paulo Roberto Megna Francisco

**CAMPINA GRANDE - PB
JANEIRO – 2013**

PAULO ROBERTO MEGNA FRANCISCO

**MODELO DE MAPEAMENTO DA DETERIORAÇÃO DO BIOMA
CAATINGA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAPEROÁ, PB**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos para obtenção do título de “Doutor em Engenharia Agrícola”, Área de Concentração Irrigação e Drenagem.

Orientadores: Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves
Dr. Iêde de Brito Chaves

CAMPINA GRANDE - PB

JANEIRO – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F819m Francisco, Paulo Roberto Megna.

Modelo de mapeamento da deterioração do Bioma Caatinga da
bacia hidrográfica do Rio Taperoá, PB / Paulo Roberto Megna Francisco. –
Campina Grande, 2013.

97 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Profa. Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves, Prof. Dr. Iêde
de Brito Chaves.

Referências.

1. Geoprocessamento. 2. Modelagem. 3. Índice de Vegetação

CDU: 528.852 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



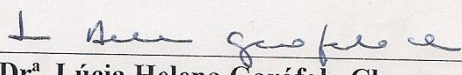
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

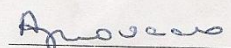
PAULO ROBERTO MEGNA FRANCISCO

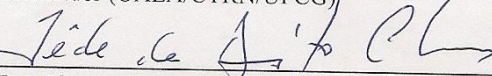
**MODELO DE MAPEAMENTO DA DETERIORAÇÃO DO BIOMA CAATINGA
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAPEROÁ, PB**

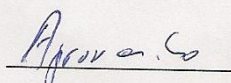
BANCA EXAMINADORA

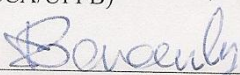
PARECER

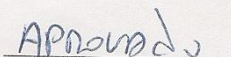

Dr.ª Lúcia Helena Garófalo Chaves
Orientador (UAEA/CTRN/UFCEG)

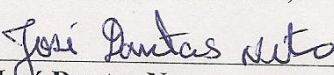



Dr. Iêde de Brito Chaves
Orientador (CCA/UFPB)

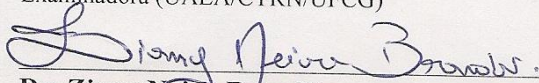


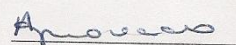

Dr. José Geraldo de Vasconcelos Baracuh
Examinador (UAEA/CTRN/UFCEG)

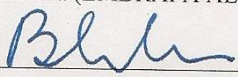



Dr. José Dantas Neto
Examinadora (UAEA/CTRN/UFCEG)




Dr. Ziany Neiva Brandão
Examinadora (EMBRAPA ALGODÃO)




Dr. Bernardo Barbosa da Silva
Examinador - DCG/UFPE



JANEIRO DE 2013

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora
e fazer um novo fim.”

Francisco Cândido Xavier

Ao grande amigo Dr. João Odivaldo Puls
“in memoriam”

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor da Vida Eterna, pela oportunidade de realizar mais uma etapa de progresso.

A meus tataravôs, que acreditaram na pátria prometida e imigraram da Áustria e da Itália para colaborar com o desenvolvimento de um novo Brasil.

A meus pais, Nércio e Agueda, “*in memoriam*”, pela vida e educação; a minha esposa, Isabela e a meus queridos filhos David, Raquel e Thiago.

A minha grande amiga, irmã e mãe, Constantina Arielo Meiado pelas orações e ao amigo que sempre vibrou pelas minhas conquistas, Dr. João Odivaldo Puls “*in memoriam*”.

À professora Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves e ao seu esposo, Dr. Iêde de Brito Chaves, pela oportunidade, amizade e confiança em prosseguir nesta pesquisa, além da presteza de nos ensinar e orientar com dedicação.

Em especial ao Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima pela grande colaboração, atenção e parceria. À Profa. Dra. Josandra de Melo e à pesquisadora da EMBRAPA Algodão, Dra. Ziany Neiva Brandão, pela colaboração, atenção e presteza, e também ao professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pelas sugestões e apoio como coordenador do projeto de pesquisa INSA/CNPq.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, pela colaboração e amizade.

Aos amigos da AESA, na pessoa da meteorologista Maria Marle Bandeira.

Aos amigos da Pós-Graduação, na pessoa de Maria da Conceição Marcelino Patrício, pela amizade sincera, e a todos que, de uma forma ou outra contribuíram nesta etapa de nossa vida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através do Projeto de Pesquisa nº 35/20109 INSA/CT-HIDRO-CNPq.

POESIA DE CAMPO

Pro dia 17 marcado,
Teremos que providenciar,
Um roteiro adequado,
Pra mode nós não errar.

Tu vistes o acontecido,
A deriva ficamo com o GPS na mão,
Sem saber o distino,
Andamo feito tontão.

Agora vamo ver,
Os pontos já acertado
Dos lugar escolhido,
Fácis de ser achados.

Mudou a pancada do bombo,
Vamos as coordenadas amarrar,
Resolução de imagem,
É o que pode atrapalhar.

Bom, chega de besteira,
Que preciso trabalhar k!!!!!!!!!!!!!!

Nossas Preocupações

Campina Grande, Primavera de 2011

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS DA PESQUISA	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. O Bioma Caatinga.....	4
2.1.1. Aspectos geomorfológicos e pedológicos.....	5
2.1.2. Aspectos climáticos	6
2.1.3. Aspectos sócio econômicos	8
2.2. O processo da desertificação.....	9
2.3. O sensoriamento remoto e a geoinformática em estudos ambientais	12
2.3.1. Características espectrorradiométricas	14
2.3.2. Índices de vegetação	17
2.4. Métodos de coleta e descrição de dados em campo.....	19
2.5. Modelos estimativos da degradação ambiental	21
3. MATERIAL E MÉTODO	22
3.1. Materiais	22
3.2. Descrição da área de estudo.....	23
3.2.1. Localização e limites	23
3.2.2. Municípios e população	24
3.2.3. Aspectos climáticos	25
3.2.4. Vegetação e uso da terra	27
3.2.5. Relevo e geologia.....	28
3.2.6. Solos.....	29
3.3. Métodos	30
3.3.1. Seleção e descrição dos alvos da vegetação de Caatinga	30
3.3.2. Criação da base de dados, registro e recorte das imagens	34
3.3.3. Processamento dos índices de vegetação.....	34
3.3.4. Seleção do índice de vegetação e geração do mapa.....	36
3.3.5. Estimativa do volume de biomassa da vegetação lenhosa da Caatinga.....	38
3.3.6. Degradação ambiental.....	39
3.3.6.1. Mapa de declividade	40
3.3.6.2. Mapa de erodibilidade	40
3.3.6.3. Mapa de cobertura do solo.....	43
3.3.6.4. Modelagem e mapeamento da degradação das terras	44

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1. Descrição dos alvos terrestres e seleção de um índice de vegetação	46
4.1.1. Amostragem e descrição dos alvos terrestres	46
4.1.2. Seleção do índice de vegetação	48
4.1.2.1. Avaliação dos índices de vegetação.....	48
4.1.2.2. Avaliação da influência do solo	52
4.2. Discriminação de coberturas e uso das terras da bacia	54
4.3. Mapeamento da vegetação de Caatinga.....	58
4.3.1. Considerações para o estabelecimento das classes de mapeamento	58
4.3.2. Mapeamento da vegetação de Caatinga	59
4.3.3. Estimativa da biomassa lenhosa e degradação da vegetação da Caatinga.....	65
4.3.3.1. Estimativa da biomassa da vegetação lenhosa da Caatinga.....	65
4.3.3.2. Estimativa da degradação da vegetação lenhosa da Caatinga	67
4.4. Estimativa da degradação das terras	69
4.4.1. Declividade do solo e risco de erosão.....	69
4.4.2. Erodibilidade do solo e risco de erosão	72
4.4.3. Cobertura do solo e risco de erosão	75
4.4.4. Mapeamento da degradação das terras	78
5. CONCLUSÕES	83
6. RECOMENDAÇÕES	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamento espectral da folha verde.....	15
Figura 2. Comportamento das bandas TM3 e TM4 na época seca e úmida.	17
Figura 3. Mapa de localização da área de estudo.	24
Figura 4. Mapa de municípios da área de estudo.....	25
Figura 5. Mapa altimétrico da área de estudo.....	28
Figura 6. Mapa de solos da área de estudo.	29
Figura 7. Fluxograma simplificado das etapas de trabalho.	30
Figura 8. Alvos pré-selecionados para a classificação no campo.....	30
Figura 9. Classificação das plantas quanto ao porte.	31
Figura 10. Classificação das plantas quanto à classe.....	32
Figura 11. Classificação quanto à subclasse.....	32
Figura 12. Representação gráfica do cálculo do Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa para comunidades de vegetação descritas como Subarbórea aberta (A) e Arbustiva Subarbórea Arbórea aberta (B).....	33
Figura 13. Representação gráfica do cálculo do VBVL (Volume de Biomassa da Vegetação Lenhosa) para uma unidade de vegetação de Caatinga Arbustiva subarbórea arbórea aberta.	38
Figura 14. Distribuição do risco à degradação.	45
Figura 15. Espacialização dos pontos amostrais na bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB	46
Figura 16. Correlação do IBVL com os índices de vegetação (IVDN, SAVI e EVI) e as Bandas 3 e 4.....	49
Figura 17. Correlações entre índices espectrais e biomassa de vegetação de Caatinga para diferentes unidades de mapeamento de solos (geoambientes), na bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB.	52
Figura 18. Valores de IVDN obtidos no período seco para diferentes classes de vegetação de Caatinga e de culturas identificadas na área de estudo.	54
Figura 19. Cultura irrigada do tomate e da batata doce.	55
Figura 20. Cultura do milho na época seca.....	56
Figura 21. Valores de IVDN obtidos no período úmido para diferentes classes de vegetação de Caatinga e de culturas identificadas na área de estudo.	56
Figura 22. Campineira em área de várzea.....	57
Figura 23. Plantio de palma em abandono e palma nova em cultivo.	57

Figura 24. Cultura do Agave abandonada.	58
Figura 25. Pontos selecionados com leituras representativas de valores crescentes de biomassa.	58
Figura 26. Mapa de tipologias de vegetação de Caatinga da bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB.	60
Figura 27. Vegetação de Caatinga classe Subarbórea arbustiva densa.....	61
Figura 28. Área de Neossolo Regolítico com agricultura.....	62
Figura 29. Solo exposto.	63
Figura 30. Vegetação de Caatinga classe Subarbustiva arbustiva muito rala.....	63
Figura 31. Vegetação de Caatinga classe Subarbustiva arbustiva rala.	63
Figura 32. Caatinga Arbustiva subarbustiva aberta.	64
Figura 33. Vegetação de Caatinga classe Arbustiva subarbustiva aberta.....	64
Figura 34. Vegetação de Caatinga Arbórea subarbórea densa.	65
Figura 35. Mapa de declividade da área de estudo.	70
Figura 36. Áreas planas com presença de Neossolos Regolíticos.	71
Figura 37. Área mais declivosa com presença de solos Neossolos Litólicos.	71
Figura 38. Mapa de erodibilidade dos solos da área de estudo.....	74
Figura 39. Solo Luvisolo Crômico de erodibilidade alta.	75
Figura 40. Mapa de classes de risco de degradação do solo em função da proteção da vegetação de Caatinga.	77
Figura 41. Açude de São João do Cariri e cidade na margem direita da drenagem.	78
Figura 42. Mapa classes de degradação das terras da bacia do rio Taperoá.....	80
Figura 43. Classe de terra com nível alto de degradação.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Municípios e população da área de estudo	25
Tabela 2. Dados de precipitação média mensal e anual de postos da área de estudo, para um período mínimo de trinta anos de observação	27
Tabela 3. Índice de porte da biomassa para as diferentes classes	31
Tabela 4. Índices de recobrimento da biomassa para as diferentes subclasses de vegetação	32
Tabela 5. Descrição das bandas do Mapeador Temático do LANDSAT 5 com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera.	35
Tabela 6. Classes de IBVL representativas da descrição da vegetação de Caatinga	37
Tabela 7. Classes de IVDN correspondentes aos índices de biomassa (IBVL) da vegetação de Caatinga para a época seca	37
Tabela 8. Classes e índices de vulnerabilidade a erosão relativo à declividade do terreno.	40
Tabela 9. Correspondência entre classes de drenagem e permeabilidade	42
Tabela 10. Classes e índices de vulnerabilidade a erosão relativos à erodibilidade dos solos	43
Tabela 11. Classes e índices de vulnerabilidade a erosão relativos à biomassa da vegetação	44
Tabela 12. Parâmetros para estimativa do grau de degradação das terras	45
Tabela 13. Valores de índices de biomassa da vegetação lenhosa determinados a partir da classificação da vegetação de Caatinga de alvos terrestres descritos no campo ...	47
Tabela 14. Equações e valores de correlações entre índices espectrais (valores y) e biomassa da vegetação lenhosa (valores x) para diferentes unidades de mapeamento de solos (geoambientes) na bacia hidrográfica do rio Taperoá	53
Tabela 15. Classes de vegetação e valores limites correspondentes de IBVL e IVDN	59
Tabela 16. Áreas de ocupação em km ² e porcentagem das classes de vegetação de Caatinga e cobertura de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Taperoá	59
Tabela 17. Dados de referência para estimativa do volume da biomassa lenhosa	66
Tabela 18. Dados e estimativa da degradação da vegetação	68
Tabela 19. Classes de vulnerabilidade devido à declividade e áreas de ocorrência	69

Tabela 20. Parâmetros dos solos utilizados para estimativa e classificação da erodibilidade (Fator K)	72
Tabela 21. Classes de vulnerabilidade devido à erodibilidade do solos da área de estudo .	73
Tabela 22. Classes de vulnerabilidade devido ao grau de cobertura do solo pela vegetação e sua distribuição por área e percentagem de ocupação na bacia.....	76
Tabela 23. Classes de vulnerabilidade e de degradação das terras e áreas de abrangências na bacia do rio de Taperoá.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PAN	Programa Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca
IA	Índice de Aridez
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
DETR/CUT3	Departamento Estadual de Trabalhadores Rurais/Central Única dos Trabalhadores
ASA	Articulação do Semiárido
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
UNCCD	Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ASD	Áreas Susceptíveis a Desertificação
ONU	Organização das Nações Unidas
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
SIG	Sistema de Informações Geográficas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
LEGAL	Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
MNT	Modelo Numérico do Terreno
REM	Radiação Eletromagnética
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Food and Agriculture Organization
EUPS	Equação Universal de Perdas de Solo
ID	Índice de Degradação
ISDA	Índice de Susceptibilidade à Degradação Ambiental
IDA	Índice de Degradação Ambiental
IBVL	Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa
DSG	Departamento do Serviço de Geografia
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
GPS	Global Position System
VBVL	Volume de Biomassa da Vegetação Lenhosa

Modelo de mapeamento da deterioração do Bioma Caatinga da bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB. FRANCISCO, PAULO ROBERTO MEGNA. 2013. Orientadores: Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves e Dr. Iêde de Brito Chaves.

RESUMO

O uso inadequado dos recursos naturais contribui para a degradação do bioma caatinga, sendo frequente o aparecimento de áreas desertificadas. A erosão é um processo que ocorre em toda a superfície terrestre; entretanto, com o incremento da ação antrópica no meio ambiente através da supressão da cobertura vegetal, os processos erosivos se intensificam e passam a comprometer os principais recursos naturais do planeta. A avaliação do grau de propensão à degradação ambiental torna-se necessária para identificar a magnitude e a extensão do problema e definir uma resposta apropriada para atenuar/suprimir as causas do processo de degradação. Neste sentido, o trabalho teve por objetivo propor um modelo para estimar o grau de degradação das terras a partir da avaliação dos efeitos da erodibilidade do solo, declividade do terreno e do grau da cobertura vegetal e assim mapear a degradação das terras da bacia hidrográfica do rio Taperoá. Foi utilizada a metodologia proposta por Chaves et al. (2008) para gerar o indicador da cobertura do solo; para o índice de erodibilidade dos solos a metodologia proposta por Chaves et al. (2004) e o índice de declividade proposto por Francisco (2010) para os limites das classes de capacidade de uso das terras. A estimativa da degradação das terras foi obtida pelo produto entre os índices do modelo, através do cruzamento no LEGAL/SPRING. O NDVI apresentou as melhores correlações com o IBVL, com $r^2 = 0,5937$. Os solos apresentaram erodibilidade alta (0,03 a 0,04 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹) em 53,8% da bacia e muito alta (> 0,04 Mg h MJ⁻¹mm⁻¹) que ocorreu em 326,4 km² (5,7%) associada aos Neossolo Regolítico e Luvisolo Crômico. Os resultados mostraram que, pelo modelo proposto 26,9% das terras da bacia apresentaram níveis muito alto e alto de degradação, 46,4 % níveis médio e apenas 22,5% níveis baixo e muito baixo.

Palavras-chave: geoprocessamento, modelagem, índice de vegetação

Model of mapping of the deterioration of the Caatinga Biome in basin of the river Taperoá, PB. FRANCISCO, PAULO ROBERTO MEGNA. 2013. Advisers: Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves and Dr. Iêde de Brito Chaves.

ABSTRACT

Improper use of natural resources contributes to the degradation of the caatinga biome, and the frequent appearance of desertified areas. Erosion is a process that occurs in all surface, however, with the increase of human action on the environment, through the removal of vegetation the erosive processes intensify and begin to compromise the main natural resources of the planet. To evaluate the degree of propensity environmental degradation becomes necessary to identify the magnitude and extent of the problem and define an appropriate response to mitigate / suppress the causes of the degradation process. Therefore, this study aimed to propose a model to estimate the degree of land degradation based on the evaluation of the effects of soil erodibility, slope of terrain and degree of vegetation, and thus mapping of land degradation river basin Taperoá. The methodology proposed by Chaves et al. (2008) to generate the indicator of soil cover, for the soil erodibility index methodology proposed by Chaves et al. (2004) and slope index proposed by Francisco (2010) for the capacity limits of classes of land use. The estimate of land degradation was obtained by the product of the indices of the model, through the intersection at LEGAL/SPRING. The NDVI showed the best correlation with IBVL, with $R^2 = 0.5937$. The soils had high erodibility (0.03 to $0.04 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) in 53.8% of the basin, very high ($> 0.04 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) occurred at 326.4 km^2 (5.7%) associated with Entisol and Chromic Luvisol. The results showed that the proposed model 26.9% of land in the basin have very high and high levels of degradation, 46.4% with high levels and only 22.5% low and very low levels.

Keywords: geoprocessing, modeling, vegetation index

1. INTRODUÇÃO

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, que ocorre na região semiárida, em grande parte localizada na região Nordeste do País. Apresenta grande diversidade de ambientes, o que propicia uma rica biodiversidade apresentando muitas espécies endêmicas de alto valor biológico (PAN-BRASIL, 2005) muitas ainda desconhecidas e/ou, não catalogadas (Alves et al., 2009). Segundo Oliveira (2009), em seu aspecto fisionômico a Caatinga apresenta uma cobertura vegetal arbustiva a arbórea, pouco densa e geralmente espinhosa. Sua variabilidade espacial e temporal na composição e no arranjo de seus componentes botânicos é resposta aos processos de sucessão e de diversos fatores ambientais, onde a densidade de plantas, a composição florística e o potencial do estrato herbáceo variam em função das características de solo, pluviosidade e altitude (Araújo Filho, 1986).

Uma das características marcantes da região semiárida brasileira é a sua grande variabilidade espacial e temporal da precipitação, com totais médios anuais entre 400 mm a 800 mm e uma evaporação que, em anos mais críticos, chega a ultrapassar cinco vezes a altura da precipitação (Varejão-Silva et al., 1984). Neste ambiente, com um processo desordenado de ocupação territorial que data da época colonial, ocorrem reflexos que se manifestam pela degradação dos seus recursos naturais e que hoje atingem níveis críticos de sustentabilidade, a exemplo de: assoreamento dos cursos d'água, com prejuízos para a saúde humana e animal, menor disponibilidade de água para irrigação e para abastecimento, redução da produtividade agrícola, diminuição da renda líquida dos agricultores e, conseqüentemente, empobrecimento do meio rural, com reflexos danosos para a economia nacional (Manzatto et al., 1998).

Este processo de degradação das terras das regiões áridas, semiáridas e subúmidas do Planeta é chamado, hoje de desertificação, representando uma preocupação mundial pois atinge mais de 1 bilhão de habitantes, em mais de 100 países, destruindo terras e pondo em risco a sobrevivência das pessoas (PAN-BRASIL, 2005; Souza, 2009). A área de estudo, a bacia hidrográfica do rio Taperoá no Cariri Paraibano, é parte das terras da região semiárida brasileira classificadas com nível de desertificação severo (Sá et al., 2002; PAN-BRASIL, 2005).

Apesar de ter havido uma pressão menor pela utilização dos campos, nessas últimas décadas, com o êxodo rural provocado pelo declínio das atividades agrícolas tradicionais (algodão e gado), a pressão sobre o Bioma Caatinga continua grande. É crescente a

demanda por carvão e lenha, por parte dos polos gesseiro e cerâmico do Nordeste e do setor siderúrgico, além da demanda difusa de inúmeras indústrias de pequeno e médio portes e residências, como mostra o trabalho do Ministério do Meio Ambiente – Portalbio (MMA, 2010).

Inúmeros trabalhos apontam que os fatores determinantes do desequilíbrio ambiental da região semiárida brasileira, indutores de processos de desertificação, têm sido o uso indiscriminado de madeira, lenha e carvão; o pastejo intensivo de animais; o fogo; o uso e o manejo irracional das terras pela agricultura, com e sem irrigação; a mineração; a ocupação desordenada das cidades, além do baixo nível de renda e cultural da população (Sampaio et al., 2003; Oliveira-Galvão e Saito, 2003; Sarmiento, 2001).

Na atualidade, com o desenvolvimento das tecnologias de sensoriamento remoto e da geoinformática, as ferramentas para a realização de inventários e diagnósticos ambientais são facilmente disponíveis e de baixo custo permitindo auxiliar com agilidade, o monitoramento e a gestão de amplos territórios (Florenzano, 2002; Novo, 2008). Desta forma, este trabalho, fazendo uso dessas novas tecnologias, pretende ser uma contribuição à análise do ambiente semiárido reunindo informações sobre vegetação, relevo e solo, num modelo estimativo da degradação da paisagem, como explicitam os objetivos a seguir.

2. OBJETIVOS DA PESQUISA

2.1. Objetivo geral

Propor um modelo estimativo e mapear a degradação das terras da bacia hidrográfica do rio Taperoá.

2.2. Objetivos específicos

1. Selecionar um índice espectral de imagem de satélite que melhor estime os padrões de vegetação da Caatinga e os diferentes tipos de uso da terras da área de estudo;
2. Classificar e mapear a vegetação da Caatinga, estimar a biomassa lenhosa e o grau de degradação da cobertura vegetal;
3. Mapear a declividade das terras;
4. Estimar e mapear a erodibilidade dos solos; e
5. Classificar e mapear a degradação das terras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O Bioma Caatinga

O Bioma Caatinga caracteriza-se por apresentar grande diversidade de paisagens, principalmente quanto à densidade e ao porte das plantas (Carvalho e Freitas, 2005). Os padrões morfológicos da vegetação dependem das condições edafoclimáticas locais podendo apresentar-se desde um porte arbóreo e denso, a arbustivo aberto. Com frequência em áreas mais impactadas a densidade de plantas lenhosas diminui predominando gramíneas e cactáceas. Um dos fenômenos mais espetaculares da Caatinga é a perda da folhagem da maioria das espécies no período de estiagem e sua exuberante recuperação no período das chuvas (Guimarães, 2009). Neste sentido, Alves et al. (2009), se reportam dizendo: “na Caatinga, quando chove a paisagem muda rapidamente, as plantas renascem e se cobrem de folhas dando novamente um aspecto verde à vegetação e o que antes parecia morto e feio, enche-se de vida e beleza”.

O termo “Caatinga”, embora aplicado ao tipo de vegetação é utilizado indevidamente para designar a região geográfica com predomínio de clima semiárido, do Nordeste Brasileiro. Como enfatiza Prado (2003), a região do Semiárido Brasileiro inclui áreas com vegetação típica de Cerrado, como a chapada do Araripe; áreas serranas com floresta caducifólia e serras úmidas, chamadas “brejos”, com vegetação de floresta tropical subperenifólia. Para Andrade-Lima (1996), é mais apropriado chamá-las de “Caatingas”, uma vez que, esta inclui várias fisionomias diferentes de vegetação, bem como numerosas fáceis (diferentes padrões relativos ao porte e densidade).

Modelos classificatórios especificamente para a vegetação da Caatinga, baseados nos seus aspectos fisionômicos, ecológicos ou florísticos têm sido usados, a exemplo dos propostos por Andrade-Lima (1981), Fernandes (1996), Rodal (1992) e Sampaio e Rodal (2000). Contudo, pela diversidade dos métodos e os tratamentos dos dados observados têm impossibilitado a síntese de um modelo de classificação abrangente com resultados satisfatórios (Sampaio e Rodal, 2000).

Procurando utilizar-se das relações entre características dos solos, clima e vegetação, os trabalhos de levantamento dos solos no Brasil têm incorporado, às suas descrições, a fase de vegetação. Para o ambiente semiárido nordestino, representado do menor ao maior grau de aridez, a vegetação é assim classificada: Floresta Subcaducifólia,

Floresta Caducifolia, Caatinga Hipoxerófila e Caatinga Hiperxerófila (BRASIL, 1972). Associados aos termos Caatinga hiper e hipoxerófila, nesses trabalhos de descrição de solos também foram descritos os aspectos relativos ao porte (arbóreo ou arbustivo) e à densidade de plantas (densa ou aberta).

Com o objetivo de inventariar a biomassa da vegetação da Caatinga a partir de índices espectrais de imagens de satélite, Chaves et al. (2008), propuseram uma classificação morfoestrutural baseada na composição das plantas, quanto ao porte e na densidade do recobrimento do terreno. Para uma condição de máxima preservação (Caatinga arbórea muito densa), o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL) é considerado igual à unidade. Para um mesmo ambiente edafoclimático, a biomassa lenhosa de um bosque de vegetação pode ser estimada a partir da descrição da vegetação ao nível de subclasse.

2.1.1. Aspectos geomorfológicos e pedológicos

A geologia no ambiente semiárido é muito variável porém com predomínio de rochas cristalinas. Em menor proporção, se encontram áreas sedimentares nas áreas do cristalino; contudo, com uma cobertura pouco espessa de sedimentos arenosos ou areno-argilosos. Em consequência da diversidade de material de origem, do relevo e da intensidade de aridez do clima, ocorrem diversas classes de solo no semiárido. Estas, quando em grande extensão, são formadas de solos jovens de baixo a médio grau de desenvolvimento embora em menor proporção, se possa encontrá-las, a partir de sedimentos residuais do Cretáceo e Terciário, solos mais evoluídos e profundos (Jacomine, 1996; Rebouças, 1999).

Em termos gerais, a maioria dos solos do semiárido apresenta características químicas adequadas mas possuem limitações físicas, relacionadas à topografia, profundidade, pedregosidade e drenagem (Oliveira et al., 2003; Francisco, 2010).

Os Luvisolos, de grande representatividade nas áreas mais afetadas pela seca, principalmente no estado da Paraíba, apresentam baixa permeabilidade e são muito suscetíveis à erosão. Os Neossolos Litólicos são pouco desenvolvidos, rasos ou muito rasos, normalmente pedregosos e rochosos. Ocorrem na região semiárida em relevos ondulados a fortemente ondulados ou acidentados, por isto são muito susceptíveis à erosão. Os Planossolos possuem profundidade média que, em geral, não ultrapassa 100 cm. As camadas superficiais geralmente apresentam textura arenosa ou média, com horizonte B ou

C apresentando textura argilosa muito dura conferindo drenagem ruim; verifica-se presença de rochas degradadas no material argiloso e transição abrupta entre as camadas. Esses solos são comuns nas partes mais baixas do relevo, em situação plana a suave ondulada. Os Solonetz Solodizados possuem o diferencial de apresentarem, naturalmente, altos teores de sais, sendo impróprios para a agricultura devido à presença de sódio (Jacomine, 1996; Ribeiro et al., 2009).

Em grande parte, os Luvisolos, Planossolos e Neossolos Litólicos são os solos mais presentes nas áreas degradadas do Nordeste e, como observaram Ribeiro et al. (2009), apresentam uma ou mais características que determinam a susceptibilidade à erosão, quais sejam: altos teores das frações silte + areia fina nos horizontes superficiais; baixos teores de C orgânico; ausência de estrutura no horizonte superficial; presença de crostas superficiais; transição abrupta, com grande aumento textural, próximo à superfície; baixa condutividade hidráulica dos horizontes subsuperficiais; elevada saturação por sódio; alto grau de dispersão da fração argila; alta densidade do solo; e pequena profundidade efetiva.

2.1.2. Aspectos climáticos

Os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no Nordeste Brasileiro podem ser classificados, segundo Molion e Bernardo (2000), em de grande escala, responsáveis por cerca de 30 a 80% da precipitação observada, dependendo do local, e mecanismos de meso e microescalas, que completam os totais observados. Dentre os mecanismos de grande escala, se destacam os sistemas frontais e a zona de convergência intertropical (ZCIT). Perturbações ondulatórias no campo dos ventos Alísios, complexos convectivos e brisas marítima e terrestre que fazem parte da meso escala, enquanto circulações orográficas e pequenas células convectivas se constituem fenômenos de microescala.

As precipitações ao sul da região semiárida nordestina que ocorrem no verão (dezembro-fevereiro) são decorrentes das “frentes frias” que formam a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Posteriormente, no outono-inverno (abril-julho), essas frentes se deslocam mais para nordeste, passando a atuar na costa leste brasileira, formando a ZCEN (Zona de Convergência Leste do Nordeste) provocando instabilidade e aumento da umidade do ar transportado pelos Alísios (Molion e Bernardo, 2000).

A natureza no semiárido traz, em si, a marca da escassez hídrica. Do ponto de vista climático, a definição de semiárido vem da classificação do clima de Thornthwaite, que

tem por base o Índice de Aridez (IA), razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial (Souza Filho, 2011).

A ocorrência de chuva no semiárido é marcada por sua grande variabilidade espacial e temporal. A precipitação média anual na região Nordeste pode variar espacialmente de 400 a 2.000 mm ano⁻¹. O limite da semiaridez é considerado para valores médios anuais de precipitação, iguais a inferiores a 800 mm ano⁻¹. Este regime de chuvas se dá sob pronunciada sazonalidade, com a precipitação ocorrendo praticamente sobre um período do ano. Esta pluviosidade relativamente baixa e irregular, é concentrada em uma única estação de três a cinco meses caracterizada, ainda, pela insuficiência e pela irregularidade temporal e espacial (Souza Filho, 2011; Bezerra, 2002). Adicionalmente, ocorre uma variabilidade interanual significativa que impõe secas e cheias severas, sobreposta à variabilidade plurianual que produz sequências de anos secos ou úmidos.

No Semiárido brasileiro também existem diferenças marcantes do ponto de vista da precipitação anual de uma região para outra apresentando, em algumas regiões, valores inferiores a 400 mm.ano⁻¹ como, por exemplo, na região do Cariri, Estado da Paraíba (Sandi e Heringer, 2001).

O principal fator limitante do desenvolvimento no semiárido brasileiro é a água; não propriamente pelo volume precipitado mas pela quantidade evaporada (Bezerra, 2002). Enquanto a temperatura, a radiação solar e os aportes de nutrientes nos ecossistemas do semiárido variam relativamente pouco no ano, a precipitação comumente ocorre em eventos descontínuos em forma de pulsos de curta duração (Noy-Meir, 1973). As variações climáticas, sobretudo nos períodos de estiagem, agravam um conjunto de questões econômicas e sociais, que desestruturam os sistemas produtivos (Bezerra, 2002).

Temperaturas médias elevadas entre 23 e 27°C, fortes taxas de evaporação e elevado número de horas de exposição solar (aproximadamente 3.000 horas de sol por ano) tornam esta região especial, dado às elevadas taxas de evapotranspiração, provocando déficit hídrico elevado em boa parte do ano (Bezerra, 2002).

As baixas precipitações anuais constituem o elemento natural que mais chama a atenção no Cariri, o que acaba influenciando o processo de desertificação que se vem estabelecendo em seu território. A localização dessa região exerce papel fundamental na compreensão dos baixos índices pluviométricos aí dominantes (Souza, 2009). O Cariri está situado no fim do percurso dos fluxos úmidos que se direcionam para o semiárido nordestino e em situação de sotavento, fazendo parte da diagonal mais seca do Brasil, com médias pluviométricas de cerca de 500 mm ano⁻¹ (Nimer, 1979). Seu Índice de Aridez varia de 0,05 a 0,20, demonstrando esta particularidade climática da referida região.

Desta maneira e conforme o que observa Nimer (1980), as variações pluviométricas e a instabilidade climática acabam refletindo, para a região, as piores condições relativas às ações autorreguladoras e de autodefesa ambiental (Nascimento e Alves, 2008).

2.1.3. Aspectos sócioeconômicos

Grande parte dos problemas de degradação ambiental das terras nordestinas, segundo Mantovani et al. (1989), se relaciona com a ausência de uma cultura de ocupação de espaços desrespeitando as riquezas e diversidades características dos diversos ecossistemas (Guimarães, 2009).

Das iniciativas existentes quanto ao Cariri paraibano e embora a participação da grande irrigação seja historicamente pequena a construção pelo DNOCS dos açudes de Sumé e Boqueirão no final da década de 1950, acabou viabilizando a instalação de perímetros irrigados, hoje parcialmente comprometidos pelo processo de salinização (Souza, 2009).

Conforme Duque (2008) em 1993, quando mais uma seca veio atingir o semiárido, centenas de trabalhadores rurais de todo o Nordeste ocuparam a sede da SUDENE exigindo providências eficazes para amenizar a situação da população. A partir daí iniciou-se um processo de discussão envolvendo mais de 300 entidades, que culminou com um seminário denominado “Ações Permanentes para o Desenvolvimento do Semiárido Brasileiro”, realizado em maio de 1993 nas dependências da SUDENE. Como desdobramento criou-se o Fórum Nordeste, que se propôs a elaborar um programa de ações permanentes apontando medidas a serem executadas pelo governo para garantir o “desenvolvimento sustentável” do semiárido. Assim, na Paraíba, várias organizações como ONG’s e DETR/CUT³, se reuniam e uniram-se para organizar o Seminário sobre o Semiárido. Este seminário foi o marco de nascimento da Articulação do Semiárido na Paraíba – ASA/PB e a primeira grande iniciativa foi, desde 1993, a divulgação da cisterna de placas e propôs um modelo de desenvolvimento sustentável, ou seja, permite a convivência com o semiárido, ao invés da luta contra a seca.

Mesmo antes da criação da Articulação do Semiárido (ASA) existiam fóruns estaduais de articulação de entidades da sociedade civil com atuação no semiárido. A Cáritas tem participado ativamente da construção da Articulação do Semiárido Paraibano que congrega, em média, 32 entidades (ONG’s, movimentos populares e pastorais sociais),

e tem conseguido alguns avanços na proposição de políticas, na captação e no gerenciamento de recursos públicos para o Semiárido por meio de convênios com a SUDENE e BNB (Cáritas, 2002).

2.2. O processo da desertificação

A degradação da terra pode ser entendida como a deterioração dos solos e recursos hídricos, da vegetação e biodiversidade e a redução da qualidade de vida das populações afetadas (Araújo et al., 2002; Lopes et al., 2010).

Para Sousa et al. (2007), por degradação da terra se entende a redução ou a perda da produtividade biológica ou econômica das terras agrícolas em zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, devido aos sistemas de utilização da terra ou por um processo ou, ainda uma combinação de processos, incluídos os resultantes de atividades humanas e padrões de povoamento, tais como: a erosão do solo causada pelo vento ou pela água; a deterioração das propriedades físicas, químicas e biológicas ou das propriedades econômicas do solo e a perda duradoura da vegetação natural.

A degradação, sobretudo nos níveis mais graves, provoca impactos sociais, econômicos, culturais, políticos e ambientais, os quais se relacionam entre si e que ao longo dos anos se veem intensificando, o que tem reduzido a cobertura vegetal, a perda da fauna silvestre e produzido severas perdas econômicas. Para que os riscos de degradação das terras sejam reduzidos é necessário utilizar técnicas que sejam ecologicamente favoráveis para a exploração agrícola e pecuária economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis (Sousa et al., 2007).

A desertificação é definida como um processo de degradação das terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante da ação de vários fatores, dentre os quais se destacam as variações climáticas e as atividades humanas (BRASIL, 1999). De forma mais abrangente, a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD), define a degradação das terras como “a redução ou perda da produtividade biológica ou econômica das terras agrícolas de sequeiro, das terras agrícolas irrigadas, das pastagens naturais, das pastagens semeadas, das florestas e das matas nativas, devido aos sistemas de utilização da terra ou a um processo ou combinação de processos incluindo os que resultam da atividade do homem e das suas formas de ocupação do território, manifestando-se como: erosão do solo, causada pelo vento e/ou pela água; deterioração das propriedades

físicas, químicas e biológicas ou econômicas do solo e destruição da vegetação por períodos prolongados”.

No Brasil, as áreas mais susceptíveis à desertificação se localizam na região do semiárido nordestino, que segundo o INSA/IBGE (2010), tem uma área de 980.133 km² e onde vivem cerca de 22,6 milhões de pessoas, que representam 42,6 % da população do Nordeste ou 12% da população brasileira. É, assim, uma das regiões semiáridas mais populosas do mundo e se caracteriza por evapotranspiração potencial elevada, ocorrência de períodos de secas, solos de pouca profundidade e reduzida capacidade de retenção de água, o que limita consequentemente seu potencial produtivo. Todos esses elementos conjugados evidenciam um ecossistema muito frágil cujo desequilíbrio se agrava, principalmente, devido à degradação da cobertura vegetal com a exploração predatória de madeira e lenha, o uso e o manejo incorreto das terras com agricultura e pecuária, as queimadas e os incêndios (Accioly, 2000; Sampaio et al., 2003; Accioly et al., 2005).

O uso e o manejo inadequado das terras têm degradado os solos, acelerando o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente, particularmente nas regiões semiáridas do Nordeste brasileiro onde a vulnerabilidade ambiental é acentuada pelos limites restritivos dos atributos dos solos e a intensidade das variáveis climáticas (Chaves et al., 2010).

A relação entre a pobreza e os processos de desertificação constitui tema amplamente debatido, identificando-se a pobreza como fator resultante dos processos de desertificação e, simultaneamente, como fator realimentador (PAN-BRASIL, 2005).

Para Marengo (2008), a irregularidade das chuvas é um obstáculo constante ao desenvolvimento das atividades agropecuárias e as faltas de sistemas eficientes para o armazenamento e uso racional da água, intensificam ainda mais os efeitos sociais. Para este autor, a frequência e a intensidade dos ciclos de estiagens e secas colaboram para desarticular as já frágeis condições de vida de pequenos produtores e outros grupos mais pobres tornando-se, muitas vezes, o gatilho para o abandono da região.

A combinação dos elementos de pobreza e desigualdade promove nas Áreas Susceptíveis à Desertificação (ASD), uma aceleração evidente dos processos de degradação. As pessoas, ou comunidades, submetidas a tais condições, tendem em busca de sua sobrevivência ou da superação de sua condição de fragilidade, à pressionar a base de recursos aumentando, assim, os impactos negativos nas esferas ambiental, econômica e social (PAN-BRASIL, 2005).

Sampaio e Sampaio (2002), analisam a desertificação como um processo dinâmico, de difícil compreensão, uma vez que se entrelaçam causas e efeitos formando um quadro de interpretação muito complexa.

Tradicionalmente, o processo de ocupação do semiárido nordestino tem levado a uma degradação contínua do ambiente. Nos Cariris da Paraíba o sistema de produção, apoiado no binômio algodão x gado, o reflorestamento com algaroba e a implantação de pastagem com capim “Buffel” (*Cenchrus Ciliaris* L.), incentivados pelo governo nos anos sessenta a oitenta do século passado, contribuíram em grande parte para o desmatamento indiscriminado da Caatinga. Essas práticas contribuíram em diferentes níveis para a aceleração da erosão dos solos e quase sempre estão associadas às áreas mais degradadas dos núcleos de desertificação do Estado (Sampaio et al., 2003; Oliveira-Galvão e Saito, 2003; Sarmiento, 2001).

Com a derrocada da agropecuária do Estado a partir dos anos noventa, o êxodo rural se intensificou e o abandono de muitas áreas agrícolas e de pastagem tem possibilitado a recuperação da vegetação nativa. Contudo, sem nenhum plano de manejo ou de recuperação florestal essas áreas de Caatinga continuam sendo utilizadas levando ao empobrecimento da vegetação nativa e uma baixa cobertura do solo, segundo Paes-Silva et al. (2003), resultando na aceleração do processo erosivo nesta região particularmente em áreas de solos rasos e topografia ondulada.

Analizando os atributos dos solos relacionados às áreas mais degradadas do Nordeste, Ribeiro et al. (2009), observaram que, estes têm em comum, uma ou mais características que determinam maior erodibilidade, dentre as mais importantes: altos teores das frações silte+areia fina nos horizontes superficiais; baixos teores de C orgânico; gradiente textural abrupto próximo à superfície; elevada saturação por Na^+ ; baixa condutividade hidráulica dos horizontes subsuperficiais; e pequena profundidade efetiva. Concluindo suas análises os autores identificaram que as classes de solo predominante nas áreas degradadas são os Luvisolo, Planossolo e Neossolo e que apresentam um ou mais atributos relacionados ao caráter vértico, lítico e solódico.

Neste contexto, a Paraíba ocupa como o segundo Estado Nordestino, com o maior número de municípios incluídos na área do semiárido. De acordo com os dados do Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN-BRASIL, 2005), pelo menos 150 municípios paraibanos (região semiárida), cerca de 67,26%, estão susceptíveis à desertificação; desta forma, cerca de 1,4 milhão de pessoas enfrenta este problema.

2.3. O sensoriamento remoto e a geoinformática em estudos ambientais

Segundo Novo (2008), o sensoriamento remoto pode ser definido como a aquisição de informações sobre um objeto a partir de medidas feitas por um sensor que não se encontra em contato físico direto com ele. Para Florenzano (2002), é uma tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. Para Barbosa (1996), o sensoriamento remoto é uma técnica que envolve a detecção, identificação, classificação, delineamento e análise dos aspectos e fenômenos da superfície terrestre, usando imagens adquiridas de aviões e satélites, ao longo de várias técnicas de interpretação ópticas e/ou computadorizadas.

Das diversas contribuições do sensoriamento remoto, a detecção qualitativa e quantitativa da vegetação verde é uma das mais importantes. Índices espectrais de imagens são utilizados (Índices de Vegetação - IV), visando maximizar as características relacionadas ao dossel verde das plantas e minimizar as interferências de efeitos atmosférico e da superfície (Oliveira et al., 2009).

A importância do sensoriamento remoto como ferramenta para avaliar os processos de desertificação fica mais evidente quando se verifica que um dos quatro indicadores recomendados pela ONU para avaliar o problema é o índice de vegetação derivado de imagens de satélite, o chamado NDVI - Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (UNITED NATIONS, 2001; Moreira, 2004; Menezes e Netto, 2001).

O geoprocessamento que evoluiu do sensoriamento remoto se apresenta como uma tecnologia de custo relativamente baixo podendo em um país de dimensão continental, como é o Brasil, suprir a grande carência de informações adequadas à tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais (Pontes, 2002).

As ferramentas computacionais para o geoprocessamento, chamadas Sistemas de Informação Geográfica – SIG, permitem coletar, checar, integrar e analisar dados e informações relacionadas com a superfície da Terra. Esses dados podem ser oriundos de diferentes fontes, tais como: imagens de satélite, cartas topográficas, cartas de solo e vegetação, hidrografia, dados de senso etc. Cada uma dessas fontes e seus diferentes atributos, são armazenados em um banco de dados utilizado para gerenciar de maneira estruturada, esta grande quantidade de informações (Santos e Silva, 2004).

O objetivo principal de um SIG é processar informações espaciais. Desta forma, deve ser capaz de criar abstrações digitais do real, manejar e armazenar eficientemente

dados, de forma a identificar o melhor relacionamento entre as variáveis espaciais, possibilitando a criação de relatórios e mapas para a compreensão desses relacionamentos (Calijuri e Rohm, 1993; Ribeiro et al., 2000).

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), se destaca na criação e desenvolvimento do SPRING, um programa computacional que tem, como objetivo, o tratamento computacional de dados geográficos. Atualizado e de fácil compreensão, que utiliza um modelo de dados orientados para estudos ambientais e cadastrais (Câmara et al., 1996; Lopes, 2002; Silva et al., 2010).

O SPRING trabalha em ambientes Unix e Windows que administra tanto dados vetoriais como dados matriciais (raster), realizando e unificando a integração de dados num SIG, que promove um ambiente de trabalho através da combinação de menus e janelas com uma linguagem espacial facilmente programável pelo usuário. Esta linguagem é chamada de LEGAL (Linguagem Espaço-Geográfico baseada em Álgebra) e realiza operações algébricas de mapas tanto em sentido matemático quanto cartográfico e espacial possuindo uma interface direta com tabelas de um banco de dados relacional podendo, assim, gerar novos dados (Lopes, 2002; Moreira, 2005; Guimarães, 2004; Francisco, 2010).

A Agência Espacial Norte Americana (NASA) obteve por meio da SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), os dados altimétricos da superfície através da técnica de interferometria. Esses dados, espacializados em malha de pontos a cada 90 metros, são disponíveis em meio eletrônico permitindo, com o uso de aplicativos de um SIG, efetuar a modelagem do relevo da superfície terrestre (Crepani e Medeiros, 2005).

A declividade do terreno é um parâmetro importante para a avaliação das terras além de que é um atributo facilmente identificável e determinável (Francisco, 2010). É uma característica marcante da paisagem pois define níveis de estabilidade dos seus componentes físico-químicos e biodinâmicos podendo servir também de referência para separar ambientes (Francisco et al., 2012).

Neste caso, para a representação de uma superfície real são indispensáveis a elaboração e a criação de um modelo digital, que pode estar representado por equações analíticas ou uma rede (grade) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno. Um modelo numérico de terreno (MNT) é uma representação matemática da distribuição espacial de determinada característica vinculada a uma superfície real (Araújo et al., 2008). Através do modelo numérico do terreno é possível calcular volumes, áreas, gerar imagens (sombreadas e em nível de cinza), e gerar mapas de declividade, dentre outros produtos e representações.

2.3.1. Características espectrorradiométricas

Um dos objetivos do sensoriamento remoto é identificar as características do terreno, obtidas através do fluxo radiante que é refletido em diferentes comprimentos de onda (Slater, 1980).

A radiação eletromagnética (REM) é o elo de ligação entre os objetos da superfície terrestre e os sensores remotos. Desta forma, o entendimento sobre o funcionamento das interações entre a REM e os diferentes materiais (rocha, solo, água, vegetação e superfícies edificadas) constitui-se em requisito chave para a interpretação dos dados coletados pelos diferentes sensores (Alvarenga et al., 2003). A interação da REM com os alvos na superfície da Terra se dá à nível microscópico, envolvendo atributos atômicos e moleculares das matérias constituintes dos alvos expostos à radiação (Meneses, 2001).

A extração de informações contidas em imagens multi ou hiperespectrais se fundamenta no conhecimento sobre como cada objeto sensoriado se comporta com relação aos fenômenos de absorção, emissão e reflexão da REM com eles interagida permitindo, então, analisar os componentes e as condições dos objetos estudados (Alvarenga et al., 2003).

A cobertura vegetal vem sendo estudada ao longo de séculos, segundo os mais diferentes níveis de abordagem, que incluem estudos taxonômicos, botânicos, fisiológicos, fitossociológicos e outros. Desde a descoberta de que os vegetais extraem da radiação eletromagnética emitida pelo Sol parte da energia de que necessitam para viver, a interação passou a ser estudada detalhadamente. Uma das ciências que mais contribuíram e ainda vem contribuindo e motivando o avanço nos conhecimentos de como a vegetação processa a radiação eletromagnética, é o sensoriamento remoto (Ponzoni, 2001; Brandelero, 2010).

Segundo Moreira (2005), a radiação solar que chega à superfície da terra, ao atingir as plantas, interage com essas e resulta em três frações: aproximadamente 50% do total da radiação que chega até o planeta são absorvidas pelos pigmentos contidos na folha e participam na síntese de compostos ricos em energia, altera estruturas moleculares, acelera reações, como a foto-oxidação das xantofilas ou ainda, destrói estruturas de uma molécula; outra parte é refletida pelas folhas, fenômeno denominado reflexão; a terceira parte sofre o processo de transmissão das camadas de folhas que compõem a copa e daquelas que constituem a folha.

De acordo com Moreira e Assunção (1997), dentre os diversos órgãos vegetais a estrutura de maior importância é a folha dado que nela ocorre a interação da radiação

eletromagnética para a conversão da energia solar em energia química na produção de carboidratos. No período úmido, com a presença da água, ocorre desenvolvimento do mesófilo, a alta produção da fotossíntese pelos cloroplastos e o aumento do dossel.

Segundo Rosendo (2005), na região espectral do infravermelho uma vegetação verde e sadia é caracterizada por alta reflectância, alta transmitância e baixa absortância quando comparada ao visível.

Desta forma, a diferença nos valores dos pixels entre o período seco e o úmido permite separar o comportamento da fitofisionomia da Caatinga. Para o primeiro período a vegetação com menor biomassa foliar e para o segundo período, o aumento da atividade fotossintética, resultado da maior quantidade de biomassa foliar (Oliveira et al., 2009).

O comportamento espectral de um alvo pode ser definido como sendo a medida da reflectância desse alvo ao longo do espectro eletromagnético. Em cada faixa do espectro eletromagnético a radiação eletromagnética interage com a vegetação, de maneira diferenciada (Brandelero, 2010). Como apresenta Maldonado (2004) na Figura 1 está demonstrado o comportamento espectral da folha verde.

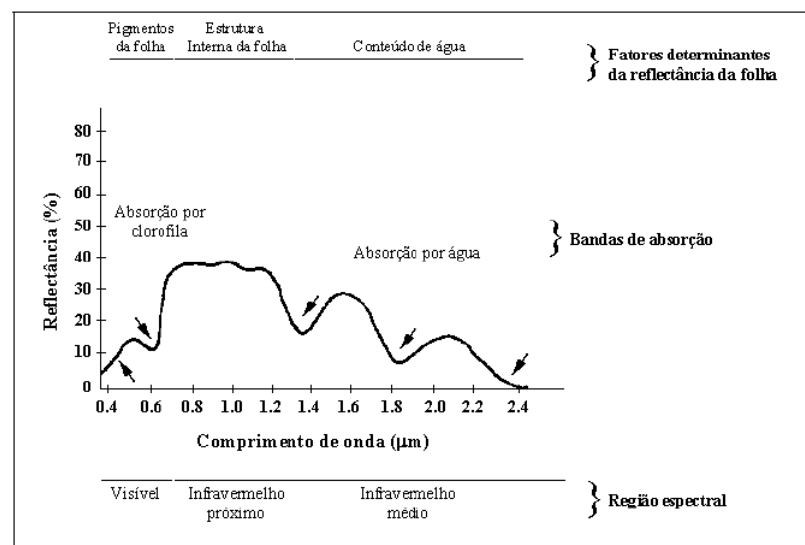


Figura 1. Comportamento espectral da folha verde.

Fonte: Maldonado (2004).

Combinações entre bandas espectrais têm sido utilizadas como forma de minimizar os efeitos das propriedades ópticas da superfície do solo, geometria de visada e de iluminação, tal como dos fatores meteorológicos (vento e nuvens) sobre as respostas radiométricas da vegetação. Neste sentido Leblon (2011), afirma que um índice de vegetação ideal deve ser sensível à cobertura vegetal e não ao solo e que os dados de

reflectância usados para computar a vegetação devam ser preferencialmente corrigidos radiometricamente e atmosféricamente.

Todos os índices de vegetação partem do pressuposto de que cada tipo de solo apresenta uma curva de resposta espectral característica (linha do solo), que se modifica a medida em que a presença da vegetação passa a interferir e posteriormente a predominar sobre a superfície do solo (linha da vegetação). Desta forma, os índices de vegetação resultam de parâmetros relacionados a essas linhas de reflectância, obtidas de duas ou mais bandas espectrais do espectro eletromagnético, através de soma, de razão entre bandas, da diferença ou de qualquer outra combinação (Banman, 2001; Wiegand et al., 1991, citado por Moreira, 2005).

Para Ferreira (2006), índices de vegetação são transformações espectrais de duas ou mais bandas com o propósito de realçar o sinal da vegetação e permitir intercomparações espaço-temporais confiáveis da atividade fotossintética e das variações nos parâmetros estruturais do dossel. Segundo Jackson e Huete (1991), é provável que os índices de vegetação sejam a maneira mais simples e eficiente de se realçar o sinal verde ao mesmo tempo em que minimizam as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato sobre o dossel vegetal.

Segundo Maldonado (2005), a vegetação do semiárido apresenta marcada sazonalidade e épocas intermediárias onde há muitas espécies vegetais ainda sem folhagem. Produzidas, em parte, pelo comportamento vegetativo regular de várias espécies que apresentam relativa independência dos eventos climáticos, o que é conhecido como estabilidade fenotípica. Essas espécies estáveis caracterizam a resposta sazonal da vegetação e não respondem às primeiras chuvas permanecendo com baixa atividade de crescimento seguindo, inclusive outros indicadores, como o fotoperíodo. Outras espécies, contudo, cujo ciclo vegetativo acompanha a irregularidade climática, aproveitam rapidamente o aumento da umidade. Estratégia que caracteriza o comportamento das espécies pioneiras na reconquista de terrenos modificados. Tal heterogeneidade de respostas sazonais caracteriza o semiárido e dificulta seu estudo espectral.

É importante, porém considerar algumas particularidades da resposta espectral da vegetação da Caatinga na época da seca. A baixa atividade fotossintética refletida pelo aspecto seco dos estratos que compõem as fácies de Caatinga, faz com que a resposta espectral desta formação tenha um importante componente de sombreamento da porção lenhosa (troncos e galhos). Deve-se usar, frente a este panorama ambiental complexo bandas espectrais sensíveis na mesma proporção aos dois tipos de vegetação presentes na cena. Em Maldonado (1999), foram analisadas, do ponto de vista espectral, imagens

ópticas da Caatinga na época seca observando-se que as regiões espectrais do vermelho e do infravermelho estão correlacionadas.

O autor afirma que para a região do semiárido deve ser investigado, separadamente, o comportamento espectral da vegetação em períodos sazonais distintos (Figura 2).

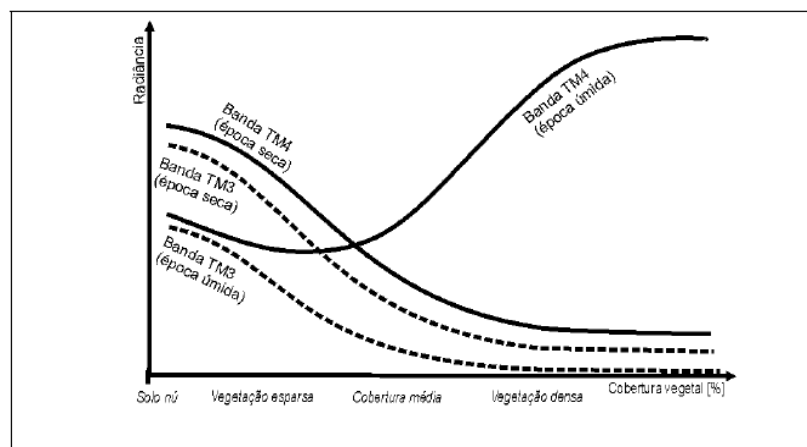


Figura 2. Comportamento das bandas TM3 e TM4 na época seca e úmida.

Fonte: Maldonado (2004).

Maldonado (2005) mostra, na Figura 2, que a resposta radiométrica da vegetação da Caatinga, na época seca, apresenta comportamento semelhante e diminui com o aumento da biomassa da vegetação, sendo ligeiramente maior na banda 4 do que na banda 3. Contudo, para o período úmido a radiação da banda 4 tende a aumentar com o aumento da biomassa enquanto na banda 3, diminui. Este comportamento radiométrico já foi observado para a Caatinga, por Kazmierczak (1993), em relação ao NDVI.

2.3.2. Índices de vegetação

A utilização de índices de vegetação gerados de imagens de satélites se constitui em ferramentas importantes para o monitoramento das alterações naturais ou produzidas pelo homem nos ecossistemas (Feitosa et al., 2004). Os índices de vegetação ressaltam o comportamento espectral da vegetação possibilitando distinguir diferentes tipos de uso e de outros alvos da superfície terrestre (Moreira, 2005).

Embora muitos índices de vegetação existam, o mais usado e conhecido atualmente é o denominado Índice de Vegetação da Diferença Normalizada ou simplesmente NDVI. No caso da imagem LANDSAT-5 TM, as bandas utilizadas são, respectivamente, a banda 4 (infravermelho) e a banda 3 (vermelho).

O NDVI foi proposto por Rouse et al. em 1973, e tem como proposta reduzir os efeitos multiplicativos da assinatura espectral nas duas faixas espectrais reduzindo também o efeito topográfico (Ponzoni, 2001). O resultado do NDVI é uma imagem com um número menor de informações e ruídos porém com elevado realce da vegetação fotossinteticamente ativa, que permite o monitoramento da densidade e do estado (vigor) da vegetação verde, sobre a superfície terrestre (Costa Filho et al., 2007; Martins et al., 2009). Segundo Madeira Netto (2001), este índice é utilizado de forma extensiva para a construção de bases de dados globais.

Matematicamente, o NDVI é calculado pela razão entre a diferença da refletividade da banda 4 (infravermelho próximo) menos a banda 3 (vermelho) pela soma da refletividade dessas mesmas bandas. A seleção dessas duas bandas espectrais se dá pela razão de serem mais afetadas pela absorção da clorofila pela folhagem da vegetação verde e, conseqüentemente, pela densidade dessa vegetação na superfície. A faixa de valores obtida pelo NDVI está entre -1 e $+1$, sendo que o valor zero se refere aos pixels sem vegetação. Uma vegetação sadia em pleno crescimento ativo, isto é, com elevado vigor, tem baixa refletância na faixa do vermelho e alta refletância no infravermelho próximo; deste modo, alto valor de NDVI (Costa Filho et al., 2007).

O SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) é um índice de vegetação proposto por Huete (1988), com o intuito de diminuir a influência da resposta espectral do solo mediante a inclusão de um fator de ajuste (L) que é variável com o grau de recobrimento do dossel das plantas (Ponzoni e Shimabukuro, 2007; Andrade, 2008). As características do solo têm uma considerável influência no espectro de radiação proveniente de dosses vegetais esparsos e, conseqüentemente, no cálculo dos índices de vegetação (Guimarães, 2009; Oliveira, 2009).

O fator L de ajuste do SAVI foi obtido de forma que o índice resultante tivesse o mesmo valor para vegetação, independente se o solo fosse claro ou escuro. Este pode variar de 0 para coberturas vegetais mais densas, a 1 para vegetação menos densa. O valor padrão utilizado na maioria das aplicações é 0,5, que corresponde a uma densidade vegetal intermediária (Allen et al., 2007; Accioly et al., 2002; Boegh et al., 2002; Silva et al., 2005; Di Pace et al., 2008).

O EVI foi proposto por Huete et al. (1997), tendo sido formulado a partir de uma combinação de outros dois índices de vegetação, o SAVI (Huete, 1988) e o ARVI (Atmosphere Resistant Vegetation Index) proposto por Kaufman e Tanré (1992), com a finalidade de atenuar os efeitos do solo e da atmosfera sobre o monitoramento da vegetação. Além disto, alguns trabalhos apontam que o EVI apresenta substancial melhora

na sensibilidade às alterações do dossel em relação ao NDVI, principalmente em áreas de maior densidade de biomassa (Justice et al., 1998; Huete et al., 2002).

2.4. Métodos de coleta e descrição de dados em campo

Em levantamentos florestais, quanto melhor a descrição dos dados de campo para se correlacionar com os dados da análise digital, melhor a precisão e a qualidade das avaliações. Sendo assim, o planejamento do trabalho de campo envolve a definição de métodos e procedimentos a serem adotados, em todas as fases de sua execução (Sá et al., 2008).

As técnicas de amostragem dos dados são agrupadas em aleatória e não aleatória. A aleatória pode ser restrita ou irrestrita e a não aleatória, sistemática e seletiva. Caso a técnica deva manter-se dentro de limites práticos e econômicos e havendo a possibilidade de uma subamostragem da população, a técnica será não aleatória (sistemática ou seletiva), segundo IBGE (2012).

Maldonado (1999; 2005) utilizou o transecto em linha como metodologia de descrição e caracterização da vegetação de Caatinga, e descrições fitofisionômicas simples para a coleta de dados com o objetivo de satisfazer requerimentos variados em áreas de vegetação natural minimizando, sobremaneira, o tempo e o esforço de amostragem.

A amostragem não aleatória seletiva é aquela na qual é estabelecida arbitrariamente a localização das unidades amostrais nos mapas, imagens ou campo. Este critério arbitrário é baseado normalmente nas condições de acessibilidade ou mesmo na habilidade do observador em perceber que determinados locais da área são representativos da população sob estudo (Maldonado, 2005).

De acordo com o IBGE (2012), os métodos para detectar os tipos de vegetação são conforme a distribuição espacial, por quadrados, por parcelas ou por pontos equidistantes, em transectos ou malhas, para separar unidades de solo.

O tipo e o tamanho ideal das unidades amostrais são aqueles que representam com boa precisão, segundo os objetivos, o total da área inventariada (Goldsmith, 1986). Esta amostragem pode ter, como principal objetivo temático, a classificação fisionômica-estrutural da vegetação e, secundariamente a obtenção de informação relevante para estimar a dinâmica da cobertura vegetal.

Conforme o IBGE (2012), é fundamental, para o inventário florestal, a utilização de imagens orbitais para a interpretação, pois depende do planejamento da amostragem, em função de diferentes tipologias florestais detectadas, dos objetivos, do nível de detalhamento, da informação requerida e da escala utilizada, sendo um importante mecanismo, pois não só reduz sensivelmente o trabalho de campo como pode determinar o sucesso ou insucesso do trabalho, como um todo.

Conforme a FAO (1974), a partir da interpretação das imagens, são separados os tipos e feito o planejamento da amostragem; nesta etapa deve-se considerar que nem sempre uma separação dos tipos de vegetação corresponde a uma estratificação volumétrica. Existem diversos métodos para levantamento e classificação de vegetação, em que os métodos convencionais são mais onerosos e demandam grandes períodos de tempo para sua realização, diferente dos métodos modernos, a exemplo das fotografias aéreas e imagens de satélite, que proporcionam reduções significativas de tempo e economia de custo.

Paes-Silva et al. (2003) utilizaram a técnica de amostragem não aleatória e sistemática para realizar o inventário da cobertura vegetal da bacia hidrográfica do açude Namorados, em São João do Cariri, na Paraíba. Com base na planta topográfica (escala 1:10.000 e curvas de nível a cada 5 metros) foram elaborados os mapas da rede de drenagem e o mapa de declividade. Com base nesses mapas, as delimitações das unidades de vegetação foram realizadas tendo por base de localização as classes de declividade do terreno em cada sub-bacia da drenagem. A cobertura vegetal do terreno foi discriminada por tipos, dentre os quais, a vegetação nativa de Caatinga. A vegetação da Caatinga, por sua vez, foi discriminada segundo o porte das plantas e a densidade de recobrimento do terreno. O aperfeiçoamento da descrição da vegetação deste trabalho resultou na metodologia proposta Chaves et al. (2008) para descrever e avaliar a vegetação da Caatinga em seus diferentes estágios de antropização.

2.5. Modelos estimativos da degradação ambiental

O desmatamento, a baixa fertilidade, erosão, salinização e a compactação do solo são fatores de degradação ambiental; um dos modelos mais utilizados para se estimar a degradação é o de erosão dos solos, que pode ser estimada pela equação universal de perdas dos solos - EUPS (Wischmeier e Smith, 1978).

Há vários outros modelos de avaliação da degradação ambiental quantificando, identificando e analisando os ambientes em função de seus diferentes níveis, como exemplo: o Índice de Degradação (ID) desenvolvido por Lemos (1995) e Lemos (2001) pelo método de análise fatorial; o Índice de Susceptibilidade de Degradação Ambiental (ISDA) desenvolvido por Kazmierczak e Seabra (2007) empregado em áreas do cerrado paulista; o Índice de Degradação Ambiental (IDA) por Brandão (2009), quando foram levados em consideração os elementos do quadro natural e o fator antrópico.

Já Candido et al. (2002), estudando parte do Seridó Oriental paraibano, utilizaram na avaliação da degradação ambiental, os parâmetros de vegetação, topografia, solo/geologia, ecologia, mecanização, área agrícola, densidade populacional e pecuarização.

Alguns pesquisadores têm tratado de características da degradação, como Leite et al. (1994, 2003), mapeando a desertificação no Ceará com base em estimativa da cobertura vegetal, vista por satélite incluindo também observações da erosão; no núcleo do Seridó, Costa et al., (2002) trazem uma ampla descrição da cobertura vegetal.

Chaves et al. (2008) afirmam que através do Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa, obtido da descrição da vegetação representativa de uma região fitofisiográfica de estudo, é possível se fazer a estimativa do volume da biomassa da Caatinga e, por comparação, se estimar sua degradação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Como material básico neste estudo foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT 5-TM disponibilizadas pelo INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) da órbita 215 ponto 65, compostas pelas bandas espectrais: B₁- 450 a 520 nm (luz azul); B₂ - 520 a 590 nm (luz verde); B₃ - 630 a 690 nm (luz vermelha); B₄ - 770 a 890 nm (infravermelho próximo), B₅ - 510 a 730 nm (faixa pancromática), B₇ - 1550 a 1750 nm (infravermelho médio), das datas de 28/10/2009 e 24/05/2010, as quais se referem ao dia Juliano (DJ) 301 e 144, horário de captura da imagem de 12:25:28 e 12:25:59, com elevação solar de 63.9934 e 50.3096 e cosZ de 0,8987 e 0,7695 respectivamente.

Utilizando-se um mosaico digital SRTM, fornecido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), dos quadrantes SB24ZB e SB24ZD, com dados de altimetria, para pontos espaçados numa malha quadrada de 90 metros de distância, para se gerar uma base altimétrica da área de estudo.

Como material de apoio foi utilizada a carta topográfica da SUDENE, escala 1:100.000, digitalizada pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro, disponível na AESA (<http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/cad.html>) como também arquivos digitais da rede de drenagem e de bacias hidrográficas disponibilizados pela AESA (<http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/shapes.html>). Também um arquivo digital da Malha Municipal Digital disponibilizado pelo IBGE (2009).

Como referência pedológica foi utilizado um arquivo tipo shape do mapa de solos do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba, na escala de 1:250.000 (PARAÍBA, 2006), em que a área de estudo está representada por unidades de mapeamento, constituídas de associações e inclusões de classes de solos.

De forma auxiliar também foram utilizadas as informações do Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba (PARAÍBA, 1978), do Atlas Geográfico da Paraíba (PARAÍBA, 1985) e o trabalho de Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório - Reconhecimento de solos do estado da Paraíba, realizado por Campos e Queiroz (2006).

Como instrumentos para a obtenção e manipulação dos dados se utilizaram um microcomputador, uma impressora e um aparelho GPS de navegação, com o objetivo de

localizar os diferentes alvos terrestres; também foi utilizada uma câmera digital com resolução de 3 megapixel, com o objetivo de registrar os pontos de controle e auxiliar na descrição das áreas de coleta de dados.

Para a escolha dos pontos a serem visitados no campo, utilizou-se o programa Google Earth 6.2 on-line, através do qual foram selecionadas as áreas de interesse, representativas das unidades geoambientais. As coordenadas dos pontos foram transferidas ao aparelho GPS, servindo de orientação para localização dos pontos no terreno.

O programa GPS Trackmaker Professional Evolution versão 13.4 disponível (<http://www.gpstm.com.br>), foi utilizado para transferir os dados obtidos com o GPS, dos pontos georreferenciados, em formato DXF, para o microcomputador e posteriormente para o SPRING, versão 5.2.2 disponibilizado pelo INPE (<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.php>).

O programa Global Mapper foi utilizado para gerar as curvas de nível da área de estudo. Para a elaboração das imagens dos índices de vegetação foi utilizado o programa ERDAS Imagine 8.5, disponibilizado pelo Laboratório de Geoprocessamento da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande.

Foram utilizados ainda, os módulos IMPIMA, SCARTA e IPLOT do SPRING, com os quais foram feitas as leituras das imagens para a classificação e geração da declividade e, de forma auxiliar, foi utilizado um programa de editoração gráfica para elaboração final dos mapas.

3.2. Descrição da área de estudo

3.2.1. Localização e limites

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Taperoá, com uma extensão territorial de 5.686,37 km², localizada sobre o Planalto da Borborema, na posição central do Estado da Paraíba (Figura 3); seus pontos extremos são cortados pelas coordenadas de 6°51'44" a 7°34'31" de latitude sul e 36°00'10" a 37°14'30" de longitude oeste.

A bacia hidrográfica limita-se, ao norte, com a bacia do rio Seridó, que drena para o Rio Grande do Norte; a nordeste, com as bacias do rio Jacú e Curimataú; a leste, com a sub-bacia do Médio Paraíba; ao sul, com a bacia do Alto Paraíba e a sudoeste, com a bacia

do rio Pajeú, no Estado de Pernambuco. O rio Taperoá, de regime intermitente, nasce na Serra do Teixeira e desagua no açude Presidente Epitácio Pessoa (Boqueirão).

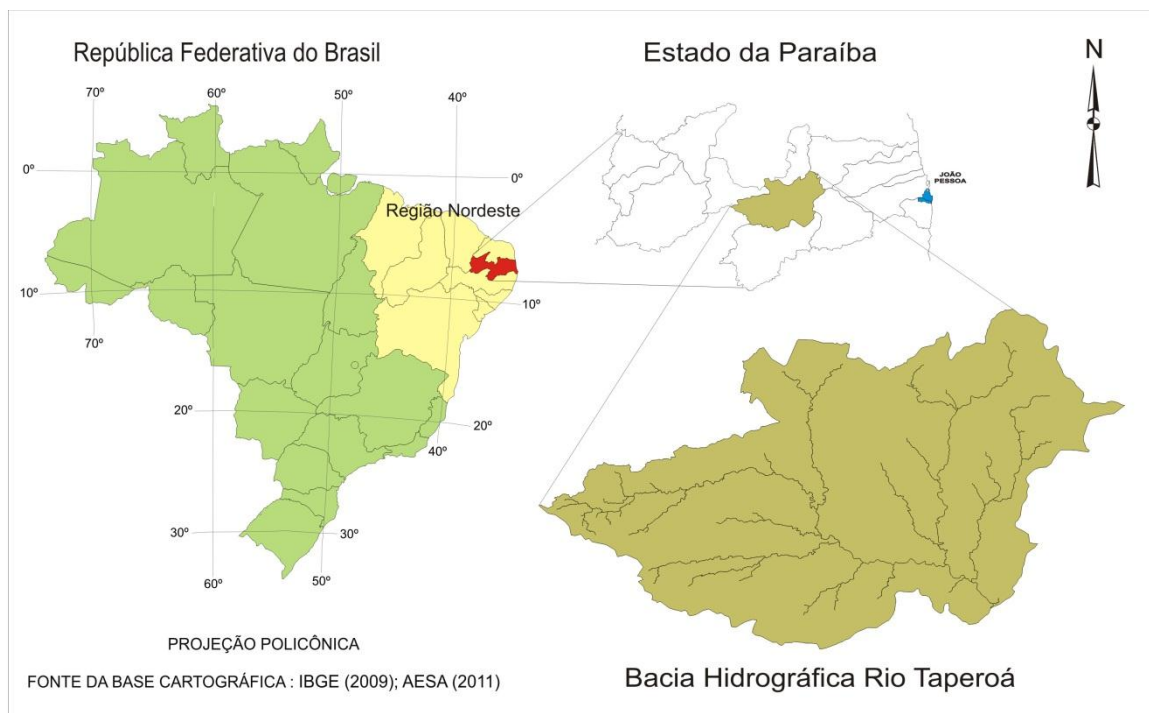


Figura 3. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Adaptado de IBGE (2009); AESA (2011).

3.2.2. Municípios e população

Os municípios que parcialmente fazem parte da área da bacia são: Assunção, Boa Vista, Cacimbas, Cabaceiras, Cubati, Barra de Santa Rosa, Boqueirão, Serra Branca, Juazeirinho, Taperoá, Tenório, Teixeira, Junco do Seridó, Salgadinho, São João do Cariri, Seridó, Pocinhos e Olivedos, e com sua área totalmente integrando a bacia, os municípios de Desterro, Soledade, Livramento, Gurjão, São José dos Cordeiros, Parari e Santo André (Figura 4).

A cidade de Teixeira, sede do município localizado mais a oeste da área, fica a 265 km da cidade de João Pessoa, a capital do Estado. Por outro lado, Campina Grande sede do município limítrofe, a leste da bacia hidrográfica, dista 125 km da capital.

A população total da área de estudo é de 206.476 habitantes conforme o IBGE (2010). Os municípios com maior população que integram a área de estudo, são Pocinhos, Boqueirão, Juazeirinho e Taperoá, e os menores municípios em população, Tenório, Santo André e Parari (Tabela 1).

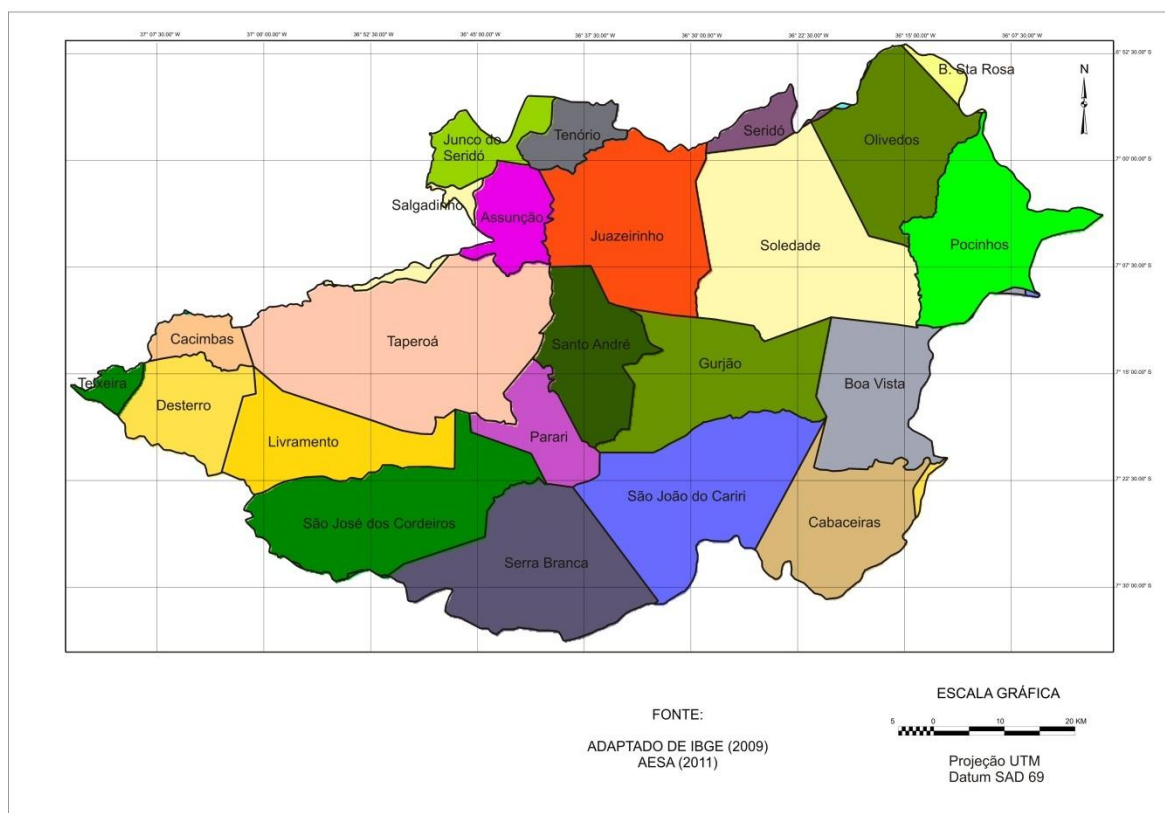


Figura 4. Mapa de municípios da área de estudo. Fonte: Adaptado de IBGE (2009); AESA (2011).

Tabela 1. Municípios e população da área de estudo

Municípios	População	Municípios	População
Pocinhos	17.032	Junco do Seridó	6.643
Boqueirão	16.888	Boa vista	6.227
Juazeirinho	16.776	Cabaceiras	5.035
Taperoá	14.936	São João do Cariri	4.344
Barra de Santa Rosa	14.157	São José dos Cordeiros	3.985
Teixeira	14.153	Olivedos	3.627
Soledade	13.739	Assunção	3.522
Serra Branca	12.973	Salgadinho	3.508
Seridó	10.230	Gurjão	3.159
Desterro	7.991	Tenório	2.813
Livramento	7.164	Santo André	2.638
Cubati	6.866	Parari	1.256
Cacimbas	6.814	Total	206.476

Fonte: IBGE (2010).

3.2.3. Aspectos climáticos

A bacia do rio Taperoá, localizada sobre o Planalto da Borborema, encontra-se situada numa linha de confluência de sistemas meteorológicos que atuam na região Nordeste. A zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o sistema mais importante sistema

formador de chuvas da região norte da Região Nordeste, conhecida localmente como as “chuvas do Sertão”, com período chuvoso entre os meses de fevereiro e maio e o sistema formado pela conjunção da Zona de Convergência Leste do Nordeste (ZCEN), uma extensão das frentes frias do Atlântico Sul, com os ventos Alísios de sudeste, e período chuvoso ocorrendo de abril a agosto (Molion e Bernardo, 2000; Marengo, 2008). Segundo Marengo (2008) as chuvas nesta região são ocasionadas principalmente pelos contrastes entre a temperatura do mar, junto à costa e a temperatura do continente. Os ventos, ao soprar continente adentro, carregam a umidade do oceano que condensa e precipita na faixa litorânea e na região da Zona da Mata, levando umidade até as linhas dos divisores do planalto da Borborema, a barlavento.

Pelos dados da Tabela 2 pode se observar que, na média os meses mais chuvosos, na área da bacia do Taperoá região fisiográfica do Cariri paraibano, são março e abril, justamente o período de atuação conjunta das duas massas de ar que têm influência sobre a região. Chuvas relacionadas aos efeitos orográficos e formações convectivas conforme relatam Molion e Bernardo (2000), influenciam na distribuição espacial e temporal contribuindo para aumentar a variabilidade das precipitações. .

Embora a área da bacia hidrográfica apresente relevo suave, variando em grande parte entre 300m a 500m, conforme pode ser visto na Figura 5, o efeito orográfico se faz sentir, aumentando com a altitude, como mostra a distribuição das isolinhas da precipitação do Atlas Climatológico do Estado (Varejão-Silva et al., 1984). Esses autores mostram, também, que a variabilidade da distribuição da precipitação aumenta com a diminuição dos totais médios anuais, com coeficientes de variação chegando a ultrapassar 35% do valor médio anual.

Os postos pluviométricos com precipitações mais baixas, inferiores a 400 mm.ano⁻¹, na bacia do Taperoá (Tabela 2), normalmente estão em altitudes inferiores a 400 m e formam, juntamente com a região do Raso da Catarina na Bahia, nas margens do rio São Francisco, os núcleos mais secos do Nordeste. Conti (2005) identificou estudando as séries históricas das precipitações da região Nordeste, que essas áreas, dentre outras, apresentam tendência negativa de precipitação o que demonstram maior predisposição a instalação do processo de desertificação.

As médias mensais de temperatura variam pouco na região sendo mais afetadas pela altitude que por variações de insolação. As variações diárias de temperatura e umidade são bastante pronunciadas tanto nas áreas de planície como nas regiões mais altas do planalto. Nos meses mais frios do inverno o aporte de umidade é devido a formação de orvalho significativo (Alves, 2008).

Tabela 2. Dados de precipitação média mensal e anual de postos da área de estudo, para um período mínimo de trinta anos de observação

Município / Posto	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Barra de Santa Rosa	12.5	37.2	74.3	79.0	47.6	41.4	33.4	13.4	7.4	4.7	6.1	7.9	369.7
Boa Vista	26.0	35.2	82.3	69.4	58.7	53.0	45.9	19.2	5.5	6.6	4.3	9.4	416.3
Cabaceiras	15.6	35.1	46.8	61.2	38.8	36.6	33.8	11.3	3.0	3.0	3.0	6.7	333.6
Desterro	35.4	87.6	138.4	120.6	45.9	13.0	7.5	0.5	0.4	2.7	5.6	12.6	498.9
Gurjão	25.1	66.8	97.6	137.8	46.0	35.7	34.0	9.4	3.3	5.9	5.4	10.2	485.5
Juazeirinho	34.5	84.0	111.9	138.6	43.4	21.1	37.8	8.7	2.9	7.6	4.4	16.6	522.3
Olivedos	28.1	56.4	92.2	100.1	61.0	51.1	37.8	15.5	7.2	5.4	6.1	11.0	471.0
Pocinhos	20.7	35.3	60.5	68.6	52.5	51.2	47.1	18.3	9.7	5.3	3.7	8.0	382.3
Soledade	23.0	52.9	94.1	89.5	39.3	33.3	27.8	8.0	2.9	5.7	3.5	9.7	391.2
São José dos Cordeiros	23.6	85.1	145.2	158.5	42.0	35.3	31.5	9.1	3.2	1.9	3.9	15.8	554.5
Salgadinho	32.1	64.8	110.6	106.0	50.0	22.8	17.4	6.6	2.2	2.1	7.1	13.2	435.8
Serra Branca	32.1	76.8	110.8	143.8	38.4	31.8	25.7	9.7	5.6	5.1	5.5	31.8	532.8
São João do Cariri	25.8	54.0	90.4	81.2	48.1	31.0	22.8	6.2	1.8	5.3	6.2	12.0	381.4
Seridó	27.2	97.0	85.4	118.9	45.8	21.8	22.3	3.9	2.5	1.6	2.2	7.6	465.3
Taperoá	34.1	83.0	134.9	109.7	50.5	28.1	20.0	7.5	2.4	4.6	10.5	26.4	505.6
Teixeira	66.9	142.5	215.4	162.9	57.1	24.9	11.2	3.3	2.6	4.8	11.8	32.6	714.6

Fonte: AESA (2011) adaptado da publicação SUDENE - Dados Pluviométricos do Nordeste - Série Pluviometria 5, Recife (1990).

3.2.4. Vegetação e uso da terra

Em toda a área de estudo a vegetação é do tipo Caatinga hiperxerófila. É uma região tradicionalmente pastoril onde tem predominado a criação de caprinos. Outrora esta era uma região com produção expressiva de algodão. Na atualidade, é cultivada com palma e culturas alimentares de subsistência (Souza et al., 2009; Francisco, 2010).

De acordo com Barbosa et al. (2007) e Paes e Silva et al. (2003), as espécies mais encontradas na Caatinga são: a Malva (*Sida galheirensis* Ulbr.), Macambira (*Bromelia laciniosa* Mart. ex Schult. f.), Imburana (*Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B.Gillett), Mandacaru (*Cereus jamacaru* DC.), Xique-xique (*Pilosocereus gounellei* (F.A.C.Weber) Byles & G.D.Rowley), Facheiro (*Pilosocereus pachycladus* F.Ritter), Palmatória (*Tacinga palmadora* (Britton & Rose) N.P.Taylor & Stuppy), Mofumbo (*Combretum leprosum* Mart.), Marmeleiro (*Croton sonderianus* Müll.Arg.), Pinhão (*Jatropha mollissima* (Pohl) Baill.), Pinhão (*Jatropha ribifolia* (Pohl) Baill.), Jureminha (*Desmanthus virgatus* (L.) Willd.), Jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.), Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul), Pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Engl.), Marmeleiro (*Croton sonderianus* Muell. Arg.), Pinhão bravo (*Jatropha molíssima* (Pohl.) Mull Arg.) e outras espécies nativas da região, como o Angico (*Anadenathera macrocarpa* (Benth.) Brenan) a Aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) e o Umbu (*Spondias tuberosa*, L.).

3.2.5. Relevé e geologia

As terras da bacia do rio Taperoá apresentam, em grande parte, um relevo suave ondulado e altitude em torno de 300 e 500 m (Figura 5). A drenagem voltada para sudeste facilita a penetração uniforme das massas atlânticas de sudeste propiciando um gradiente adiabático uniforme, fazendo baixar a temperatura e aumentar a precipitação, a medida que se eleva o terreno. No geral, os terrenos da bacia são formados por superfícies de pediplanação, resultantes da exposição a partir de sedimentos do Cretáceo ou Terciário, que cobriam rochas (gnaisses, granito e xisto) do escudo cristalino brasileiro (Ab'Sáber, 1974).

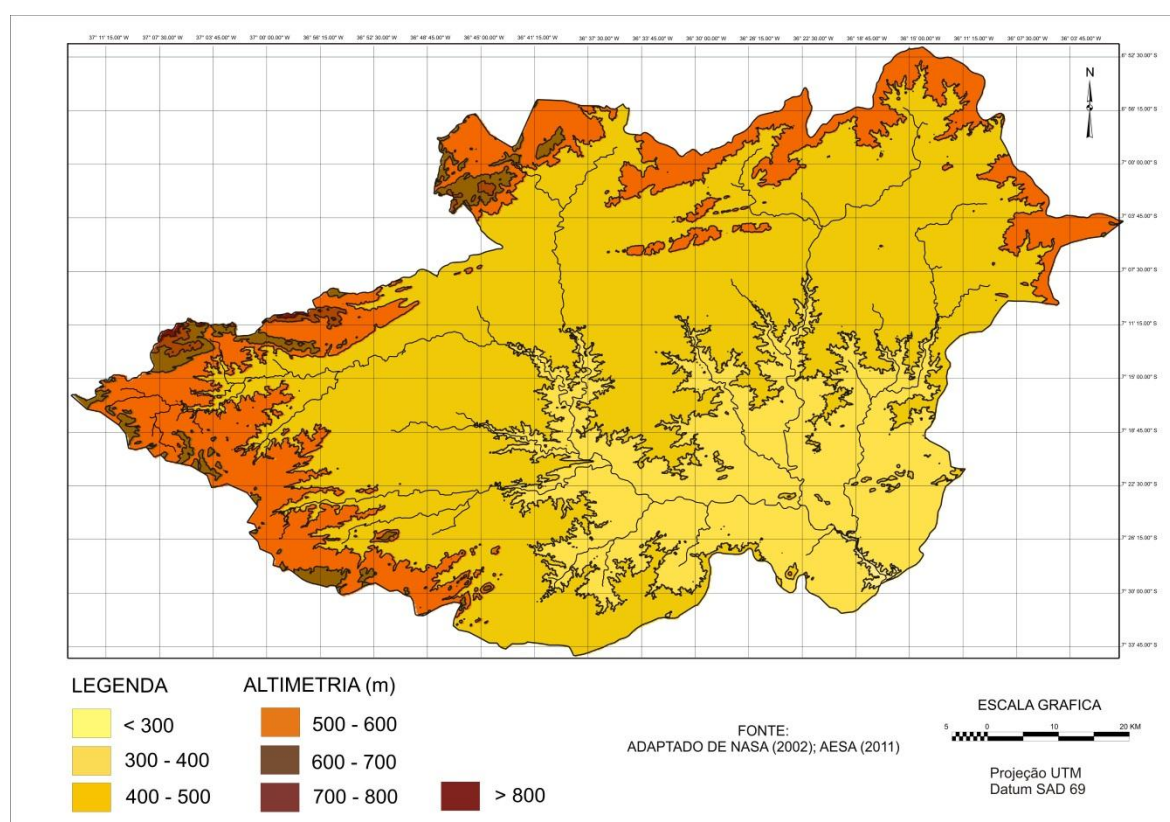


Figura 5. Mapa altimétrico da área de estudo. Fonte: Adaptado de NASA (2002); AESA (2011).

As características do solo da Caatinga estão controladas pelas condições de clima, geomorfologia, quantidade e intensidade da chuva, radiação solar, temperatura, umidade e declividade do terreno bem como pelas comunidades de plantas que nele se desenvolvem (Maldonado, 2005).

Na área de estudo ocorrem rochas pré-cambrianas, sendo complementadas por bacias sedimentares fanerozoicas, rochas vulcânicas cretáceas, coberturas plataformais paleógenas/neógenas e formações superficiais quaternárias (PARAÍBA, 2006).

3.2.6. Solos

Os solos que ocorrem na área de estudo (Figura 6) são o Luvissole Crômico Vértico fase pedregosa, relevo suave ondulado, predominante em grande parte da região; os Vertissolos relevo suave ondulado e ondulado, predominam nas partes mais baixas, apresentam problemas de drenagem e elevada presença de argilas de alta atividade química (montmoriloníticas), o que confere, a esses solos, notável capacidade de dilatação quando molhados e contração, quando secos; os Planossolos Nátricos relevo plano e suave ondulado, ao norte, ao longo da BR-230, trecho Campina Grande - Juazeirinho, na bacia do rio Taperoá. Nas áreas mais acidentadas ocorrem os Neossolos Litólicos Eutróficos fase pedregosa substrato gnaisse e granito. Em posição mais elevadas, em terrenos mais planos e suave ondulado ocorrem os Neossolos Regolíticos eutróficos; esses por apresentarem textura arenosa e serem de mais fácil cultivo, mais profundos e bem drenados e quase sempre favorecidos devido à altitude, pela maior precipitação (BRASIL, 1972; PARAÍBA, 1978).

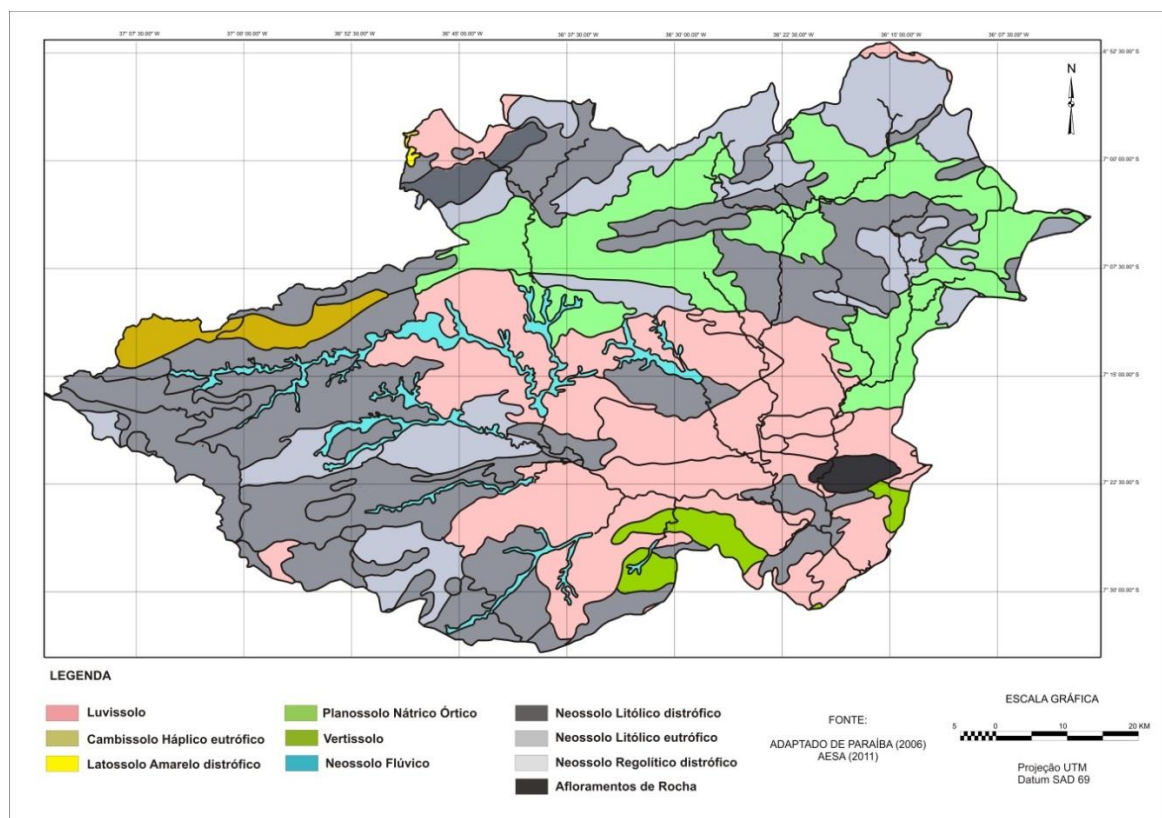


Figura 6. Mapa de solos da área de estudo. Fonte: Adaptado de PARAÍBA (2006); AESA (2011).

3.3. Métodos

O fluxograma apresentado na Figura 7 mostra os passos metodológicos utilizados para a realização deste trabalho, que serão sequencialmente descritos nos itens a seguir.

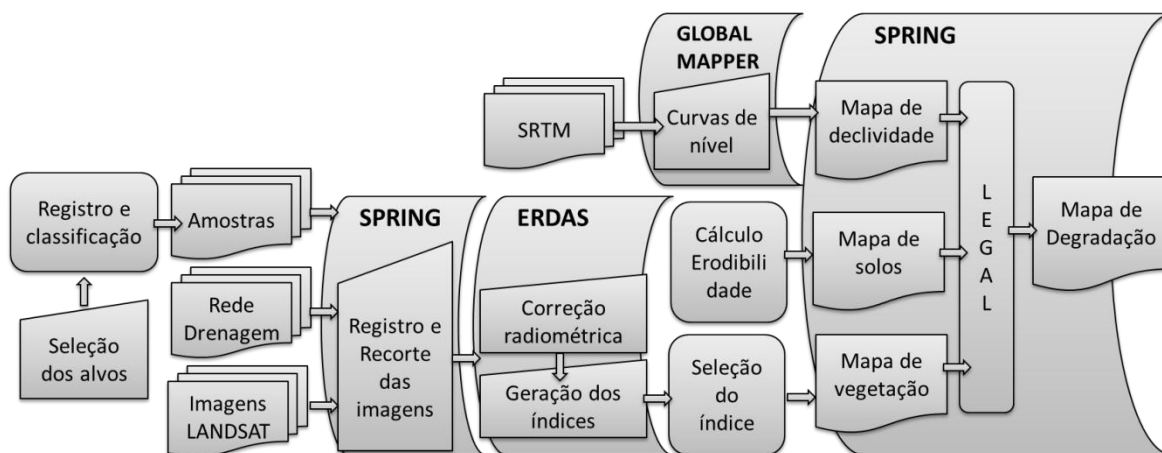


Figura 7. Fluxograma simplificado das etapas de trabalho.

3.3.1. Seleção e descrição dos alvos da vegetação de Caatinga

Visando a classificação da vegetação utilizou-se de forma auxiliar, o programa Google Earth 6.2 online, onde foram pré-selecionados 212 alvos terrestres dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra, representativos da região de estudo e com características de vegetação e solos aproximadamente homogêneos (Figura 8).

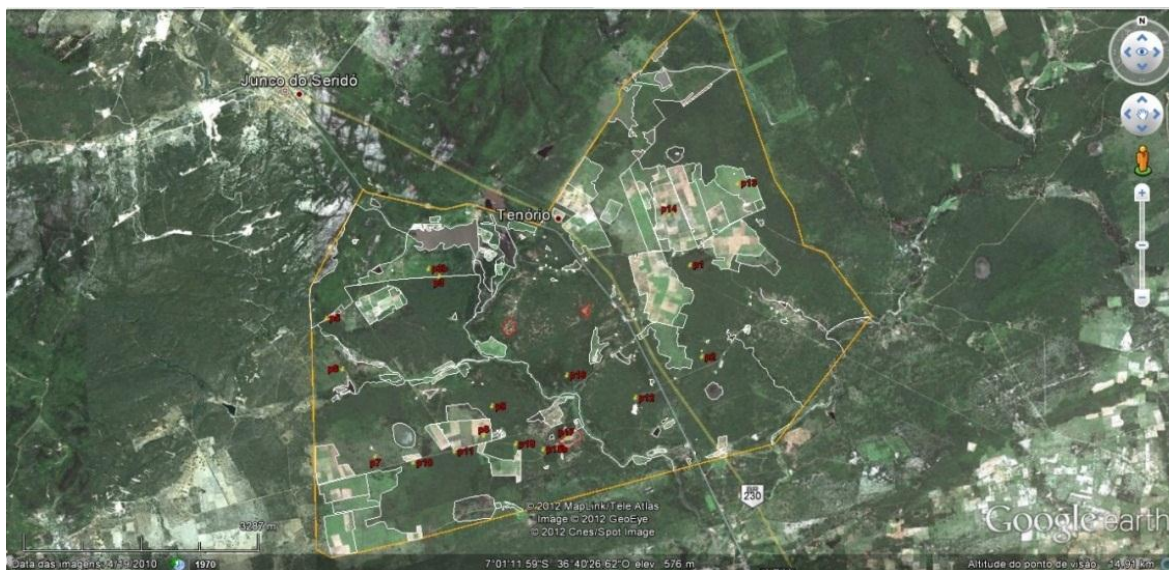


Figura 8. Alvos pré-selecionados para a classificação no campo.

Como apoio para a seleção dos alvos terrestres, foram utilizados o Google on-line com imagens de média resolução espacial, o mapa de solos (PARAÍBA, 2006) e o rodoviário estadual (AESAs, 2011). Pelas diferentes tonalidades de cores e formas, foram pré-selecionadas as áreas de visita levando-se em conta a facilidade de acesso pelas estradas visíveis nas imagens. Procurou-se obter pelo menos 4 repetições para cada padrão de cobertura de vegetação. Áreas agrícolas, campos de pastagens, algarobais e culturas permanentes (capineiras, palma forrageira e campos de sisal) foram identificados, georreferenciados e descritos durante as excursões, em caderneta de campo e referenciados com o GPS.

A época da coleta dos dados foi no final da primavera ao início do verão, momento final do período seco, do ano de 2011, ocasião em que a vegetação está sem folhagem, condição que uniformiza comparativamente as unidades de observação e o manto herbáceo-graminoide está bem reduzido, facilitando o deslocamento e a visualização do conjunto arbustivo-arbóreo. Por outro lado, neste período a identificação de algumas espécies fica dificultada pela ausência das folhas e flores, órgãos característicos, identificadores das plantas.

No campo, os alvos foram identificados conforme o modelo adotado por Chaves et al. (2008), e utilizado por Oliveira (2009) e Guimarães (2009). Na classificação da vegetação são considerados quatro níveis categóricos: Tipo, Grupo, Classe e Subclasse.

Tipo – separa a vegetação da Caatinga de outras coberturas da terra;

Grupo – separa a vegetação de acordo com o porte dominante das plantas (Figura 9; Tabela 3).

Tabela 3. Índice de porte da biomassa para as diferentes classes

Classe de Vegetação		Índice de Porte (Ip)
Arbórea	> 4,5 m	1,00
Subarbórea	3,0 a 4,5 m	0,75
Arbustiva	1,5 a 3,0 m	0,50
Subarbustiva	< 1,5 m	0,25
Sem Vegetação		0,00

Fonte: Chaves et al. (2008).

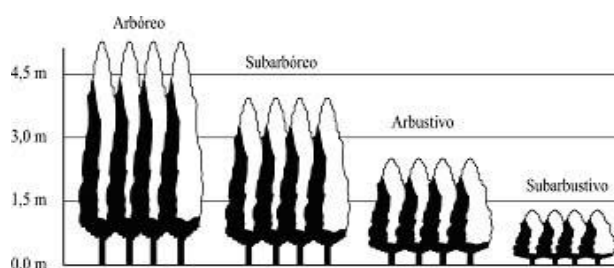


Figura 9. Classificação das plantas quanto ao porte. Fonte: Chaves et al. (2008).

Classes – dentro de cada grupo as classes separam as comunidades vegetacionais de diferentes feições morfológicas, descritas pela ordem decrescente dos portes dominantes (Figura 10) quando identificáveis, até o terceiro estrato, desde que este represente mais de 15% do conjunto da vegetação observada.

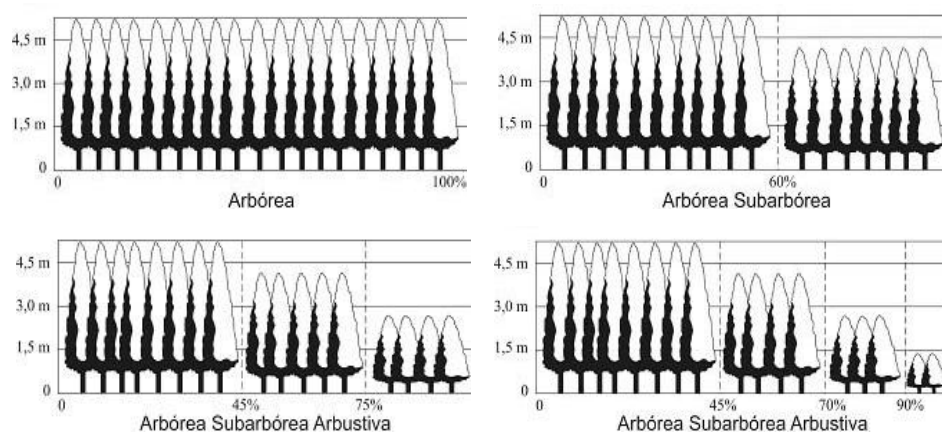


Figura 10. Classificação das plantas quanto à classe. Fonte: Chaves et al. (2008).

Subclasse – representa o grau de cobertura vegetal em termos de percentagem de recobrimento da superfície do solo, sendo avaliada pelos seguintes graus de recobrimento (Tabela 4; Figura 11).

Tabela 4. Índices de recobrimento da biomassa para as diferentes subclasses de vegetação

Subclasse de Vegetação		Índice de Recobrimento (Ir)
Muito densa	> 80%	1,0
Densa	60 a 80%	0,8
Aberta	40 a 60%	0,6
Rala	20 a 40%	0,4
Muito rala	< 20%	0,2
Sem Vegetação		0

Fonte: Chaves et al. (2008).

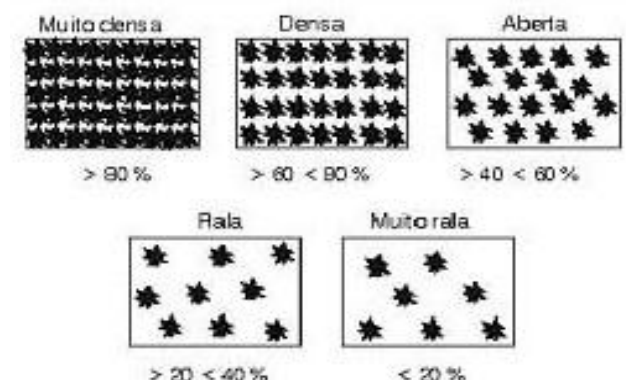


Figura 11. Classificação quanto à subclasse. Fonte: Chaves et al. (2008).

Conforme Chaves et al. (2008), para cada classe de vegetação homogênea é calculado quanto ao porte das plantas, o valor do IBVL (Índice da Biomassa da Vegetação Lenhosa), trata-se de um produto entre os valores correspondentes às características das plantas em relação ao porte (I_p) e ao recobrimento do solo (I_r):

$$IBVL = I_p * I_r$$

em que I_p é o índice de porte e I_r é índice de recobrimento do solo.

Atribuindo valores numéricos relativos às classes de vegetação quanto ao porte, Índice de Porte (I_p) e ao grau de recobrimento do solo pela vegetação, Índice de Recobrimento (I_r) (Tabelas 2 e 3) obtém-se, pelo produto desses índices, o Índice de Biomassa da Vegetal Lenhosa (IBVL) que varia de 0 a 1.

Para classes compostas de mais de um porte o IBVL é determinado pela ponderação do grau de predominância de cada um dos portes descritos. Deve-se atribuir o peso 3 como fator de ponderação para o índice do primeiro componente da classe, o peso 2 para o segundo e o 1 para o terceiro; desta forma, uma Caatinga Arbustiva subarbórea arbórea aberta, terá o seguinte índice de biomassa:

$$IBVL = \frac{(I_{p1} * 3) + (I_{p2} * 2) + (I_{p3} * 1)}{6} \times I_r$$

$$IBVL = \frac{(0,5 * 3) + (0,75 * 2) + (1 * 1)}{6} \times 0,6 = 0,4$$

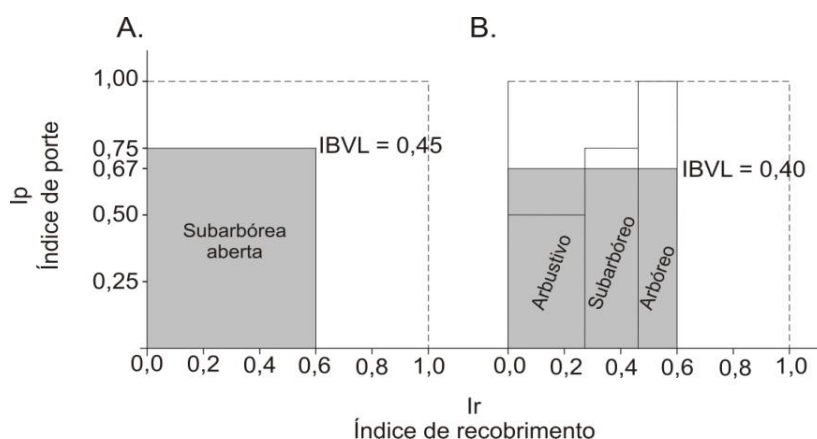


Figura 12. Representação gráfica do cálculo do Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa para comunidades de vegetação descritas como Subarbórea aberta (A) e Arbustiva Subarbórea Arbórea aberta (B).

Fonte: Chaves et al. (2008).

3.2.2. Criação da base de dados, registro e recorte das imagens

Para o processamento das imagens digitais utilizou-se o SPRING criando-se uma base de dados com a projeção/Datum UTM/SAD-69.

Para a transferência dos dados obtidos com o GPS dos pontos georreferenciados foi utilizado o programa Trackmaker para a importação à base de dados do SPRING.

Com o objetivo de auxiliar o georreferenciamento das imagens foram importados um arquivo no formato shape da Drenagem, servindo como pontos de controle e um arquivo da Bacia Hidrográfica da área de estudo para realizar o recorte da imagem.

Após realizada a importação das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 das imagens TM para o módulo IMPIMA foram em seguida transformadas do formato GEOTIFF para o formato GRIB e salvas em arquivo; em seguida, no SPRING utilizando o editor de registro de imagens, elas foram georreferenciadas com o objetivo de realizar a correção geométrica. O método polinomial de segunda ordem foi utilizado para ajustar a imagem e o modo tela tomando-se como base digital as coordenadas de pontos de controle da rede de drenagem, que tiveram uma boa distribuição ao longo de toda a área de estudo; depois disto os registros das imagens de cada banda das datas selecionadas foram importados em seus respectivos planos de informação. Para um processamento melhor foi realizado o recorte das imagens tomando-se como base os limites da bacia hidrográfica em estudo e exportadas no formato TIFF.

3.3.3. Processamento dos índices de vegetação

Nesta etapa as imagens foram importadas para o software ERDAS 8.5 e empilhadas; utilizou-se do algoritmo para obtenção da correção radiométrica nas diferentes bandas espectrais das imagens de satélite, selecionadas de acordo com o método utilizado por Silva et al. (2005).

Neste procedimento utilizou-se a relação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda_i} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{255} \right) ND$$

em que a_i e b_i são as radiâncias espectrais mínima e máxima ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), ND é a intensidade do pixel (número inteiro de 0 a 255) e $i = 1, 2, 3, 4, 5$ e 7 , corresponde às bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do TM - LANDSAT 5.

De posse dos mapas de radiância espectral de cada banda, informações sobre o $\cos Z$ e irradiância espectral no topo da atmosfera (Tabela 4) para cada banda, estimou-se a refletância espectral planetária em cada banda (Bastiaanssen, 1995):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r^2}$$

em que $\rho_{\lambda i}$ é reflectância planetária da banda i , $K_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral no topo da atmosfera (Tabela 5), $\cos Z$ é o ângulo zenital do Sol e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra – Sol - d_s , em unidades astronômicas (Iqbal, 1983), dado pela seguinte fórmula:

$$d_s = 1 + 0,0167 \sin \left[\frac{2 \pi (J - 93,5)}{365} \right]$$

sendo J = o dia Juliano e o argumento da função seno se encontra em radiano. Por sua vez, o ângulo Zenital do Sol não precisou ser calculado pois se encontrava disponível no cabeçalho das imagens adquiridas para este trabalho.

Tabela 5. Descrição das bandas do Mapeador Temático do LANDSAT 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
		a	b	
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1957
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,84	365,0	1826
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	264,0	1554
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	-1,51	221,0	1036
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	30,2	215,0
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,15	16,5	80,67

Fonte: Allen et al. (2002).

As etapas seguintes correspondentes ao índice de vegetação, estão bem descritas em Allen et al. (2002).

Para obtenção do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) foi utilizada a fórmula:

$$NDVI = \frac{(rp4 - rp3)}{(rp4 + rp3)}$$

em que rp4 e rp3 correspondem às reflectâncias planetárias das bandas 4 e 3 do TM-LANDSAT 5.

O SAVI foi calculado utilizando-se a fórmula:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(rp4 - rp3)}{(L + rp4 - rp3)}$$

em que L = 0,5 é o fator de ajuste do tipo de solo.

O EVI foi calculado conforme a fórmula:

$$EVI = G \left(\frac{rp4 - rp3}{rp4 + C_1 rp3 - C_2 rp1 + L} \right)$$

em que: L = 0,5 fator de ajuste do solo; C₁ = 6; C₂ = 7,5 são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera, e o fator de ganho G = 2,5 (Huete et al., 2002).

3.3.4. Seleção do índice de vegetação e geração do mapa

Após a obtenção das imagens índice de NDVI, SAVI e EVI e Reflectância da B3 e B4, com o objetivo de avaliar a precisão da verdade terrestre a partir dos índices espectrais de vegetação para os períodos úmido e seco, foi utilizado o ERDAS. Para cada ponto de observação georreferenciado no campo foram lidos valores de seis pixels do entorno, nas imagens. Para o registro dos dados foi criada uma planilha na qual foram registrados as coordenadas dos pontos, valores das leituras dos índices, médias desses valores, e informações de campo, com descrição da vegetação quanto ao tipo, classes e subclasses de vegetação, além da estimativa do valor do IBVL para a vegetação de Caatinga (Anexo 1).

Com o objetivo de selecionar um índice de vegetação que se correlaciona melhor com o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL) proposto por Chaves et al. (2008) foi realizada, através das médias obtidas de cada ponto, a correlação do NDVI, SAVI, EVI, Reflectância da B3 e Reflectância da B4 entre o IBVL para os períodos seco e úmido; em seguida, e após a seleção do melhor índice e época de obtenção dos dados, com base no coeficiente de correlação linear dos dados foram determinados pela equação teórica de correlação, os valores limites das classes dos índices espectrais (valor y), baseados nos valores de IBVL (valor x) descritivos das biomassas da vegetação (Tabela 6).

Tabela 6. Classes de IBVL representativas da descrição da vegetação de Caatinga

IBVL	Classe
> 0,60	Arbórea Subarbórea densa
0,50 a 0,60	Subarbórea Arbustiva densa
0,40 a 0,50	Arbustiva Subarbórea densa
0,30 a 0,40	Arbustiva Subarbórea aberta
0,20 a 0,30	Arbustiva Subarbustiva aberta
0,10 a 0,20	Subarbustiva Arbustiva rala
0,05 a 0,10	Subarbustiva Arbustiva muito rala
< 0,05	Solo exposto

Prosseguindo foi criada no programa LEGAL do SPRING, a Linguagem Algébrica para gerar os mapas de cobertura do solo e definidas as classes de cobertura vegetal e uso da terra de acordo com os tipos (Tabela 7). O mapa final foi editorado em um programa gráfico, em que foram editados aspectos como título, tamanho, texto, escala, legenda e localização e salvo no formato jpg.

Tabela 7. Classes de NDVI correspondentes aos índices de biomassa (IBVL) da vegetação de Caatinga para a época seca

Classes	IBVL	NDVI
Arbórea Subarbórea densa	> 0,60	>0,300
Subarbórea Arbustiva densa	0,50 a 0,60	0,285-0,300
Arbustiva Subarbórea densa	0,40 a 0,50	0,265-0,285
Arbustiva Subarbórea aberta	0,30 a 0,40	0,250-0,265
Arbustiva Subarbustiva aberta	0,20 a 0,30	0,225-0,250
Subarbustiva Arbustiva rala	0,10 a 0,20	0,180-0,225
Subarbustiva Arbustiva muito rala	0,05 a 0,10	0,150-0,180
Solo exposto	< 0,05	0-0,150
Corpos d'água		<0

3.3.5. Estimativa do volume de biomassa da vegetação lenhosa da Caatinga

Conforme Chaves et al. (2008), para cada padrão de vegetação de Caatinga representativo de uma região fisiográfica de estudo é necessário que se estabeleça um valor de referência da biomassa para uma condição de máxima preservação; só assim é possível se fazer uma estimativa do volume da biomassa para toda a área de estudo, bastando multiplicar o volume padrão de referência pelas áreas consideradas e seus respectivos valores de IBVL, obtidos da descrição da vegetação.

Ao considerar que para uma região de Caatinga o Volume da Biomassa da Vegetação Lenhosa (VBVL) para uma área com máxima preservação seja de $108 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Francelino et al., 2003) ao se descrever, por exemplo, uma área com vegetação de Caatinga Arbustiva Subarbustiva Arbórea aberta, o IBVL é 0,4 e a estimativa do volume da biomassa para um hectare, seria:

$$\text{VBVL} = \text{Vmáx} * \text{Área} * \text{IBVL}$$

$$\text{VBVL} = 108 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \times 1 \text{ ha} \times 0,4$$

$$\text{VBVL} = 43,2 \text{ m}^3$$

Podendo ser representado graficamente (Figura 13).

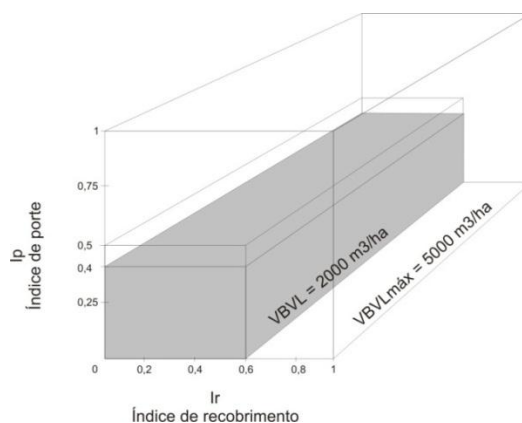


Figura 13. Representação gráfica do cálculo do VBVL (Volume de Biomassa da Vegetação Lenhosa) para uma unidade de vegetação de Caatinga Arbustiva subarbórea arbórea aberta.

Fonte: Chaves et al. (2008).

Apesar de ser apresentada de forma simplista, a estimativa do Volume da Biomassa da Vegetação Lenhosa (VBVL) deve ser vista com cautela uma vez que a qualidade e,

consequentemente, o valor do produto florestal para diferentes comunidades vegetais (diferentes fases de degradação da Caatinga) podem variar consideravelmente.

Utilizando desta metodologia, estimou-se o volume de biomassa lenhosa da bacia hidrográfica a partir da descrição da vegetação de Caatinga de cada unidade de mapeamento.

3.3.6. Degradação ambiental

No ambiente natural ocorre um equilíbrio entre os componentes da natureza. A Ecologia estuda as relações entre organismos e o meio ambiente. Segundo Resende et al. (1997), as plantas que nos fornecem alimentos, fibras, madeiras e substâncias medicinais, dependem dos fatores ecológicos: clima, solo e biota (organismos). O solo, por sua vez, é função de combinações de clima, organismos, material de origem (rochas), relevo e tempo. Utilizando-se dos recursos naturais, nas suas múltiplas atividades, o homem causa impactos na natureza, provocando desequilíbrio e, quase sempre, degradação.

A erosão dos solos é uma consequência das atividades humanas e quando em excesso causa perdas e destruição. A erosão causada pela chuva pode ser estimada pela Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978) que reúne os principais fatores determinantes da erosão; são eles: a chuva (R), o solo (K), o comprimento e o grau do declive (LS), o manejo das culturas (C) e as práticas de conservação (P).

Embora possa haver diferença na ação erosiva das chuvas em relação aos seus totais anuais dentro da bacia hidrográfica este fator não foi considerado. Eventos extremos (chuvas com alta intensidade e duração) são responsáveis pela intensificação do processo erosivo (Chaves et al., 1985). Neste particular, como a área é relativamente pequena e fisiograficamente homogênea, a probabilidade de ocorrência desses eventos não deve diferir muito dentro da área de estudo.

Partindo do pressuposto de que a erosão do solo é o efeito mais marcante da degradação ambiental e que a cobertura vegetal, a declividade do terreno e a susceptibilidade dos solos e a erosão, são fatores determinantes do processo erosivo. Estimou-se cruzando-se os dados espacializados destes atributos, o estado de degradação atual das terras da bacia hidrográfica.

Fazendo uso deste modelo matemático de estimativa da erosão, serão relacionados neste trabalho, os fatores erodibilidade do solo (K), grau de declividade do terreno (S) e grau de cobertura vegetal (C) como indicadores da degradação das terras.

3.3.6.1. Mapa de declividade

Para a geração do mapa de declividade foi utilizado um mosaico digital do SRTM dos quadrantes SB24ZB, SB24ZD da área de estudo utilizando o programa GlobalMapper e a partir deles foram geradas as curvas de nível com equidistância de 10 metros.

Para gerar a grade triangular foi utilizado o programa SPRING e as curvas de nível como base de dados; em seguida foi realizado o fatiamento da grade triangular com o estabelecimento dos limites de classes de declive, procedendo-se o mapeamento em cinco classes de declividade (Tabela 8).

Os índices de vulnerabilidade das classes foram estabelecidos de forma progressiva procurando-se simular a aceleração do processo erosivo. Procedeu-se o mesmo critério para os demais parâmetros do modelo: erodibilidade do solo e grau de cobertura do terreno.

Tabela 8. Classes e índices de vulnerabilidade à erosão relativo à declividade do terreno

Classes de Declividade	Declive (%)	Classes de Vulnerabilidade	Índices
Plano	0-3	Muito Baixo	1
Suave Ondulado	3-6	Baixo	3
Moderadamente Ondulado	6-12	Médio	5
Ondulado	12-20	Alto	7
Forte Ondulado/Montanhoso	>20	Muito Alto	9

Fonte: Adaptado de Francisco (2010).

3.3.6.2. Mapa de erodibilidade

A erodibilidade do solo pode ser entendida como a sua a maior ou menor capacidade de resistência à ação erosiva da chuva. As propriedades do solo que afetam a erodibilidade são aquelas relacionadas à infiltração, drenagem e capacidade de armazenamento de água, e as relacionadas à dispersão, desagregação, abrasão e movimento de partículas do solo pela chuva e escoamento; assim, características do solo, tais como: textura, estrutura, profundidade do perfil e tipo e quantidade de argila, matéria orgânica e

cátions trocáveis, estão intimamente relacionadas à sua susceptibilidade a erosão (Wischmeier e Smith, 1978; Renard et al., 1997; Bryan, 2000).

Baseados nas equações propostas por Denardin (1990), Chaves et al. (2004) propuseram um método de estimativa da erodibilidade que permite utilizar os dados de análise dos solos descritos no boletins brasileiros, utilizados neste trabalho.

Na elaboração do mapa de erodibilidade foi criada uma planilha no Excel em que cada polígono de solo da área de estudo, baseado nas informações contidas nos perfis representativos do Boletim do Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba (PARAÍBA, 1978), teve calculado sua erodibilidade, baseada na metodologia proposta por Chaves et al. (2004).

Nesta proposta os autores considerando a possibilidade de obtenção dos dados do boletim de solos brasileiros, através de um artifício para estimativa dos dados de granulometria a partir da classificação internacional para a classificação americana, utilizam o modelo proposto por Denardin (1990), para estimar a erodibilidade dos solos e que tem a seguinte expressão matemática:

$$K=0,00000748 (X_{25}) + 0,00448059 (X_{29}) - 0,06311750 (X_{27}) + 0,01039567 (X_{32})$$

onde K, é o valor a ser estimado para o fator erodibilidade do solo, expresso em $\text{Mg hMJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$; X_{25} , é a variável granulométrica “M”, calculada a partir da determinação pelo método da pipeta; X_{29} , é a permeabilidade do perfil de solo, codificada conforme Wischmeier et al. (1971); X_{27} , é o diâmetro médio ponderado das partículas menores do que 2 mm, expresso em mm; X_{32} , é a relação entre o teor de matéria orgânica e o teor da “nova areia” determinada pelo método da pipeta.

Considerando o alto grau de determinação do parâmetro X_{25} (variável granulométrica “M”), com $r^2 = 0,9461$, a estimativa da erodibilidade dos solos foi calculada pela equação de K, reduzida aos dois primeiros parâmetros, cuja expressão matemática ajustada por Denardin (1990) passou a ser a seguinte:

$$K = 0,00000797 (X_{25}) + 0,0029283 (X_{29}) \quad (r^2 = 0,9561)$$

A variável “M” é um artifício que exalta a ocorrência das frações granulométricas do solo mais facilmente dispersas e transportadas pela água, o silte e a areia muito fina. Essas frações agrupadas numa mesma classe textural, passou a ser chamada de fração

“novo silte (NS)” enquanto, a fração areia com a subtração da fração areia muito fina, passou a ser chamada de “nova areia (NA)” (Wischmeier et al., 1971). Assim, a variável “M” é expressa pelo produto entre os valores percentuais da fração novo silte vezes a soma das frações novo silte + nova areia ($M = NS \times (NS + NA)$).

Nos boletins de solos brasileiros o resultado da análise granulométrica é apresentado na classificação internacional (ISSS), enquanto, originalmente, a variável “M” utiliza os dados da classificação americana (USDA); assim, para a conversão dos dados granulométricos da classificação internacional dos boletins de solos brasileiros, com vista à classificação americana, Chaves et al. (2004) propuseram a seguinte equação:

$$M = 640,03 e^{0,0003 M_i} \quad (r^2 = 0,8214)$$

sendo: M = valor de “M” corrigido, ou da variável X_{25} do modelo de Denardin e M_i = valor obtido do boletim de solos (classificação internacional).

A estimativa da permeabilidade dos solos (variável X_{29}) foi realizada a partir da correspondência entre as classes de drenagem descritas no boletim de solos (BRASIL, 1972) e as classes de permeabilidade propostas e codificadas por Wischmeier et al. (1971) (Tabela 9).

Tabela 9. Correspondência entre classes de drenagem e permeabilidade

Classes		Índice
Drenagem	Permeabilidade	
Muito mal drenado	Muito lenta	6
Mal drenado	Muito lenta	6
Imperfeitamente drenado	Lenta	5
Moderadamente drenado	Lenta a moderada	4
Bem drenado	Moderada	3
Acentuadamente drenado	Moderada a rápida	2
Fortemente drenado	Rápida	1
Excessivamente drenado	Rápida	1

Fonte: Boletim de Solos do Estado da Paraíba (BRASIL, 1972) e Wischmeier et al. (1971).

Para as descrições de drenagem intermediárias entre duas classes do tipo “bem drenado a acentuadamente drenado”, adotou-se uma codificação de valor intermediário, exemplo, 2,5. Os dados sobre textura (X_{25}) e permeabilidade (X_{29}) foram interpretados e calculados a partir da ordenação dos dados dos perfis de solos descritos no Boletim de Solos do Estado da Paraíba (BRASIL, 1972).

Na metodologia para o enquadramento das classes foi utilizado o Excel para o cálculo de erodibilidade dos solos. Utilizou-se o valor da erodibilidade do solo representativo de cada unidade de mapeamento, ou seja, o solo dominante de cada associação de solo. Para cada solo foi considerado apenas o valor da erodibilidade do horizonte superficial; assim, para cada polígono do mapa foi atribuído um valor representativo de erodibilidade; em seguida, agrupados em cinco classes de erodibilidade. Com vista à elaboração do mapa de erodibilidade do solo no SPRING foi realizada a classificação para o enquadramento das classes definidas (Tabela 10).

Tabela 10. Classes e índices de vulnerabilidade a erosão relativos à erodibilidade dos solos

Erodibilidade (Mg mm MJ⁻¹ ha⁻¹)	Classes de Vulnerabilidade	Índices
<0,01	Muito Baixa	1
0,01-0,02	Baixa	3
0,02-0,03	Média	5
0,03-0,04	Alta	7
>0,04	Muito Alta	9

3.3.6.3. Mapa de cobertura do solo

A vegetação é a proteção natural do solo contra os efeitos da ação erosiva da chuva e do vento; quanto maior e mais densa for a cobertura da vegetação menores serão as perdas de solo. Além de aumentar a quantidade de água interceptada a vegetação amortecer a energia de impacto das gotas de chuva reduzindo a destruição dos agregados, a obstrução dos poros e o selamento da superfície do solo. A cobertura vegetal na superfície também reduz a velocidade do escoamento superficial pelo aumento da rugosidade hidráulica ao longo do seu percurso (Pruski, 2009).

Dados de pesquisa em parcelas de erosão desenvolvidos em Sumé, na vizinhança do Cariri paraibano, mostram que a redução da perda média anual de solo pela vegetação de Caatinga em relação à perda média da parcela padrão (mantida sem vegetação), de 65,37 t ha⁻¹ ano⁻¹, 714 vezes; em Caatinga em fase de regeneração foi de 56 vezes e em área cultivada com palma no sentido da pendente, foi de apenas, 1,8 vez (Albuquerque et al., 2005). Isto mostra o efeito da cobertura do solo pela vegetação da Caatinga. Os autores observam, no trabalho, que apesar da perda da folhagem no verão, a

recuperação da vegetação de Caatinga é rápida após as primeiras chuvas, voltando a proteger o solo.

Quanto maior e mais densa for a cobertura vegetal maior também é a proteção do solo e menor o risco de degradação.

Para a elaboração do mapa de cobertura do solo foi realizada uma reclassificação do mapa de vegetação, elaborado neste trabalho utilizando-se o LEGAL do SPRING para o enquadramento nas classes de IBVL (Tabela 11).

Tabela 11. Classes e índices de vulnerabilidade a erosão relativos à biomassa da vegetação

Biomassa da Vegetação (IBVL)	Classes de Vulnerabilidade	Índices
0,80-1,00	Muito Baixa	1
0,60-0,80	Baixa	3
0,40-0,60	Média	5
0,20-0,40	Alta	7
0-0,20	Muito Alta	9

3.3.6.4. Modelagem e mapeamento da degradação das terras

A modelagem para a determinação das classes de degradação das terras na bacia hidrográfica do rio Taperoá partiu do pressuposto de que, quanto menor for o porte e mais rala a densidade da vegetação e quanto maior for a declividade e a erodibilidade dos solos de uma área, maior a probabilidade desta área se encontrar degradada. Tal corolário ignora a questão do tempo. Como se sabe, após a eliminação da vegetação é que se inicia efetivamente o processo. Sendo assim, quanto mais tempo perdurar essas condições ambientais críticas maior será o grau de degradação das terras. A falta de computação do tempo na modelagem pode ser considerada uma das limitações desta metodologia.

Os dados (Tabela 12) sintetizam as informações empregadas na modelagem da degradação das terras, em que foram integrados os efeitos das variáveis a partir da multiplicação entre os índices das classes dos parâmetros cobertura vegetal, declividade do terreno e erodibilidade do solo. Considerando o efeito exponencial das perdas de solo em relação ao aumento da declividade, estabeleceram-se, arbitrariamente, os índices das classes com valores crescentes de 1, 3, 5, 7 e 9, representativos dos riscos de degradação; muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, respectivamente.

Em cada um dos três fatores, com cinco índices de risco, nos quais a erosão de cada classe combina cinco a cinco (5 x 5 x 5), possibilitando 125 interações. O produto dessas combinações resulta no índice de degradação da terra. Na Figura 14 observa-se a correlação entre o número de combinações e seus respectivos produtos, ou seja, os índices de degradação. Dentro dos princípios conservacionistas dos solos já estabelecidos, a exemplo dos limites das classes de capacidade de uso da terra, em relação ao risco de erosão devido à declividade, procurou-se distribuir progressivamente, os valores limites das classes de degradação: Muito Baixa (0 a 9); Baixa (9 a 27); Média (27 a 75); Alta (75 a 175) e Muito Alta (> 175).

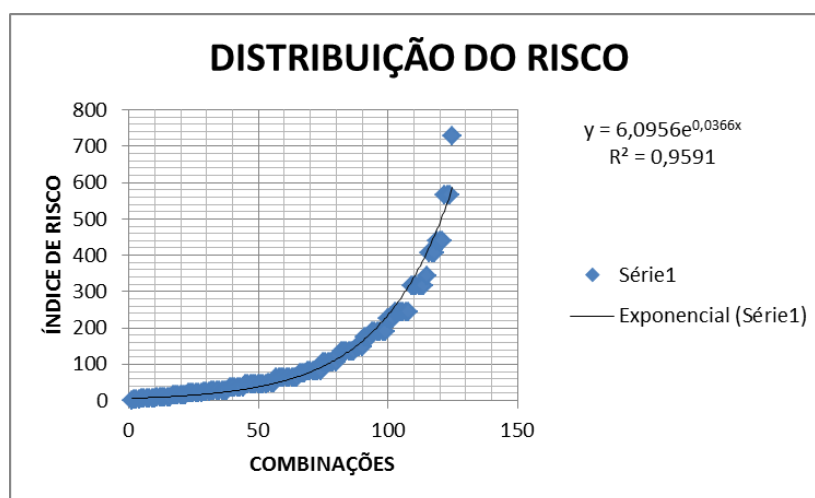


Figura 14. Distribuição do risco na degradação.

No procedimento para a elaboração do mapa de degradação das terras foi utilizada de forma auxiliar, a planilha do Excel para calcular o índice de degradação para cada combinação dos parâmetros do modelo, conforme apresentado na Tabela 12; em seguida foram separadas as classes e realizado seu cruzamento utilizando-se a linguagem algébrica (LEGAL) do SPRING.

Tabela 12. Parâmetros para estimativa do grau de degradação das terras

Classes Vulnerabilidade	Cobertura Vegetal (IBVL)	Índice Classe	Declividade (%)	Índice Classe	Erodibilidade (Mg mmMJ ⁻¹ ha ⁻¹)	Índice Classe	Intervalo Classe	Grau de Degradação
Muito Baixa	0,80-1,00	1	0-3	1	<0,01	1	0-3	1
Baixa	0,60-0,80	3	3-6	3	0,01-0,02	3	3-15	27
Média	0,40-0,60	5	6-12	5	0,02-0,03	5	15-45	125
Alta	0,20-0,40	7	12-20	7	0,03-0,04	7	45-175	343
Muito Alta	0-0,20	9	>20	9	>0,04	9	>175	729

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Descrição dos alvos terrestres e seleção de um índice de vegetação

4.1.1. Amostragem e descrição dos alvos terrestres

As áreas pré-selecinadas estão marcadas na imagem (Figura 15), representadas por polígonos em linhas vermelhas e pontos de referência em amarelo cujas coordenadas geográficas foram introduzidas no equipamento GPS, para sua localização no campo. Observam-se uma concentração maior de amostras ao norte da bacia, seis áreas com pontos de observação, representando a unidade geoambiental dos solos Regossolos e Planossolos; e no centro, as amostras relativas aos Luvisolos Crômicos vérticos e, mais ao sul, os solos Litólicos.

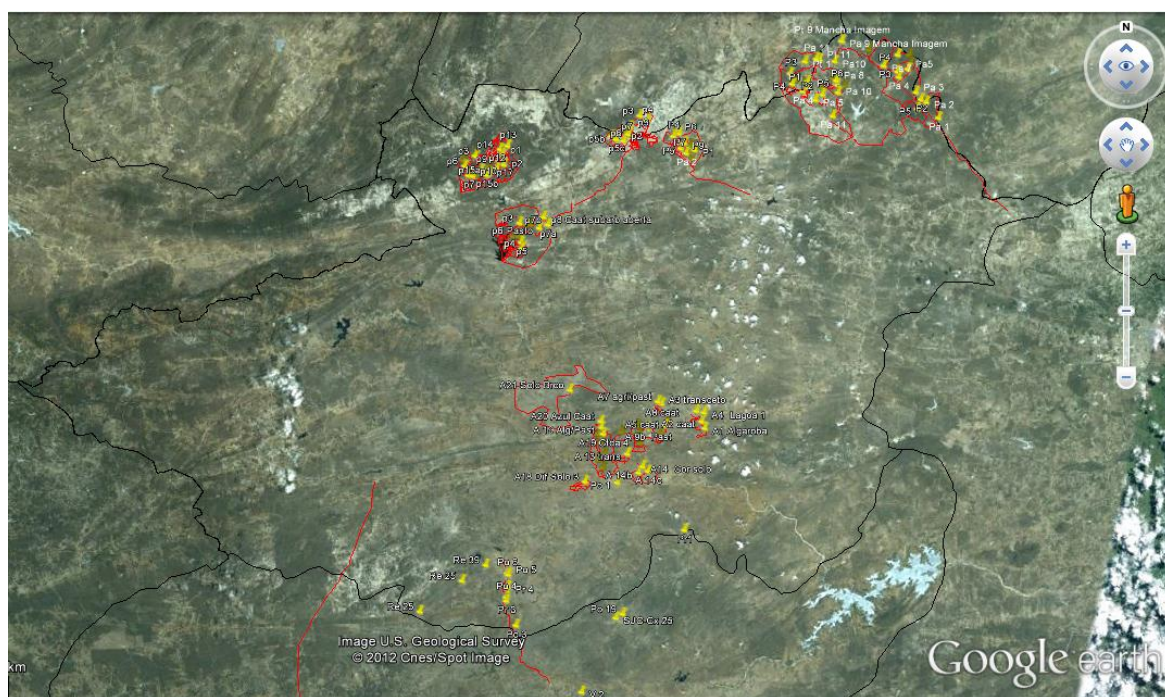


Figura 15. Espacialização dos pontos amostrais na bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB.

Fonte: Adaptado de Google Earth online.

Na descrição dos alvos com vegetação de Caatinga foi utilizada a metodologia proposta por Chaves et al. (2008) adaptando-se os procedimentos às condições dos objetivos da pesquisa. Em cada unidade de observação foram selecionados três à quatro pontos de descrição representativos do padrão de vegetação; procurou-se, definir, assim, a

classificação quali-quantitativa da vegetação, em termos de combinação de portes, e a percentagem de recobrimento do terreno pelas plantas; e, no entorno de cada ponto de observação e descrição foram feitas anotações do número de indivíduos das espécies vegetais lenhosas e suculentas pela ordem de predominância, além do registro do grau de erosão, pedregosidade, cor e declividade do terreno.

Esta metodologia de descrição, classificação e estimativa da biomassa lenhosa, proposta por Chaves et al. (2008) e utilizada neste trabalho, mostrou-se eficiente pela sua praticidade e economia, comparada a outros métodos padrão de descrição e avaliação da Caatinga. Costa et al. (2002) e Maldonado (2005) realizaram estimativas, descrição e avaliação da Caatinga pelos métodos mais tradicionais e trabalhosos, utilizando cortes rasos de parcelas e descrição e avaliações em transectos.

Observa-se (Tabela 13) uma seleção de 24 valores de IBVL dentre os 51 alvos descritos no campo, obtidos a partir da descrição da classe e subclasse de vegetação. Com esta seleção procurou-se escalonar os valores de IBVL para uma ampla faixa de padrões de biomassa eliminando-se padrões de vegetação com maiores números de repetições. Com esta seleção de valores de IBVL foram melhoradas as correlações para as avaliações dos diversos índices espectrais de vegetação estudados.

Tabela 13. Valores de índices de biomassa da vegetação lenhosa determinados a partir da classificação da vegetação de Caatinga de alvos terrestres descritos no campo

N. Or.	Classe		Subclasse	IBVL
1	Subarbórea	Arbórea	Muito densa	0,85
2	Arbórea		Densa	0,80
3	Arbórea	Subarbórea	Densa	0,72
4	Subarbórea	Arbórea	Densa	0,68
5	Subarbórea		Densa	0,60
6	Subarbórea		Densa	0,60
7	Subarbórea	Arbustiva	Arbórea	Densa
8	Arbustiva	Arbórea		Densa
9	Subarbórea	Arbustiva		Densa
10	Arbustiva	Subarbórea		Densa
11	Arbustiva			Densa
12	Subarbórea	Arbustiva		Aberta
13	Arbustiva	Subarbórea		Aberta
14	Arbustiva	Subarbórea		Aberta
15	Arbustiva	Subarbórea		Aberta
16	Arbustiva			Aberta
17	Arbustiva	Subarbustiva	Subarbórea	Aberta
18	Arbustiva	Subarbustiva		Aberta
19	Arbustiva			Rala
20	Subarbustiva	Arbustiva		Rala
21	Subarbustiva	Arbustiva		Rala
22	Arbustiva	Subarbustiva		Muito rala
23	Subarbustiva	Arbustiva		Muito rala
24	Subarbustiva	Arbustiva		Muito rala

4.1.2. Seleção do índice de vegetação

Para avaliação e escolha de um índice de vegetação para este trabalho foram correlacionadas as leituras espectrais das imagens índices de NDVI, SAVI, EVI e das imagens de reflectâncias das Bandas 3 e 4, com os valores de IBVL resultante da classificação dos padrões de vegetação de Caatinga dos alvos terrestre, para os períodos seco (29/10/2009) e úmido (24/05/2010), conforme os dados apresentados (Figura 16). Pode-se observar que foram utilizados, nessas correlações, todos os dados dos alvos identificados e descritos com vegetação de Caatinga, em número de cinquenta e uma unidades de observações.

4.1.2.1. Avaliação dos índices de vegetação

a) As leituras do período úmido

Para todos os índices de vegetação (Figura 16) as correlações foram mais baixas para o período úmido confirmando, assim, ser esta uma época inadequada para trabalhos de classificação e mapeamento da vegetação da Caatinga. Para os índices NDVI, SAVI e EVI os valores das leituras espectrais e da biomassa apresentaram uma correlação direta, enquanto para as bandas 3 e 4 as correlações foram inversas, ou seja, quanto maior a biomassa das plantas menores os valores das leituras da reflectância.

Maldonado (1999) mostrou que, para vegetação de Caatinga, os valores de reflectância da banda 4 são sempre maiores que os da banda 3, tanto no período seco como no período úmido e diminuem com o aumento da biomassa das plantas; faz exceção à banda 4 (infravermelho próximo) em que no período úmido, a reflectância aumenta significativamente com o aumento da biomassa das plantas. O autor mostrou, também, que a reflectância na banda 4 para o período úmido, chega a ser menor que os valores para o período seco, para as condições de solos descobertos ou com vegetação esparsa. Estes comportamentos não foram totalmente observados neste trabalho. Constata-se pelos dados (Figura 16) que, apesar dos valores de reflectância da banda 4 serem sempre maiores que os da banda 3, estes não aumentaram com o aumento da biomassa das plantas para o período úmido nem são menores do que os valores do período seco, para condição de solo descoberto e vegetação esparsa.

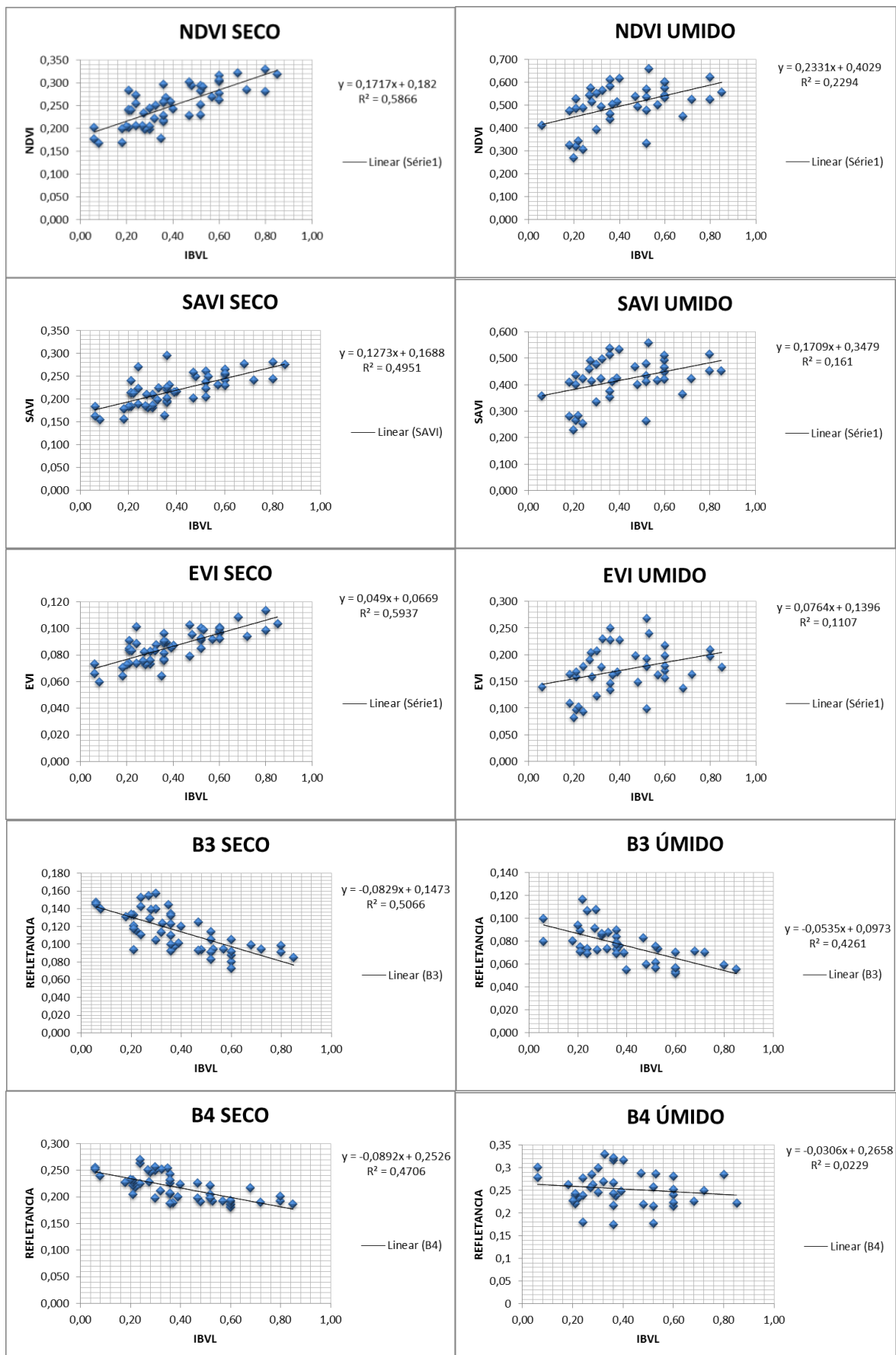


Figura 16. Correlação do IBVL com os índices de vegetação (NDVI, SAVI e EVI) e as Bandas 3 e 4.

Segundo Rosendo (2005), na região espectral do infravermelho (banda 4), uma vegetação verde e sadia é caracterizada por alta reflectância, alta transmitância e baixa absorvância quando comparada ao visível (banda 3), o que reforça a explicação sobre os altos valores para os pixels nas imagens-índice do período úmido.

No geral, pode-se constatar que os valores de reflectância da banda 3 são decrescentes com o aumento da biomassa, variando de 0,150 a 0,090 no período seco, para 0,100 a 0,060 no período úmido (Figura 16); já os dados da banda 4 são decrescentes para o período seco, variando de 0,250 a 0,180; contudo, ligeiramente decrescentes e mais altos, no período úmido, variando de 0,270 a 0,240 com o aumento da biomassa da vegetação.

Considerando que os índices NDVI, SAVI e EVI se utilizam dos valores de reflectância das bandas 3 e 4, em particular da diferença entre estas bandas, observa-se, pelos dados (Figura 16), para o período úmido, que muitas das áreas com vegetação aberta com valores de IBVL variando de 0,200 a 0,400, apresentam valores de NDVI, SAVI e EVI iguais aos das maiores áreas com vegetação de porte maior e mais densa, com IBVL 0,800 e 0,850, por exemplo, confirmando as observações feitas por Maldonado (1999; 2005) em que, na Caatinga, a recomposição da vegetação é intensa com a chegada das primeiras chuvas.

No período úmido áreas mais abertas com solos férteis e conservados, o manto herbáceo e graminoide, além de plantas colonizadoras como o Matapasto (*Chromolaena maximiliani*. Schrad) e o Marmeleiro (*Croton blanchetianus*. Baill) recobre os espaços entre as árvores e, por serem jovens e terem alta capacidade fotossintética, absorvem mais energia luminosa (banda 3), dando respostas espectrais semelhantes ou até maiores que as das áreas com vegetação adulta, arbórea e mais densa.

Os baixos valores das leituras dos índices NDVI, SAVI e EVI, para o período úmido (Figura 16), para alguns pontos com IBVL em torno de 0,20, devem representar áreas degradadas. Neste caso, áreas com solos degradados perdem a capacidade de restabelecimento da cobertura vegetal, e daí os mais baixos valores de leituras espectrais. Observações semelhantes foram feitas por Francisco et al. (2012) avaliando a influência da umidade antecedente nas leituras do NDVI. Esta também é uma técnica de identificação de áreas degradadas utilizada na modelagem da desertificação no programa DesertWatch Extension project (Desertwatch, 2012).

b) As leituras do período seco

Para as leituras do período seco (Figura 16) as correlações com o índice de biomassa IBVL são mais altas que no período úmido, positivas para NDVI, SAVI e EVI, e negativas para as bandas 3 e 4, fato que demonstra menor dispersão dos dados de leituras. O período seco tem-se consagrado como a melhor época para se realizar o diagnóstico e o mapeamento da vegetação de Caatinga, conforme constatado também por Guimarães (2009), Oliveira et al. (2009), Lopes et al. (2010) e Chaves et al. (2012).

O EVI e o NDVI apresentaram as melhores correlações com valores de IBVL, com $r^2 = 0,5937$ e $r^2 = 0,5866$, respectivamente, demonstrando ter praticamente a mesma confiabilidade de determinação. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2009).

Os valores das leituras do NDVI para vegetação da Caatinga no período seco (Figura 16), variaram de 0,180 a 0,340 para valores de IBVL de 0,05 a 0,85, respectivamente; enquanto que, os valores das leituras do EVI oscilaram de 0,068 a 0,108 para os mesmos valores de IBVL. Considerando esta estreita faixa de amplitude das leituras do EVI optou-se por trabalhar com o NDVI, visando facilitar a discriminação dos limites das classes de vegetação, além de que, o NDVI é um índice amplamente utilizado.

Moraes et al. (2011), encontraram trabalhando em área de transição de Caatinga bem preservadas de floresta subcaducifólia no município de Floresta, PE, leituras de NDVI variando de 0,208 a 0,803. Valores de NDVI abaixo de 0,4 para o período seco, são mais compatíveis para respostas da vegetação de Caatinga hiperxerófila, como a da área de estudo (Paixão et al., 2009; Lopes et al., 2010; Chaves et al., 2012).

Uma vez que os índices de vegetação são muito sensíveis à atividade fotossintética e as espécies de Caatinga apresentam diversos mecanismos adaptativos à captação e uso de água (Coppin et al., 2004; Maldonado, 2005), a detecção de mudanças da vegetação de Caatinga, pode muitas vezes, pode estar influenciada por diferenças das condições de umidade. Francisco et al. (2012), observaram numa análise temporal da bacia do rio Taperoá, falsas detecções de mudanças influenciadas pela variação das condições de umidade espacial e temporal.

4.1.2.2. Avaliação da influência do solo

Particularizando a análise para os diferentes ambientes de coleta de dados, pode-se observar (Figura 17) que ocorreram diferenças no comportamento dos índices de vegetação quando correlacionados com a biomassa vegetal para os diferentes ambientes de coleta. Vale considerar que os resultados apresentados (Figura 17 e Tabela 14), são do período seco e têm 24 pontos de descrição para o geoambiente I (solos Planossolos e Neossolos Regolíticos); 22 pontos para o geoambiente II (solos Luvisolos Crômicos vérticos) e apenas 5 pontos para o geoambiente III (solos Neossolos Litólicos).

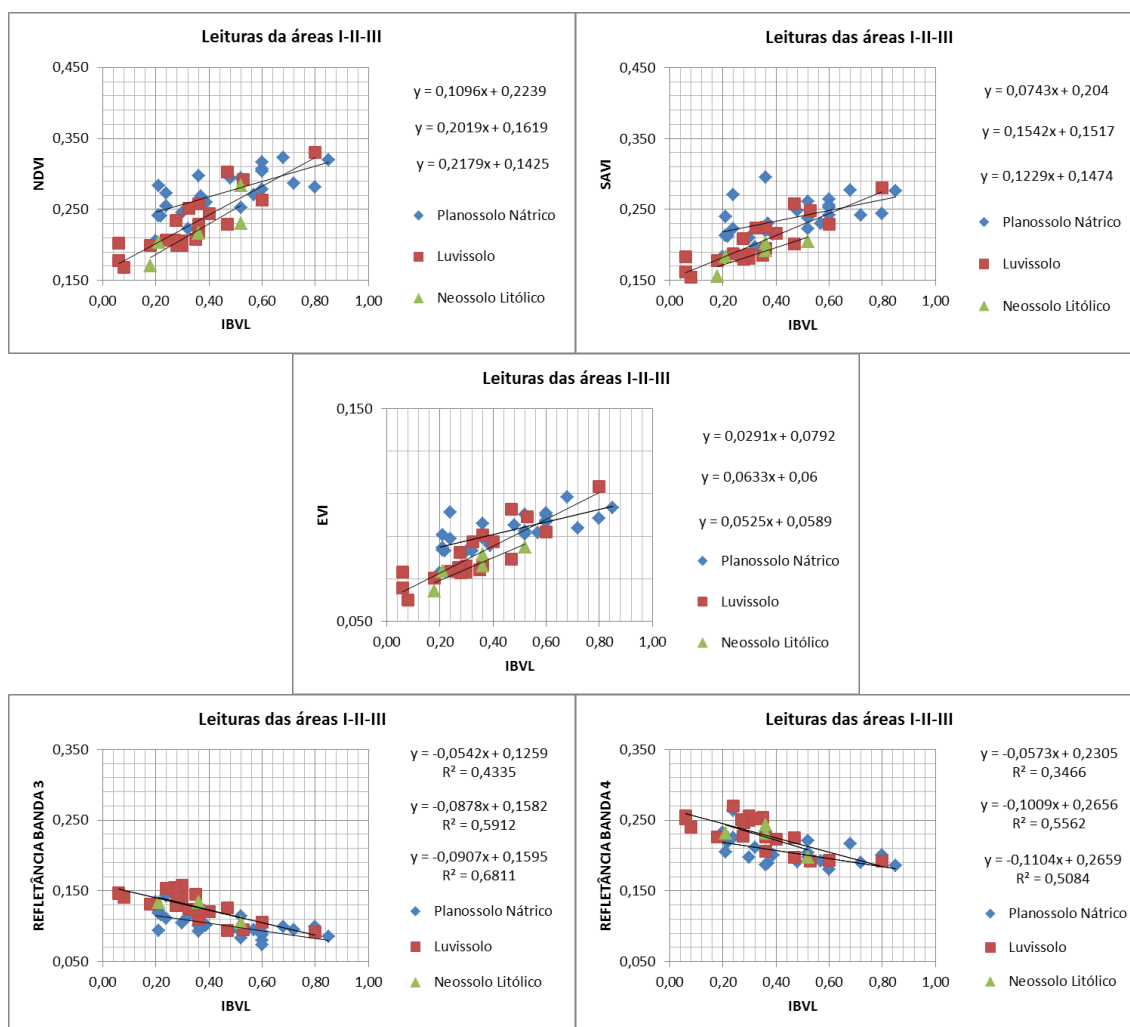


Figura 17. Correlações entre índices espectrais e biomassa de vegetação de Caatinga para diferentes unidades de mapeamento de solos (geoambientes), na bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB.

No geral, as correlações foram mais baixas para todos os índices de vegetação (IV's) para a área I, dos Planossolos e Neossolos Regolíticos, como se observa (Tabela

14), com valores variando de $r^2 = 0,2971$, para o SAVI, a $r^2 = 0,5137$ para o EVI, demonstrando maior dispersão dos valores das leituras para este geoambiente. Para os demais geoambientes as correlações foram todas mais altas, sendo positivas para o NDVI, SAVI e EVI e com valores de r^2 maiores que 0,705 e negativas e com valores mais baixos para as Bandas 3 e 4.

Tabela 14. Equações e valores de correlações entre índices espectrais (valores y) e biomassa da vegetação lenhosa (valores x) para diferentes unidades de mapeamento de solos (geoambientes), na bacia hidrográfica do rio Taperoá

Índices e Bandas	Solos	Equação	r^2
NDVI	Área I	$y = 0,1096x + 0,2239$	0,5114
	Área II	$y = 0,2019x + 0,18619$	0,7528
	Área III	$y = 0,2179x + 0,1425$	0,7393
SAVI	Área I	$y = 0,0743x + 0,204$	0,2971
	Área II	$y = 0,1542x + 0,1517$	0,7451
	Área III	$y = 0,1229x + 0,1474$	0,7054
EVI	Área I	$y = 0,0291x + 0,0792$	0,5137
	Área II	$y = 0,0633x + 0,06$	0,7638
	Área III	$y = 0,0525x + 0,0589$	0,8067
Banda 3	Área I	$y = -0,0542x + 0,1259$	0,4335
	Área II	$y = -0,0878x + 0,1582$	0,5920
	Área III	$y = -0,0907x + 0,1595$	0,6811
Banda 4	Área I	$y = -0,0573x + 0,2305$	0,3466
	Área II	$y = -0,1009x + 0,2656$	0,5562
	Área III	$y = -0,1104x + 0,2659$	0,5084

Fazendo uma análise conjunta da distribuição dos pontos das correlações (Figura 17), observa-se que os valores das leituras para alvos com IBVL entre 0,20 e 0,40, correspondendo a uma cobertura rala à aberta de vegetação (Tabela 12), são mais altos para os índices de vegetação NDVI, SAVI e EVI, e mais baixos para as Bandas 3 e 4, para o geoambiente I (Planossolos e Regossolos), em relação aos demais ambientes. É provável que a maior reflectância dos solos mais claros em relevo suave ondulado do geoambiente I tenha influenciado os valores dos índices de vegetação.

Segundo Leblon (2011) e Moreira (2005), índices de vegetação resultantes de combinações entre bandas espectrais partem do pressuposto que cada tipo de solo apresenta uma curva de resposta espectral característica (linha do solo), que se modifica à medida em que a presença da vegetação passa a interferir e, posteriormente, a predominar sobre a superfície do solo (linha da vegetação); é o que se observa para os dados (Figura 16), sempre que a biomassa aumenta (IBVL maior que 0,40), e os valores das leituras dos diversos índices passam a apresentar uma mesma tendência.

No conjunto dos dados o índice EVI seguido do NDVI com valores muito próximos, apresentaram as melhores correlações (Tabela 14). Contudo, os valores de EVI, apesar de apresentarem menor dispersão (Figura 17), são distribuídos numa pequena amplitude de valores de leituras, de 0,060 a 0,120, dificultando a discriminação dos limites das classes para estimativa da biomassa da vegetação de Caatinga. Apesar da maior dispersão dos valores das leituras do NDVI, a amplitude das leituras é maior, de 0,160 a 0,330, o que facilita a discriminação dos dados de estimativa da biomassa da vegetação além de que, o NDVI é um índice amplamente utilizado e recomendado pela ONU para avaliar a vegetação nos trabalhos sobre desertificação em todo o mundo (Moreira, 2004; Menezes e Netto, 2001).

4.2. Discriminação de coberturas e uso das terras da bacia

Considerando que o índice da vegetação da diferença normalizada (NDVI) foi o tratamento digital mais adequado para a discriminação de fáceis da vegetação da Caatinga será utilizado, assim, na tentativa de se obter um maior número de classes de cobertura e uso da terra. Como se observa na Figura 18, são apresentados, comparativamente, a amplitude dos valores das leituras do NDVI para o período seco, para vegetação de Caatinga e os diferentes alvos identificados e descritos na bacia do rio Taperoá.

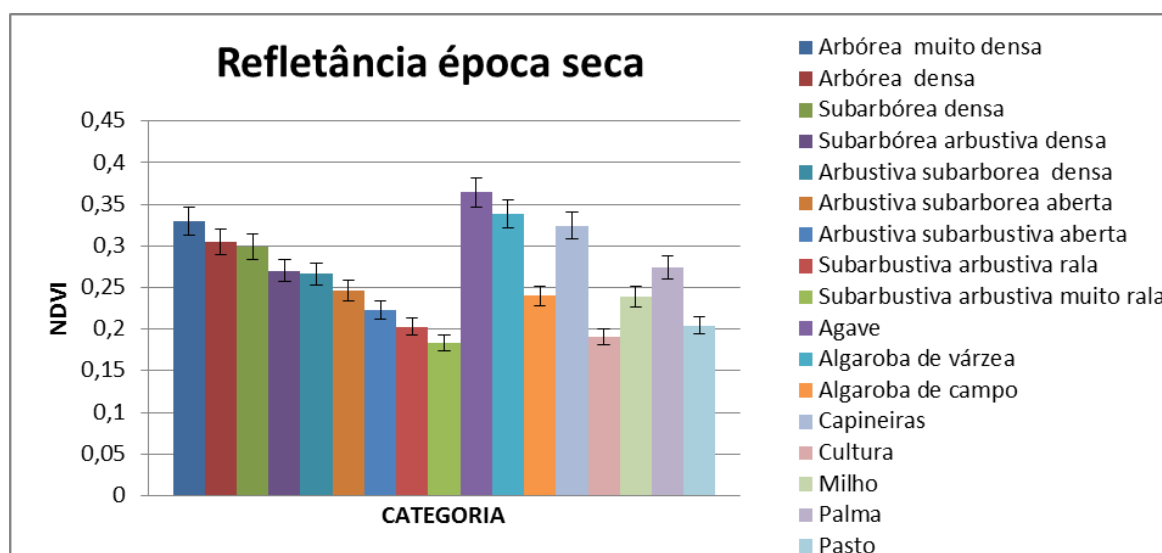


Figura 18. Valores de NDVI obtidos no período seco para diferentes classes de vegetação de Caatinga e de culturas identificadas na área de estudo.

Para o período seco do ano (Figura 18), as áreas abertas utilizadas como pastagem e culturas irrigadas se confundem com as leituras de NDVI das classes de vegetação de Caatinga subarborescente rala e muito rala, com valores em torno de 0,200. É importante frisar que as áreas irrigadas, identificadas neste trabalho, são de culturas de ciclo curto e de pequeno porte, como tomate, feijão e cebola, no entorno do açude Mucutu, no município de Juazeirinho que, em muitas situações, apresentam uma baixa densidade de recobrimento da superfície do solo (Figura 19). Interessante é que, para o período úmido os valores de NDVI se repetem (Figura 20). Em áreas irrigadas com culturas permanentes os valores de NDVI são mais altos, superiores a 0,600 (Silva et al., 2009; Viganó et al., 2011).



Figura 19. Cultura irrigada do tomate e da batata doce.

Para a área de milho e a de algaroba de campo no período seco (Figura 18) os valores de NDVI, em torno de 0,240, são comparáveis aos da Caatinga Arbustiva subarborescente aberta. No caso do milho foram consideradas áreas identificadas no campo com a palhada da cultura uma vez que nesta época do ano não existe, em condições de sequeiro, cultura fotossinteticamente ativa. O confundimento das leituras com a Caatinga de porte maior pode ser explicado pela maior densidade da palhada em relação à vegetação nativa de maior porte (Figura 20). Ressalta-se que a resolução espacial do sensor TM LANDSAT-5 é de 30 metros; portanto a resposta espectral registrada em cada pixel é uma média dos componentes vegetais que cobrem uma área de 30 x 30 m; outrossim e segundo Maldonado (2005), a absorção da energia luminosa na Caatinga seca, se dá pelo componente de sombreamento da porção lenhosa (troncos e galhos). Caso em que é possível que este efeito de sombreamento, seja equivalente para os dois tipos de cobertura da terra.



Figura 20. Cultura do milho na época seca.

No caso da algaroba de campo, estas são normalmente espaçadas a cada 8 a 10 m, e nem sempre apresentam porte e densidade de recobrimento uniformes; contudo, neste caso os valores relativamente altos das leituras na imagem (Figura 18), podem ser explicados pela coleta de dados em áreas com respostas mais homogêneas e coerentes com a descrição no campo. Embora em muitos casos os bosques de algaroba não correspondam a densidade diversificada de um campo Arbustivo subarbóreo aberto de Caatinga, é possível que o componente fotossinteticamente ativo da folhagem persistente nesta época ano, possa ter elevado os valores das leituras.

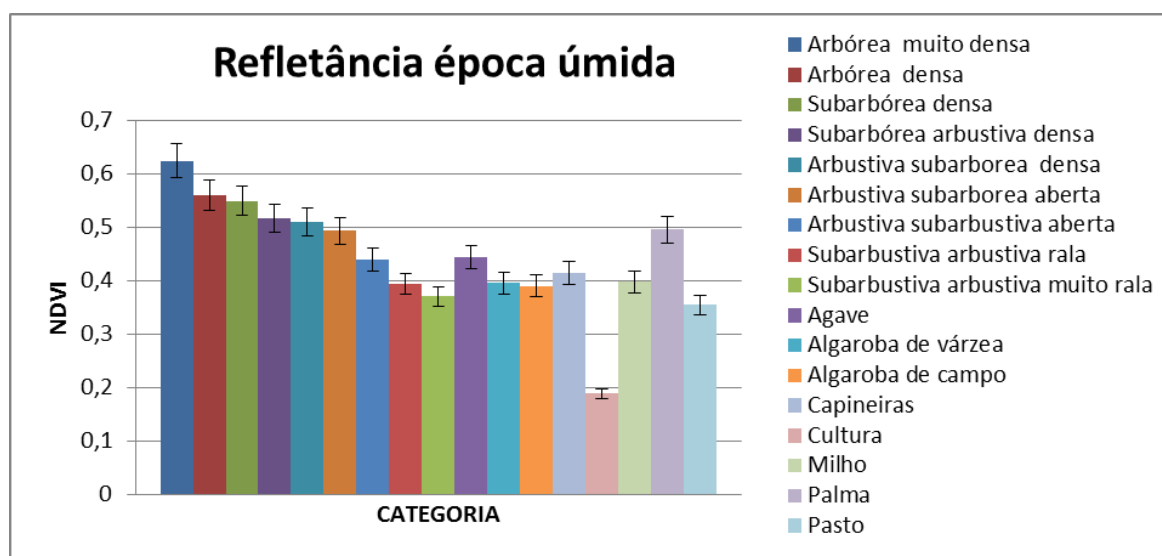


Figura 21. Valores de NDVI obtidos no período úmido para diferentes classes de vegetação de Caatinga e de culturas identificadas na área de estudo.

A categoria Capineiras (Figuras 18 e 21) apresenta sempre valores elevados de leituras pois, em muitos casos, apresenta algum tipo de irrigação permanente ou de salvação ou, se localizam em áreas de várzea com maior disponibilidade de umidade (Figura 22). Daí, o componente, atividade fotossintética atuante, e os mais altos valores de NDVI, comparáveis aos de uma Caatinga Arbórea muito densa, no período seco do ano. Para o período úmido (Figura 21) as leituras das áreas com capineira são comparáveis às

das áreas de Caatinga subarbustiva arbustiva rala. Para a vegetação de Caatinga os valores de NDVI praticamente dobram.

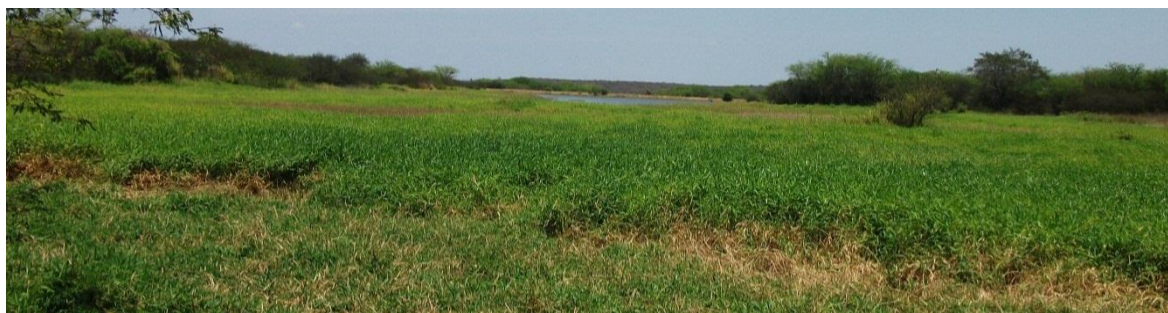


Figura 22. Campineira em área de várzea.

Por permanecer fotossinteticamente ativa nesta época do ano, e ocorrer na forma de bosques arbóreos mais densos, a algaroba de várzea no período seco (Figura 18), apresenta valores de NDVI em torno de 0,340 na média, superiores aos valores encontrados para a Caatinga Arbórea muito densa. Embora se confundam com outras espécies da vegetação ciliar, bosques de algaroba pela posição que ocupam na paisagem são facilmente identificados nas imagens, nesta época do ano. Observar-se que na época úmida (Figura 21) os bosques de algaroba se confundem com as áreas de Caatinga de menor porte e densidade de recobrimento.

Embora ainda não se tenha estudos específicos do comportamento espectral de plantas da Caatinga ou de culturas como o Sisal e a Palma Forrageira, é importante destacar e comentar os dados observados neste trabalho; através de sua coloração, verde intenso permanente, essas plantas, se destacam visualmente da vegetação seca da Caatinga; são plantas de folhas suculentas mas de arquitetura diferenciada. Os campos de palma, por tradição do cultivo na região, se encontravam cobertos por ervas e até plantas lenhosas colonizadoras (Figura 23). Com que é possível que áreas com melhores condições de cultivo possam apresentar valores mais elevados de NDVI.



Figura 23. Plantio de palma em abandono e palma nova em cultivo.

De modo geral, os resultados observados por Chaves et al. (2012), em uma sub-bacia desta área de estudo, são semelhantes aos encontrados neste trabalho; apenas áreas

ocupadas com cultura de sisal, algaroba de várzea e outras vegetações ciliares é que podem ser discriminadas automaticamente pela técnica de tratamento de bandas espectrais.



Figura 24. Cultura do Agave abandonada.

4.3. Mapeamento da vegetação de Caatinga

4.3.1. Considerações para o estabelecimento das classes de mapeamento

Para determinação das classes de vegetação e seus limites foi utilizada a curva teórica de correlação (Figura 25). Para o estabelecimento desta correlação procurou-se selecionar leituras crescentes de valores de biomassa deixando-se três pontos representativos para cada classe de vegetação estabelecida. Com este procedimento o valor da correlação aumentou consideravelmente ($r^2 = 0,8456$).

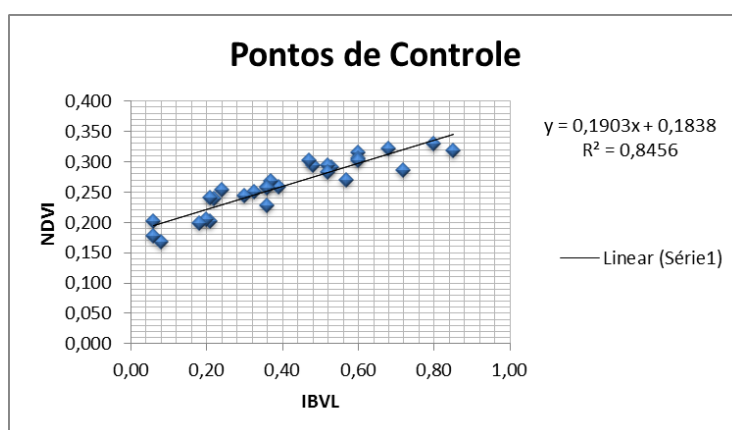


Figura 25. Pontos selecionados com leituras representativas de valores crescentes de biomassa.

A partir da reta teórica de determinação foram escalonados limites fixos para as classes de biomassa (IBVL) e determinados os valores limites correspondentes de NDVI, NDVI pela equação da reta ($y = 0,1903x + 0,1838$). Complementarmente, foram

estabelecidos os limites da classe, solo exposto, considerando-se como limite superior, o ponto de leitura com IBVL igual ou menor que 0,05 e de NDVI igual ou menor que 0,150; e, para a classe corpos d'água, leituras de NDVI iguais a zero ou negativas. As tipologias e os limites das leituras estabelecidas para o mapeamento das terras da bacia são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Classes de vegetação e valores limites correspondentes de IBVL e NDVI

Classes	IBVL	NDVI
Arbórea Subarbórea densa	> 0,60	>0,300
Subarbórea Arbustiva densa	0,50 a 0,60	0,285-0,300
Arbustiva Subarbórea densa	0,40 a 0,50	0,265-0,285
Arbustiva Subarbórea aberta	0,30 a 0,40	0,250-0,265
Arbustiva Subarbustiva aberta	0,20 a 0,30	0,225-0,250
Subarbustiva Arbustiva rala	0,10 a 0,20	0,180-0,225
Subarbustiva Arbustiva muito rala	0,05 a 0,10	0,150-0,180
Solo exposto	< 0,05	0-0,150
Corpos d'água		<0

4.3.2. Mapeamento da vegetação de Caatinga

Com base nos limites estabelecidos foram mapeadas as classes de vegetação da cobertura da terra da bacia hidrográfica, conforme a representação do mapa (Figura 26); posteriormente foram calculadas as áreas correspondentes às classes mapeadas (Tabela 16).

Tabela 16. Áreas de ocupação em km² e porcentagem das classes de vegetação de Caatinga e cobertura de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Taperoá

Classes de vegetação e uso da terra	Áreas	
	(km²)	(%)
Arbórea Subarbórea densa	1.042,5	18,3
Subarbórea Arbustiva densa	369,4	6,5
Arbustiva Subarbórea densa	582,1	10,2
Arbustiva Subarbórea aberta	666,5	11,7
Arbustiva Subarbustiva aberta	1.101,1	19,4
Subarbustiva Arbustiva rala	1.368,6	24,1
Subarbustiva Arbustiva muito rala	251,8	4,4
Solo exposto	55,4	1,0
Corpo d'água	32,1	0,6
Nuvem	216,9	3,8
Área Total	5.686,4	100,00

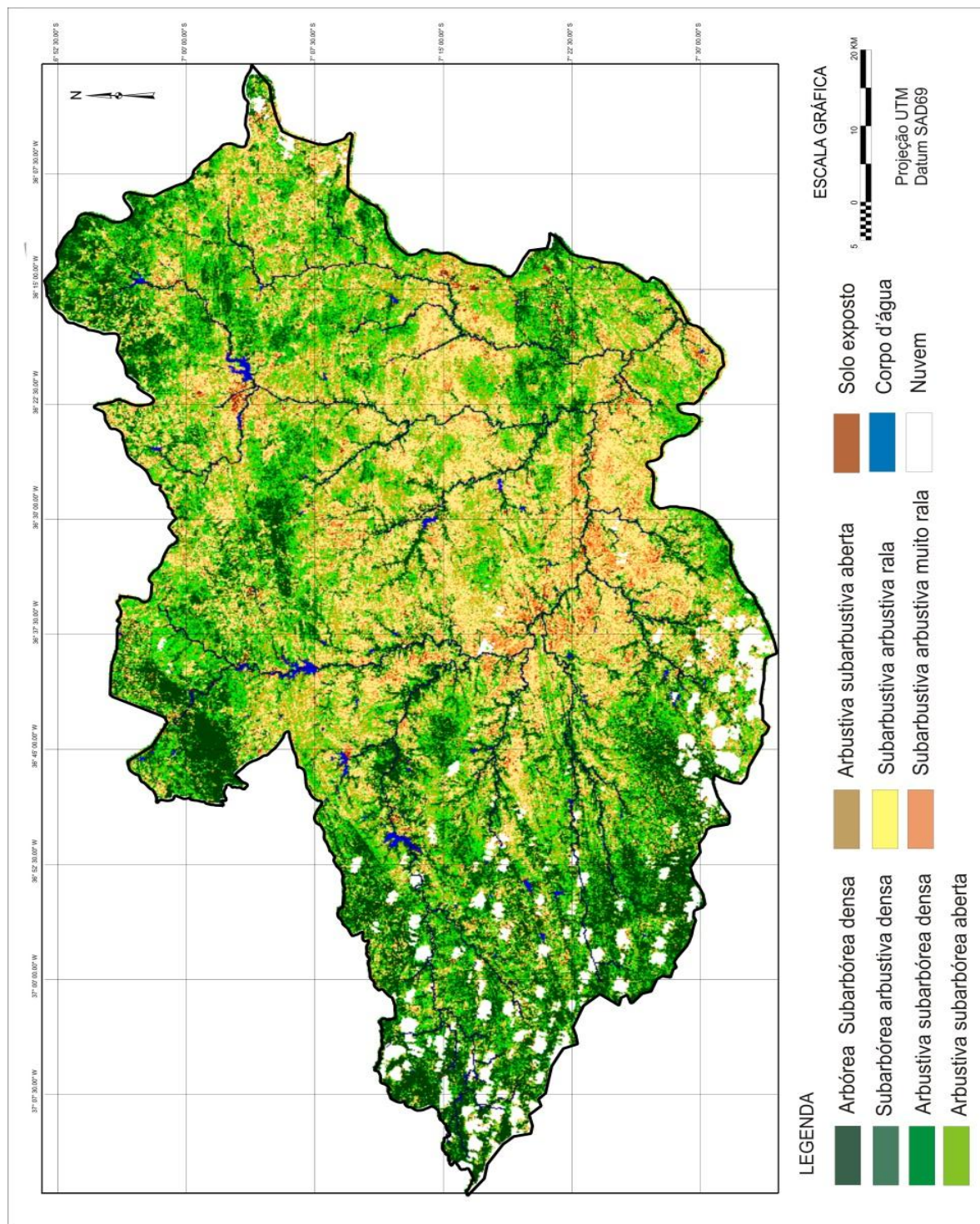


Figura 26. Mapa de tipologias de vegetação de Caatinga da bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB.

Em uma análise conjunta da bacia hidrográfica (Figura 26), pode-se observar que o terço sudoeste é onde se concentra o maior percentual de áreas com vegetação de maior porte e densidade. Relacionando as principais redes de drenagem desta área da bacia com os territórios municipais (Figura 4), de sul para oeste, pode-se identificar o rio Serra Branca, a segunda e maior drenagem dentro do município; em seguida, o rio de São José dos Cordeiros; o rio de Livramento e, por fim, o alto Taperoá, englobando os municípios de Taperoá, Desterro, Cacimbas e parte do município de Teixeira.

Neste trecho, vale a referência à Fazenda Almas, a maior RPPN (Reserva Particular do Patrimônio Natural) do Estado, com 5.503 hectares, facilmente identificada nas cabeceiras do rio de São José dos Cordeiros, observando-se uma área de vegetação mais densa, na altura do centro da linha sudoeste do divisor da bacia. Esta parte a sudoeste da bacia, é uma área na qual o mapeamento ficou bastante prejudicado pela ocorrência de nuvens (Figura 26).

Fazendo uso do mapa hipsométrico (Figura 5) e do mapa de solos (Figura 6), pode observa-se que existe uma estreita relação entre áreas mais altas (500 a 700m) e solos Litólicos com unidades mais densas de vegetação, estas representadas pela classe Arbórea subarbórea densa, Subarbórea arbustiva densa (Figura 27) e Arbustiva subarbórea densa, que ocupam 1.042,5 km², 369,4 km² e 582,1 km², respectivamente correspondendo, no conjunto a 35% da área da bacia (Tabela 14).

Paes-Silva et al. (2003) e Guimarães (2009), também observaram trabalhando em sub-bacias desta área de estudo, também observaram esta relação entre vegetação e áreas declivosas e de difícil acesso.



Figura 27. Vegetação de Caatinga classe Subarbórea arbustiva densa.

Acompanhando a linha do divisor de oeste para nordeste, a vegetação mais densa recobre as áreas mais declivosas, associadas aos solos Litólicos e Cambissolos eutrófico, nos municípios de Cacimbas e Taperoá. Seguindo esta mesma linha do divisor na área central, pode-se observar uma grande área vegetada associada ao solo Litólico originário de quartzito e filito da serra da Viração, recobrindo parte dos municípios de Assunção, Salgadinho e Junco do Seridó. Após a serra da Viração e apesar da altitude próxima a 600 m, o relevo é suave na linha do divisor com a ocorrência dos solos Neossolos Regolíticos, área agrícola densamente povoada; em seguida, a nordeste, no município de Olivedos limitando-se a Barra de Santa Rosa nas nascentes do rio de Soledade, ocorrem inúmeros fragmentos de vegetação densa sugerindo áreas protegidas de reserva legal de propriedades, apesar da ocorrência de solos Neossolos Regolíticos, potencialmente agrícolas (Figura 28).



Figura 28. Área de Neossolo Regolítico com agricultura.

Ainda associada à altitude e solos Litólicos, destaca-se uma área de vegetação densa, na área centro norte da bacia, no município de Juazeirinho, que corresponde a uma linha de serra, divisor interno de sub-bacias e a sudeste, próximo à foz do rio Taperoá, no município de Cabaceiras, limite com Boa Vista, áreas de Afloramentos rochosos associadas aos solos Litólicos.

As áreas mais desnudas de vegetação estão mais próximas da drenagem e aumentam à medida em que diminui de altitude e se aproximam do ponto de deságue da bacia. As classes, solo exposto (Figura 29) e Subarbusativa arbustiva muito rala (Figura 30), com 55,4 km² e 251,8 km² (Tabela 16), respectivamente, que corresponde a 5,4% da área total da bacia, ocorrem numa grande extensão ao longo do terço médio inferior do rio Taperoá, abrangendo os municípios de São João do Cariri, Serra Branca, Parari e São José dos Cordeiros.



Figura 29. Solo exposto.



Figura 30. Vegetação de Caatinga classe Subarbustiva arbustiva muito rala.

Enquanto a classe Subarbustiva arbustiva rala (Figura 31) que, isoladamente, ocupa 1.368,6 km², corresponde a 24,1% da área total (Figura 20) distribuindo-se em grande parte, nos interflúvios mais baixos da drenagem, abaixo da cota de 450m e acima desta cota passa a ocorrer, em parte dos interflúvios e no terço inferior das encostas ao longo dos canais de drenagem. Nessas áreas de vegetação mais rala e desnuda, além de representar áreas degradadas de vegetação de Caatinga, engloba áreas de cultivo e de pastagem.

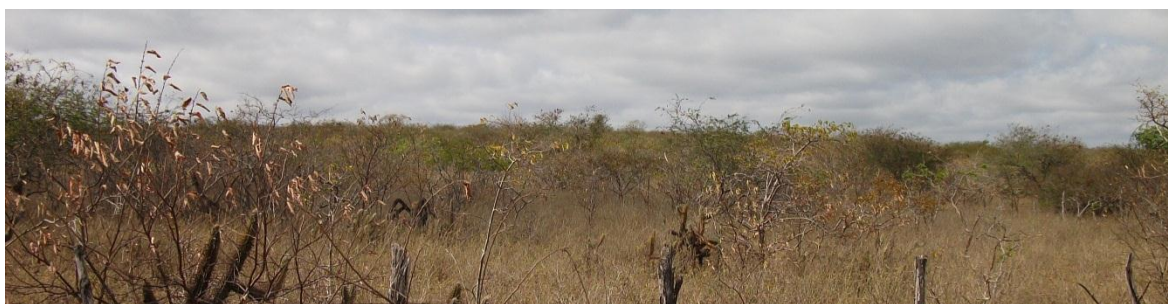


Figura 31. Vegetação de Caatinga classe Subarbustiva arbustiva rala.

Finalmente, as áreas abertas com vegetação das classes Arbustiva subarbustiva, com 1.101,1 km² e Arbustiva subarbórea, com 665,5 km², correspondem a 31,1% da área

da bacia (Tabela 16) e se distribuem de forma difusa entre os interflúvios da parte mais alta ao longo das encostas acompanhando a drenagem, e nas áreas de transição da vegetação nos divisores e serras. Em grande parte essas áreas abertas são de pastagem natural para o rebanho bovino (Figura 32).



Figura 32. Caatinga Arbustiva subarbustiva aberta.

Para as áreas de vegetação de Caatinga pode-se afirmar que a classe predominante é a Arbustiva subarbustiva aberta (Figura 33) com 1.101,11 km² correspondendo a 19,36% (Tabela 16).



Figura 33. Vegetação de Caatinga classe Arbustiva subarbustiva aberta.

Observa-se que a distribuição da classe Arbórea subarbórea densa (Figura 26), com 1.042,54 km² representando 18,33% ocorre, na sua maioria, em áreas de divisores da bacia

localizadas ao norte e oeste e nas áreas de drenagem ao longo da bacia, tal como também, em áreas isoladas (Figura 34).



Figura 34. Vegetação de Caatinga Arbórea subarbórea densa.

4.3.3. Estimativa da biomassa lenhosa e degradação da vegetação da Caatinga

A estimativa da biomassa lenhosa foi feita a partir da descrição e classificação da vegetação de Caatinga de acordo com a proposta apresentada por Chaves et al. (2008) e, de forma complementar, será realizada uma estimativa do grau de degradação da cobertura vegetal da bacia de Taperoá.

4.3.3.1. Estimativa da biomassa da vegetação lenhosa da Caatinga

O volume da biomassa lenhosa da bacia hidrográfica do rio Taperoá foi estimado em 20.255.100 m³ (Tabela 17). Na metodologia adotada, o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL) é determinado a partir da descrição da vegetação, em termos de porte e densidade de recobrimento do terreno.

Adotou-se, como volume de referência, a estimativa apresentada por Francelino et al. (2003), relativo à produtividade de uma área de Caatinga preservada, descrita como

Caatinga fechada do tipo florestal 4, com alto valor de recobrimento do solo e com presença de sub-bosques, apresentando um volume médio de madeira de $108\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$. Sendo assim, e se multiplicando pelo valor médio do IBVL de cada classe de vegetação (Tabela 17), obteve-se o rendimento médio por hectare de biomassa de cada classe de vegetação. Observa-se, nesta Tabela, que o rendimento médio de madeira por hectare variou de $8,1\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ para a classe Subarbastiva arbustiva muito rala a $70,2\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ para a classe Arbórea subarbórea densa.

Tabela 17. Dados de referência para estimativa do volume da biomassa lenhosa

Clases	Volume Referência ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$)	IBVL médio	Rendi- mento ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$)	Área (ha) $\times 10^2$	Volume de Biomassa ($\text{m}^3.10^3$)
Arbórea Subarbórea densa	108	0,65	70,2	1.042,5	7.318,4
Subarbórea Arbustiva densa	108	0,55	59,4	369,4	2.194,2
Arbustiva Subarbórea densa	108	0,45	48,6	582,1	2.829,0
Arbustiva Subarbórea aberta	108	0,35	37,8	666,5	2.519,4
Arbustiva Subarbastiva aberta	108	0,25	27,0	1.101,1	2.973,0
Subarbastiva Arbustiva rala	108	0,15	16,2	1.368,6	2.217,1
Subarbastiva Arbustiva muito rala	108	0,075	8,1	251,8	204,0
Solo exposto	-	-	0	55,4	0
Corpo d'água	-	-	-	32,1	-
Nuvem	-	-	-	216,9	-
Total	-	-	-	5.686,4	20.255,1

Para áreas de assentamento do INCRA, no Rio grande do Norte, Francelino et al. (2003) encontraram rendimentos de madeira, além do valor utilizado como referência neste trabalho; valores de $52,6\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ e $23,1\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$, foram encontrados para áreas de vegetação descritas como Arbustivo-arbóreo fechado e aberto, respectivamente. Costa et al. (2002), encontraram avaliando a biomassa da Caatinga do sertão do Seridó, no Rio Grande do Norte, um coeficiente de correlação de 0,76 entre medidas de parcelas de campo e estimativas a partir de leitura de NDVI. As determinações de biomassa variaram desde $2\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ a $48\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$, de parcelas descritas como Caatinga aberta, com malva e capim Panasco, e Caatinga arbórea secundária densa, respectivamente.

Já Silva et al. (2008), encontraram trabalhando em áreas de assentamento, no Estado de Pernambuco, embora não descreva o tipo de vegetação, um valor médio de produção de madeira de $31,2\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ e valor máximo de $57,8\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$.

Embora as metodologias de descrição e avaliação sejam diferentes, e a diversidade e predominância das espécies, além do estado de maturação e conservação da vegetação, os dados encontrados neste trabalho para estimativa da biomassa da vegetação de Caatinga são compatíveis com os valores da literatura.

Assim, como mostra a Tabela 17, para cada classe de vegetação o volume total de biomassa lenhosa é estimado pelo produto entre o rendimento médio e a área ocupada por cada classe de vegetação na bacia hidrográfica. Observa-se que os valores de biomassa lenhosa totais, variaram em cada classe de vegetação de 204.000 m³ ha⁻¹, para a classe Subarbustiva arbustiva muito rala, a 7.318.400 m³ ha⁻¹, para a classe Arbórea subarbórea densa (Tabela 17).

4.3.3.2. Estimativa da degradação da vegetação lenhosa da Caatinga

A estimativa da degradação da vegetação da Caatinga embora assuma as limitações até então impostas à obtenção dos dados deste trabalho, qual seja, o grau de imprecisão das estimativas das classes de vegetação e a impossibilidade de discriminação dos diferentes tipos de uso da terra pela facilidade para obtenção da informação, pode ser considerada um parâmetro quantitativo importante para medir o grau de intervenção humana e o estado de conservação de uma bacia hidrográfica. Por não separar outros tipo de uso da terra esta metodologia considera toda a área da bacia hidrográfica como passível de recomposição vegetal e, portanto, desconsidera toda e qualquer forma de ocupação humana.

Na Tabela 18 são apresentados os dados para estimativa da degradação da vegetação da bacia hidrográfica. Classes de mapeamento da vegetação e cobertura da terra com suas respectivas áreas de abrangência, valor de referência e das frações de degradação da biomassa, com os quais se procedeu aos cálculos da estimativa da degradação.

Observa-se, na Tabela 18, que da área total da bacia hidrográfica foram descontadas as áreas relativas a corpos d'água e cobertura de nuvem, para o cálculo da área útil. Considerando-se a condição hipotética de máxima preservação, para um volume de referência de 108 m³ ha⁻¹ de madeira, aqui considerada como sinônimo de biomassa lenhosa, o volume total hipotético de madeira da bacia hidrográfica seria de 58.723.900 m³; ou seja, em termos de metros lineares de lenha empilhada seria um total de 199.661.260 metros (1 m³ de madeira = 3,4 estéreis, metro cúbico de lenha empilhada).

Tabela 18. Dados e estimativa da degradação da vegetação

Classes	Volume Referênci a (m³ ha⁻¹)	Fração de Degradação (1-IBVL)	Volume Degrado (m³ ha¹)	Área (ha) x 10²	Volume Biomass a (m³ 10³)
Arbórea Subarbórea densa	108	0,35	37,8	1.042,5	3.940,7
Subarbórea Arbustiva densa	108	0,45	48,6	369,4	1.795,3
Arbustiva Subarbórea densa	108	0,55	59,4	582,1	3.477,7
Arbustiva Subarbórea aberta	108	0,65	70,2	666,5	4.678,8
Arbustiva Subarbustiva aberta	108	0,75	81,0	1.101,1	8.918,9
Subarbustiva Arbustiva rala	108	0,85	91,8	1.368,6	12.563,7
Subarbustiva Arbustiva muito rala	108	0,925	99,9	251,8	2.515,5
Solo exposto	108	1,00	108,0	55,4	598,3
Corpo d'água	-	0,00	-	0,0	-
Nuvem	-	0,00	-	0,0	-
Área útil e volume de degradação	-	-	-	5.437,4	38.488,9
Máximo de biomassa	108	-	-		58.723,9
Índice de Degradação	-	-	-	-	65,5%

Calculadas as frações de degradação de cada classe de vegetação em relação à condição de máxima preservação, coluna 3 (Tabela 18), estimam-se pelo produto das áreas ocupadas por cada classe de vegetação, os totais de biomassa degradada de cada classe de vegetação, e pela soma dos totais de cada classe, a biomassa degradada total da bacia hidrográfica, que foi de 38.488.900 m³. Estabelecendo a razão comparativa entre o volume total de biomassa degradada em relação ao volume hipotético total de biomassa da bacia expresso em porcentagem, obteve-se o índice de degradação de biomassa da vegetação lenhosa de 65,5%.

Cálculo estimativo utilizando os dados do diagnóstico da vegetação da bacia hidrográfica do açude de Soledade, realizado por Guimarães (2009), utilizando metodologia semelhante à deste trabalho, chegou a um índice de degradação de 72%. A bacia de Soledade é uma sub-bacia desta área de estudo, portanto, um valor compatível com o encontrado neste trabalho.

Mesmo apesar de todas as limitações impostas por esta metodologia e devido à sua praticidade e economia, o índice de degradação da vegetação dela decorrente poderá servir de parâmetro quantitativo para representar o grau de intervenção das atividades humanas e degradação ambiental de bacias hidrográficas.

4.4. Estimativa da degradação das terras

4.4.1. Declividade do solo e risco de erosão

A declividade é uma componente relacionada à ação da gravidade. Os estudos de pesquisa em parcelas de erosão mostram que as perdas de solo aumentam exponencialmente, quando também aumenta a declividade do terreno; sendo assim, é de se esperar que, mantidas as demais condições constantes, aumentando a declividade, aumenta o risco potencial de ocorrer erosão.

Fundamentado nos princípios conservacionistas da Classificação de Capacidade de Uso das Terras, forma adotados neste trabalho, os mesmos limites das quatro primeiras classes daquela classificação. Pelos dados apresentados (Figura 35 e Tabela 19), observa-se que pela metodologia utilizada, 59,28% das terras da bacia apresentam relevo plano, ou seja, está na classe muito baixa de vulnerabilidade, 0 a 3% de declividade; somando-se a classe baixa, 3 a 6% de declividade, este percentual chega a 87%; pelo exposto, pode-se afirmar que as terras da bacia em estudo são predominantemente planas a suave onduladas, com declividades inferiores a 6%.

Tabela 19. Classes de vulnerabilidade devido à declividade e áreas de ocorrência

Classes de Vulnerabilidade	Declividade (%)	Área	
		(km ²)	(%)
Muito Baixa	0 – 3	3.369,98	59,28
Baixa	3 – 6	1.575,83	27,71
Média	6 – 12	501,79	8,82
Alta	12 – 20	153,51	2,70
Muito Alta	> 20%	85,26	1,49
Total		5.686,37	100,00

Confrontando o mapa de declividade (Figura 35) com o mapa de solos (Figura 6), observa-se que a distribuição das áreas mais planas de classe muito baixa e baixa de declividade (Figura 36), está associada, predominantemente, aos solos Neossolo Regolítico e Planossolo Nátrico, corroborando com as observações de Francisco (2010). Esses solos ocorrem nas áreas interiores, nos interflúvios das principais drenagens da bacia; ao norte, ao longo da linha do divisor predominam os Neossolos Regolíticos, e a leste, os Planossolos Nátricos.

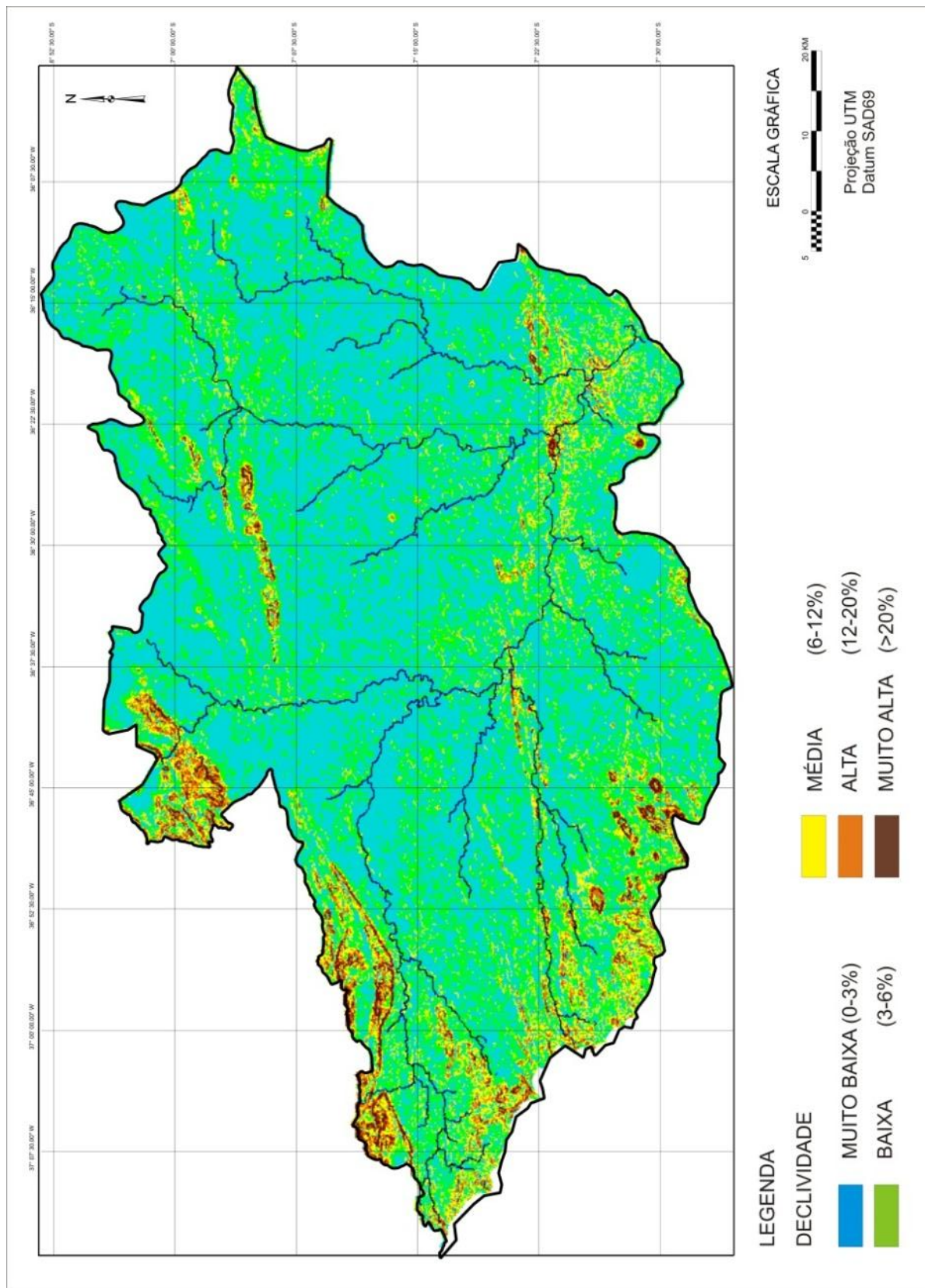


Figura 35. Mapa de declividade da área de estudo.



Figura 36. Áreas planas com presença de Neossolos Regolíticos.

As áreas mais declivosas da bacia das classes alta e muito alta estão relacionadas aos solos Neossolos Litólicos, que se distribuem nos contrafortes dos divisores da bacia, a noroeste e a sudoeste, e em áreas de serras interiores (Figura 37). A classe muito alta, representando áreas com declividades superiores a 20%, ocupa 85,3 km², representando 1,49% da área da bacia (Tabela 19). A classe alta, normalmente ocorrendo associada à classe muito alta, ocupa uma área de 153,5 km², o que representa 2,7% da área total.



Figura 37. Área mais declivosa com presença de solos Neossolos Litólicos.

A classe média de declive com terras entre 6% e 12% de declividade, representa área já com forte restrição ao uso com agricultura requerendo o uso intensivo de práticas conservacionistas. Essas terras ocorrem de forma difusa em toda a bacia. No terço mais baixo da drenagem estão fortemente associadas aos Luvisolos Crômicos e no terço oeste da bacia, aos Neossolos Litólicos.

4.4.2. Erodibilidade do solo e risco de erosão

Na Tabela 20 são apresentados os valores dos parâmetros de determinação e da erodibilidade dos solos, com sua classificação. De cada unidade de mapeamento foi analisada a classe de solo predominante utilizando-se dados de textura do horizonte superficial e a drenagem do perfil do solo representativo para cada classe.

Tabela 20. Parâmetros dos solos utilizados para estimativa e classificação da erodibilidade (Fator K)

Solo	Perfil Repres.	Areia (%)	Ar+Silte (%)	Mi	Mc	Drenabilidade	Fator K (Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Classe
LVe3 (Latossolo)	6	55	30	2550	1375	3	0,0197	B
Ce2 (Cambissolo)	89	28	48	3648	1912	1	0,0182	B
Ce5 (Cambissolo)	89	28	48	3648	1912	1	0,0182	B
REd2 (Regossolo)	63 (72)	70	29	2871	1514	1	0,0150	B
V8 (Vertissolo)	95	19	50	3450	1802	5	0,0290	M
V13 (Vertissolo)	95	19	50	3450	1802	5	0,0290	M
SS2 (Planossolo)	43 (72)	51	40	3640	1907	5	0,0298	M
SS7 (Planossolo)	43 (72)	51	40	3640	1907	5	0,0298	M
Ae6 (Aluvial)	43 (72)	51	40	3640	1907	5	0,0298	M
Re39 (Litólico)	52 (72)	40	50	4500	2469	2	0,0255	M
Re48 (Litólico)	52 (72)	40	50	4500	2469	2	0,0255	M
Re74 (Litólico)	52 (72)	40	50	4500	2469	2	0,0255	M
REe3 (Regossolo)	129	54	39	3627	1900	3	0,0239	M
REe12 (Regossolo)	129	54	39	3627	1900	4	0,0269	M
REe14 (Regossolo)	129	54	39	3627	1900	4	0,0269	M
REe16 (Regossolo)	129	54	39	3627	1900	4	0,0269	M
REe17 (Regossolo)	129	54	39	3627	1900	4	0,0269	M
Rd (Litólico)	106	21	61	5002	2870	1	0,0258	M
AR2 (Areia)	152 (72)	40	50	4500	2469	2	0,0255	M
NC25 (Luvissolo)	64	27	58	4930	2809	5	0,0370	A
NC28 (Luvissolo)	64	27	58	4930	2809	5	0,0370	A
NC48 (Luvissolo)	71	27	58	4930	2809	5	0,0370	A
NC49 (Luvissolo)	71	27	58	4930	2809	5	0,0370	A
NC55 (Luvissolo)	71	27	58	4930	2809	5	0,0370	A
NC57 (Luvissolo)	71	27	58	4930	2809	5	0,0370	A
Re21 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re23 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re25 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re26 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re27 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re28 (Litólico)	122	31	59	5310	3148	3	0,0339	A
Re32 (Litólico)	122	31	59	5310	3148	3	0,0339	A
Re61 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re64 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re66 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re70 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
Re72 (Litólico)	53 (72)	32	60	5520	3353	3	0,0355	A
NC24 (Luvissolo)	69/70	18	71	6319	4261	3	0,0427	MA
NC27 (Luvissolo)	71	26	63	5607	3441	5	0,0421	MA
NC30 (Luvissolo)	69/70	18	71	6319	4261	3	0,0427	MA
REe7 (Regossolo)	131	26	70	6720	4805	2	0,0442	MA
REe8 (Regossolo)	131	26	70	6720	4805	2	0,0442	MA
REe18 (Regossolo)	131	26	70	6720	4805	4	0,0500	MA

Fonte: PARAÍBA (1978) e PARAÍBA (1972).

Observa-se (Figura 38), que os resultados obtidos são expressos em megagrama hora por megajoule milímetro; estes foram enquadrados segundo a legenda (Figura 22), em

cinco classes de erodibilidade: Muito baixa (< 0,01); Baixa (0,01 a 0,02); Média (0,02 a 0,03); Alta (0,03 a 0,04) e Muito alta (> 0,04).

Chaves et al. (2004), encontraram utilizando esta mesma metodologia para os solos de todo o Estado da Paraíba, valores variando de 0,010 a 0,054 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, para Latossolo e Planossolo Nátrico, respectivamente; os autores comentam achar esta amplitude de valores relativamente pequena face à diversidade de solos, material geológico e clima, que ocorrem nas diferentes regiões geográficas do Estado. Existem concordâncias com os dados dos Luvisolos e Neossolos Litólicos, normalmente com erodibilidade alta a muito alta. Por outro lado, dos quatro Planossolos estudados por Chaves et al. (2004), apenas um apresentou erodibilidade média concordando com os resultados deste trabalho; enquanto os demais apresentaram alta, e dois, muito alta.

Pelos dados da Tabela 21, observa-se que a classe de erodibilidade alta ocupa uma área de 3.056,3 km² da bacia, representando 53,8% da área total. Consultando a lista dos solos (Tabela 20) constata-se que, predominantemente, os solos representativos desta classe de erodibilidade são os Neossolos Litólicos e os Luvisolos Crômicos. Como se pode observar no mapa de solos (Figura 6) os Luvisolos Crômicos ocorrem no terço médio e inferior da drenagem ocupando, particularmente, os municípios de Cabaceiras, São João do Cariri, Gurjão, Parari e Serra Branca; os Neossolos Litólicos ocorrem à sudoeste da bacia abrangendo parte dos municípios de Serra Branca, São José dos Cordeiros, Livramento e Taperoá.

A classe de erodibilidade muita alta (Figura 39) está associada particularmente, ao solo Neossolo Regolítico, representado pelo perfil 131 do Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba (PARAÍBA, 1978), com ocorrência dispersa em vários pontos da bacia; os Luvisolos Crômicos desta classe de erodibilidade são unidades com áreas menores que ocorrem no divisor da bacia, a nordeste, nos limites dos municípios de Olivedos e Barra de Santa Rosa e, no outro extremo, a sudoeste, no município de São José dos Cordeiros.

Tabela 21. Classes de vulnerabilidade devido à erodibilidade do solos da área de estudo

Classes de Vulnerabilidade	Erodibilidade (Mg mm MJ⁻¹ ha⁻¹)	Área (km²)	Área (%)
Muito Baixa	< 0,01	0	0
Baixa	0,01 a 0,02	130,0	2,3
Média	0,02 a 0,03	2.173,7	38,2
Alta	0,03 a 0,04	3.056,3	53,8
Muito Alta	> 0,04	326,4	5,7
Total		5.686,4	100,0

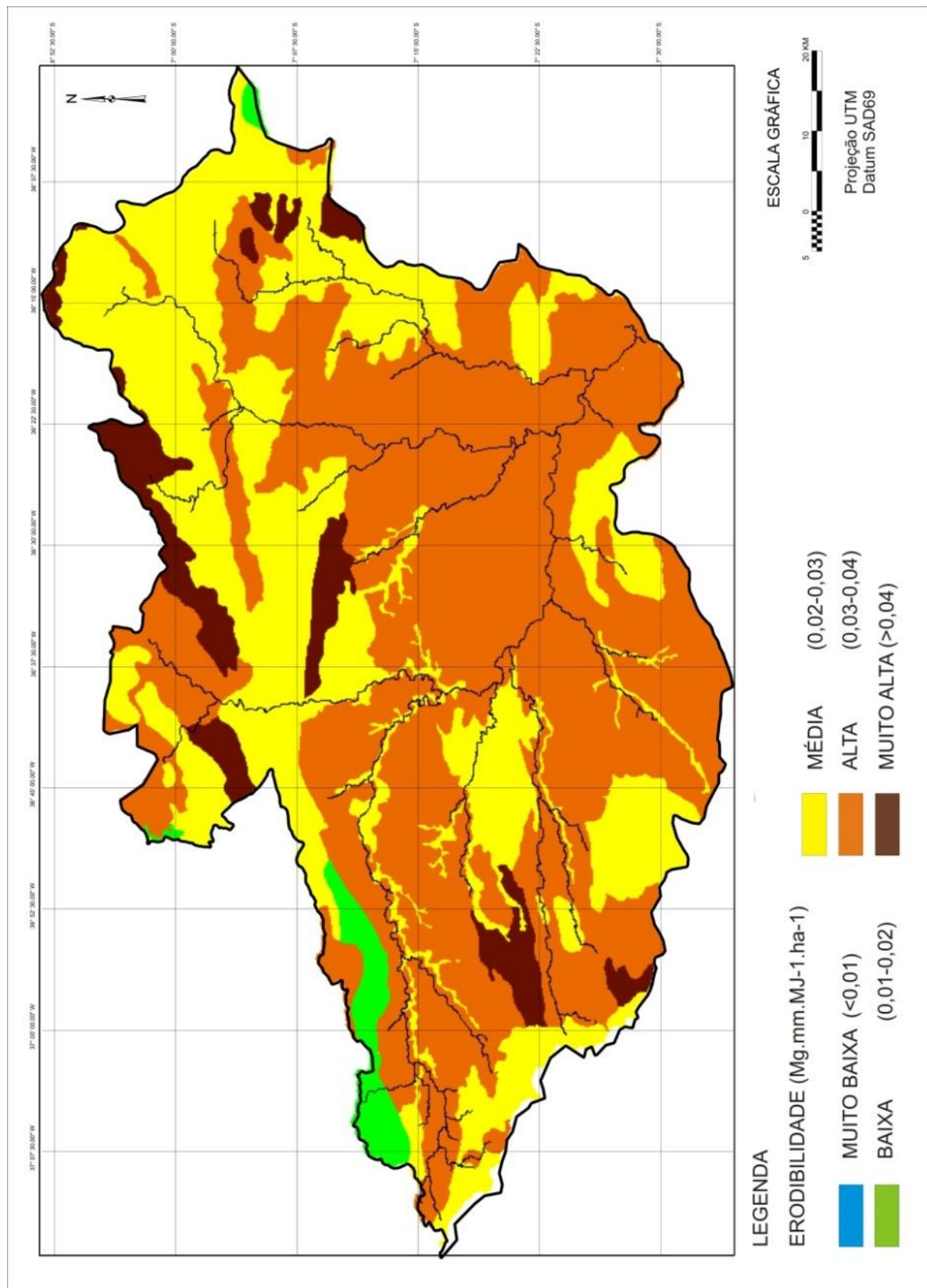


Figura 38. Mapa de erodibilidade dos solos da área de estudo.



Figura 39. Solo Luvisolo Crômico de erodibilidade alta.

A classe de erodibilidade média ($0,02$ a $0,03 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) com a segunda maior representação em área na bacia, $2.173,7 \text{ km}^2$, que corresponde a $38,2\%$ da área total, apresenta a maior diversidade de classes de solos (Tabela 20). Em termos de área, os Planossolos Nátricos são os mais representativos ocorrendo no terço a nordeste da bacia, abrangendo principalmente os municípios de Pocinhos, Olivedos, Soledade e Juazeirinho.

A classe de erodibilidade baixa tem, como principal representante, em termos de área, o Cambissolo, que ocorre em quase todo o município de Cacimbas, a noroeste da bacia; e adentra no município de Taperoá em uma faixa que corre em paralelo à linha de serra do divisor com a bacia do rio Espinharas; outras duas pequenas áreas ocorrem em Latossolo, no município de Junco do Seridó e em Regossolo distrófico, no município de Pocinhos, já sobre o platô da serra, divisor com a bacia do rio Mamanguape. A baixa erodibilidade desses solos está relacionada à maior percentagem de areia no Latossolo e Regossolo e à maior drenabilidade do Cambissolo.

A classe de erodibilidade muito baixa, com valores inferiores a $0,01 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, não teve qualquer representante.

4.4.3. Cobertura do solo e risco de erosão

A Tabela 11 apresenta a classificação da vulnerabilidade das terras da bacia, em termos de grau de proteção do solo, pela cobertura da vegetação, expressa em biomassa

vegetal (IBVL). Como se observa, a vulnerabilidade, ou grau de risco à erosão, é o inverso da biomassa da vegetação; desta forma, foi estabelecido que a classe de risco Muito Baixo, corresponde às áreas com vegetação com IBVL entre 0,8 a 1,0; a classe de risco Baixo, às áreas com IBVL entre 0,6 a 0,8; de risco Médio com IBVL entre 0,4 a 0,6; de risco Alto com IBVL entre 0,2 a 0,4 e de risco Muito Alto com IBVL entre 0,0 a 0,2 (Figura 40).

O mapa da Figura 40 apresenta a distribuição das classes de risco à erosão, em relação à proteção do solo pela vegetação. Pode-se observar que as áreas da classe de risco Muito Alto devido a mais baixa proteção do solo pela vegetação, abrange uma área de 1.675,7 km² que corresponde a 29,5% da área total da bacia (Tabela 22). Área praticamente igual é ocupada também pela classe Alta de risco, que é de 1.683,2 km² perfazendo, ambas, o total de 59,1% da área total da bacia.

Tabela 22. Classes de vulnerabilidade devido ao grau de cobertura do solo pela vegetação e sua distribuição por área e percentagem de ocupação na bacia

Classes de Vulnerabilidade	IBVL* (%)	Área (km²)	Área (%)
Muito Baixa	> 80	1.045,2	18,4
Baixa	60 a 80	369,4	6,5
Média	40 a 60	666,6	11,7
Alta	20 a 40	1.683,2	29,6
Muito Alta	< 20	1.675,7	29,5
Corpos d'água	-	32,1	0,6
Nuvem	-	216,2	3,8
Total	-	5.686,4	100,00

(*) Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa.

É oportuno lembrar que com o estabelecimento dos limites de IBVL de 0 a 0,20 para a classe Muito Alta e de 0,20 a 0,40 para a classe Alta de vulnerabilidade a erosão, tais valores passaram a englobar uma faixa bem mais ampla da vegetação de Caatinga. As classes Subarbastiva muito rala até parte da vegetação da classe Arbustiva Subarbórea aberta. Com isto, e pelos confundimentos com os demais tipos de uso da terra, estas duas classes de risco de erosão (Figura 40), englobam as áreas de agricultura, campos abertos de pastagem e de algaroba de campo.

Observa-se (Figura 40) que as classes Alta e Muito Alta de risco de erosão ocupam, em grande parte, o terço médio e o inferior da bacia e acompanham a rede de drenagem; de alguma forma, essa distribuição da vegetação rala a aberta nas proximidades da drenagem, mostra a lógica da ocupação das terras pelo homem, a proximidade da água (Figura 41).

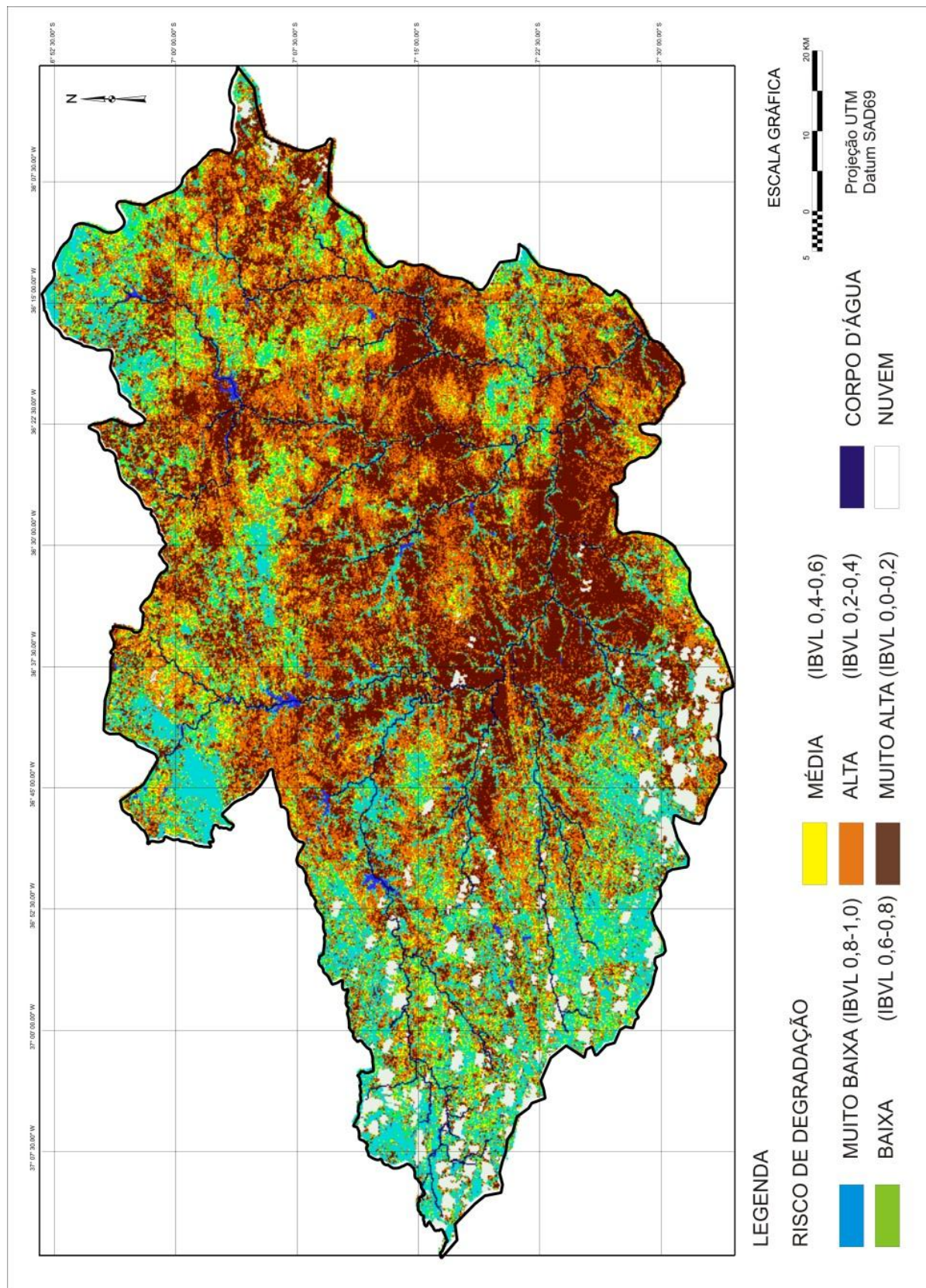


Figura 40. Mapa de classes de risco de degradação do solo em função da proteção da vegetação de Caatinga.



Figura 41. Açude de São João do Cariri e cidade à margem direita da drenagem.

Por outro lado, a classe Muito Baixa de risco de erosão, que engloba áreas mais vegetadas, com IBVL superior a 0,8, aparece com um percentual de 18,4% da área da bacia, que corresponde a uma área de 1.045,2 km² (Tabela 22). Esta classe, ao contrário das classes de maiores riscos, localiza-se, predominantemente, longe das drenagens, em áreas impróprias para uso agrícola, de solos mais rasos e pedregosos, distribuída sobre as linhas dos divisores da bacia e sub-bacias. Observações semelhantes na distribuição das áreas com vegetação mais preservadas foram feitas por Paes-Silva et al. (2003).

As demais classes, Média e Baixa de risco de erosão, devido à proteção da cobertura da vegetação, abrangem 666,6 km² (11,7%) e 369,4 km² (6,5%), respectivamente, da área da bacia e ocorrem de forma difusa, ocupando posições intermediárias entre as demais classes.

4.4.4. Mapeamento da degradação das terras

Como uma síntese da interação de cada um dos fatores determinantes do risco de erosão das terras, a Figura 42 representa a espacialização das classes de degradação das terras da bacia hidrográfica do rio Taperoá.

Embora se reconheçam as limitações relativas aos métodos e procedimentos da determinação e obtenção dos dados – a exemplo da baixa discriminação dos diferentes tipos de uso e cobertura vegetal, a representatividade das amostras e precisão das determinações da erodibilidade dos solos, e em menor grau, a precisão da determinação da declividade – admite-se, mesmo assim, que os resultados obtidos são satisfatórios.

Com base nos dados (Tabela 20), pode-se afirmar que 46,4 % das terras da bacia do Taperoá, uma área de 2.635,1 km², apresentam níveis médios de degradação. A classe Média de degradação (Figura 42), se encontra distribuída de forma difusa, por toda a área da bacia. Considerando as áreas das classes de cada um dos fatores de contribuição à degradação das terras, conclui-se que a erodibilidade do solo foi o fator que mais contribuiu na determinação da classe média de degradação.

A erodibilidade é também fator determinante para a classe de nível Alto de degradação uma vez que, isoladamente, apresenta uma área de 3.056,3 km² nesta classe de risco. Como já observado, os altos riscos à erosão estão relacionados à erodibilidade alta dos Luvisolos Crômicos e a algumas unidades de Neossolos Litólicos, que ocorrem na bacia; em seguida vêm as grandes extensões das classes de vegetação de porte subarbustivo e arbustivo, com densidade rala e muito rala, contribuindo para a classe Alta de degradação e também como principal fator contribuinte da classe Muito Alta de degradação; nos dois casos com áreas de ocorrência nas classes de 1.682,2 km² e 1.674,4 km², respectivamente.

Para as classes Muito Baixa e Baixa de degradação (Figura 42) o principal fator contribuinte foi a Muito Baixa e Baixa declividade das terras da bacia hidrográfica, como pode ser visto na Tabela 20, com 3.370,0 km² e 1.575,8 km² de área, respectivamente, nessas classes de risco de erosão. Por fim, a expressiva contribuição da cobertura da vegetação à classe de Muito Baixa de degradação, com área de 1.045,2 km², nesta classe de risco; ajudando também a amenizar as condições de riscos de erosão das áreas mais declivosas. Como observado, existe um grau maior de cobertura nas áreas mais declivosas e com solos mais rasos e pedregosos.

Tabela 23. Classes de vulnerabilidade e de degradação das terras e áreas de abrangências na bacia do rio de Taperoá

Classes	Erodibilidade (km ²)	Declividade (km ²)	Cobertura vegetal (km ²)	Degradação	
				(km ²)	(%)
Muito Baixa	0	3.370,0	1.045,2	538,8	9,5
Baixa	130,0	1.575,8	369,4	738,1	13,0
Média	2.173,7	501,8	666,6	2.635,1	46,4
Alta	3.056,3	153,5	1.682,2	851,4	15,0
Muito Alta	326,4	85,3	1.674,7	674,7	11,9
Corpo d'água	-	-	32,1	32,1	0,6
Nuvem	-	-	216,2	216,2	3,8
Total	5.686,4	5.686,4	5.686,4	5.686,4	100,0

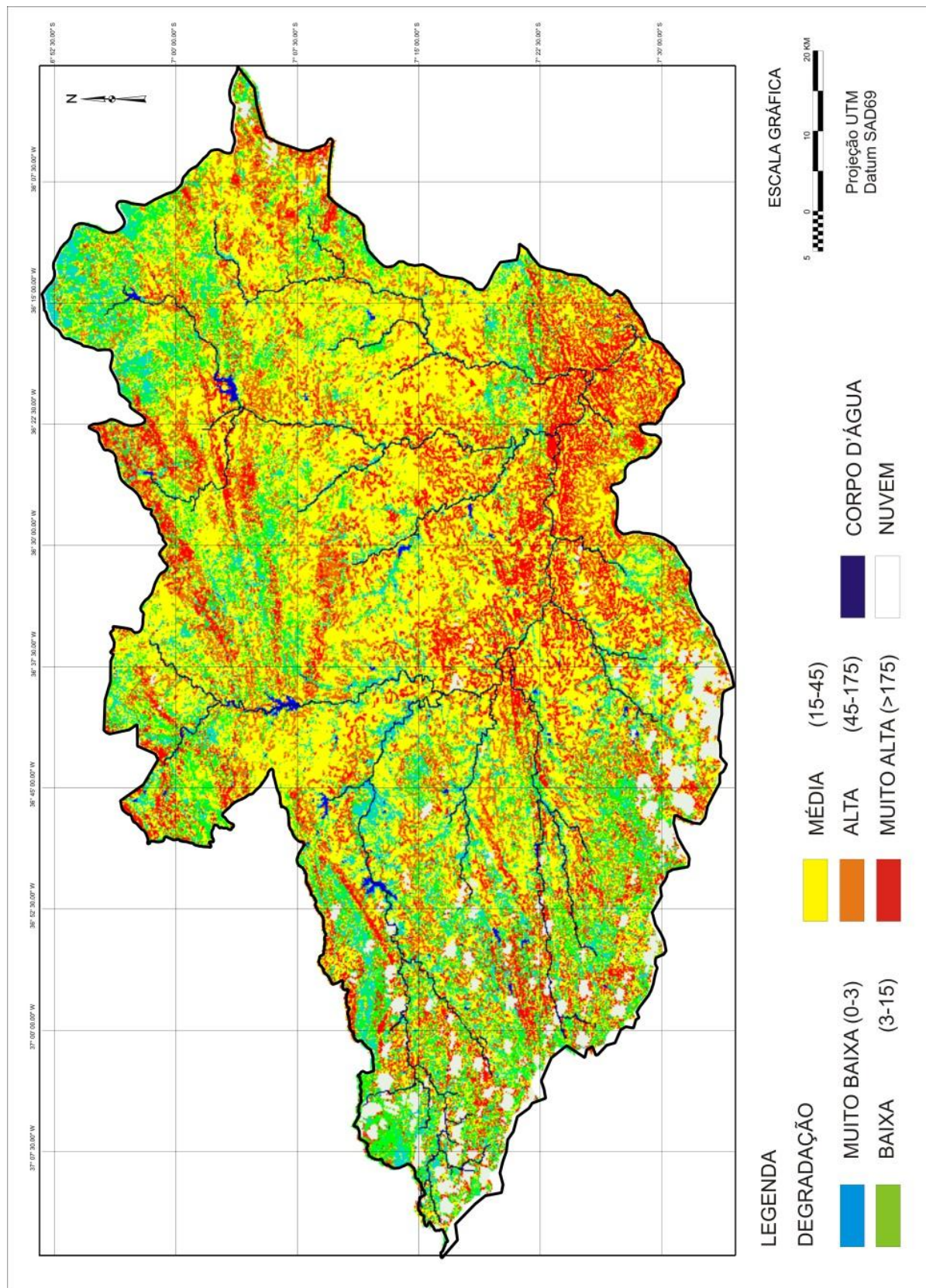


Figura 42. Mapa classes de degradação das terras da bacia do rio Taperoá.

Além da predominância da classe Média de degradação das terras (Tabela 23) as demais classes de degradação se distribuem em tamanho de área relativamente próximos; a classe Muito Alta de degradação (Figura 43), ocorre em grande extensão, no terço médio e inferior do rio Taperoá, associada em parte à alta erodibilidade dos Luvisolos Crômicos vérticos e ao baixo nível de proteção da vegetação arbustiva e subarbustiva, rala e muito rala da área; a classe de degradação Muito Baixa, por sua vez, ocorre nas áreas protegidas pela vegetação mais densa em grande parte das terras do terço oeste da bacia e na parte a nordeste, no município de Olivedos e circunvizinhanças.



Figura 43. Classe de terra com nível alto de degradação.

Como forma de se aferir o modelo, serão analisadas duas áreas de teste; uma relacionada à classe de degradação Muito Baixa e outra à classe de degradação Muito Alta. A classe de degradação Muito Baixa, de cor azul (Figura 42), ocorre quase sempre associada à classe Baixa, de cor verde, dificultando a individualização da análise. Como área teste da classe Muito Baixa de degradação será considerada a área de ocorrência do solo Cambissolo Eutrófico, bem individualizada (mapa de solos da Figura 6) e que abrange o município de Cacimbas e parte do município de Taperoá.

Como se pode observar na Figura 42, os limites da classe de degradação Muito Baixa variam de 0 a 9. Consultando os mapas temáticos de risco de erosão verifica-se que a erodibilidade do Cambissolo (Figura 38) é da classe Baixa, e portanto, índice (3); em

termos de declividade (Figura 35) ocorrem, na área, as classes Baixa (3) e Muito Baixa (1), ao sul do município de Cacimbas e em faixa contínua entre linha de classes mais declivosas, no município de Taperoá, a classe Muito Baixa (1); em termos de risco a erosão devido à Cobertura da terra (Figura 40), observa-se que a classe é Muito Baixa (1) que ocorre com predominância sobre a área do Cambissolo; sendo assim, pode-se confirmar que, pelas combinações possíveis, os produtos entre os índices das classes de riscos à erosão encontrados, confirmam-se a ocorrência de níveis baixos de degradação.

Como área teste para a análise da classe Muito Alta de degradação será tomada a área de ocorrência de uma unidade de solo Neossolo Regolítico, bem individualizada, localizada ao norte, na linha do divisor, observado no mapa de Erodibilidade dos solos (Figura 38), na cor marrom da classe Muito Alta, fator (9) de risco à erosão. Este valor de erodibilidade parece ser muito alto para esta classe de solo o que é fator de elevação do risco à erosão. Existem valores médios e até baixos para unidades de solos desta mesma classe na área de estudo. Quanto ao fator Declividade (Figura 35) ocorrem, associadas à unidade de mapeamento de solo, classes de declive Muito Baixo (1) a Baixo (3) risco de erosão. Para o fator Cobertura do solo ocorre uma miscelânea de classes predominando as classes de risco Alta (7) e Muito Alta (9). Esta é uma área de ocorrência de agricultura e pecuária, daí, os baixos valores de estimativa da biomassa. Combinando os valores dos índices ocorrentes, os produtos possíveis encontrados são superiores a 175 e, portanto, indicativos da ocorrência da classe Muito Alta de risco de degradação. Pelo que se conhece da área, esta é uma estimativa exagerada de degradação face às condições de relevo plano a suave ondulado.

5. CONCLUSÕES

1. Embora apresente limitações, a metodologia utilizada neste trabalho permite levantar informações importantes sobre o diagnóstico físico conservacionista de bacia hidrográfica, estimando dados quantitativos da degradação dos solos e da vegetação.
2. O NDVI, apesar de apresentar uma correlação um pouco mais baixa do que o EVI, foi o índice selecionado para a realização deste trabalho uma vez que apresenta maior amplitude dos valores das leituras, o que facilita a discriminação da estimativa da biomassa da vegetação além de que é o índice mais conhecido e utilizado nos estudos com vegetação.
3. As classes de vegetação Subarbustiva muito rala e rala, ocupam uma área de 1.620,4 km² (28,5%), as Arbustivas Subarbustivas e Subarbóreas abertas, 1.767,6 km² (31,3%), as Arbustiva, Subarbórea e Arbórea densa totalizam 1.994 km² (35%).
4. O volume da biomassa lenhosa da bacia é de 20.255.100 m³, deste total, a classe de vegetação Arbórea Subarbórea densa é responsável por 7.318.400 m³ (36,1%).
5. Em comparação com uma condição hipotética de máxima preservação, a biomassa de vegetação lenhosa da Caatinga apresenta nível de degradação de 65,5%.
6. Na bacia do Taperoá 59,3% das terras apresentam relevo plano (0 a 3%) e 27,7% relevo suave ondulado (3 a 6%), perfazendo o total de 87% da área; declividades superiores a 20% ocorrem em 58,3 km², 1,5% da área total.
7. Os solos apresentam erodibilidade alta (0,03 a 0,04 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹) em 53,8% da bacia (3.056,3 km²), representada pelo Luvissolo Crômico e Neossolos Litólicos; a classe muito alta (> 0,04 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹) ocorre em 326,4 km² (5,7%) associada aos Neossolo Regolítico e Luvissolo Crômico.
8. Pelo modelo proposto, 26,9% das terras da bacia de Taperoá apresentam níveis muito alto e alto de degradação, 46,4% níveis médio e apenas 22,5% níveis baixo e muito baixo.

6. RECOMENDAÇÕES

Visando ao aprimoramento deste tipo de trabalho, recomenda-se que se melhorem os seguintes procedimentos:

- Ao utilizar imagens de mesma resolução, procurar técnicas que possam discriminar melhor os diferentes tipos e cobertura da terra;
- Com a possibilidade de utilizar imagens de alta resolução, melhorar a discriminação da cobertura e o uso da terra;
- Auxiliado pelos dados de relevo das imagens SRTM, ampliar a base de dados de solos individualizando unidades de mapeamento em escala compatível com o mapa final da proposta de trabalho;
- Aprimorar a determinação da erodibilidade dos solos com apoio de determinações de campo e laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Sáber, A. N. O domínio morfoclimático semiárido das caatingas brasileiras. São Paulo: USP, 1974. 37p. (Série Geomorfologia, 43).
- Accioly, L. J. de O. Degradação do solo e desertificação no nordeste do Brasil. Boletim Informativo, SBCS, v.1, n.25, p.23-25, 2000.
- Accioly, L. J. O.; Pacheco, A.; Costa, T. C. C.; Lopes, O. F.; Oliveira, M. A. J. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, p.492-498, 2002.
- Accioly, L. J. de O.; Garçon, E. A. M.; Barros, M. R. O.; Botelho, F. Avaliação de alvos em áreas sob desertificação no semiárido paraibano com base nos sensores Hyperion e LANDSAT 7 ETM+. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. Anais...Goiânia: INPE, p.347-353, 2005.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br>. Acesso em 25 de março de 2011.
- Albuquerque, A.W.; Moura Filho, G.; Santos, J. R.; Costa, J. P. V.; Souza, J. L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.2, p.153-160, 2005.
- Allen, R.; Bastiaanssen, W.; Waters, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. Surface energy balance algorithms for land (SEBAL). Idaho implementation – Advanced Training and User's Manual, 97p. 2002.
- Allen, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.133, n.395, p.380-394, 2007.
- Alvarenga, B. S.; D'arco, E.; Adami, M.; Formaggio, A. R. O ensino de conceitos e práticas de espectroradiometria laboratorial: estudo de caso com solos do estado de São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 2003, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: INPE, p.739-747, 2003.
- Alves, J. J. A.; Araújo, M. A. de; Nascimento, S. S. do. Degradação da caatinga: uma investigação ecogeográfica. Revista Caatinga, v.22, n.3, p.126-135, 2009.
- Alves, J. J. A. Biogeografia. João Pessoa: Ed. Fotograf, 2008. 108p.
- Andrade-Lima, D. Vegetação. Atlas Nacional do Brasil, vol. II: 11. IBGE. Conselho Nacional de Geografia, Rio de Janeiro, 1966.
- Andrade-Lima, D. The caatinga dominium. Revista Brasileira de Botânica. v.4, p.149-153. 1981.
- Araújo, A.; Santos, M.; Meunier, I.; Rodal, M. Desertificação e Seca. Gráfica e Editora do Nordeste Ltda. Recife, 2002. 63p.

Araújo, W. T; Santos, R. L; Lage, C. S. A modelagem digital de elevação como instrumento de análise da ocupação do sítio urbano. Revista de Sistemas de Informação. n.1, 2008.

Araújo Filho, J. A. Manipulação da vegetação lenhosa da caatinga com fins pastoris. Simpósio sobre Caatinga e sua Exploração Racional, 1984. Feira de Santana. Brasília, EMBRAPA – DDT, p.327-343, 1986.

ASA BRASIL. Leonardo Boff. O Semiárido: o mais chuvoso do planeta. 2010. <http://www.asabrasil.org.br>. Acesso em 20/06/2012.

Banman, C. Remote sensing of vegetation and soil. 2001. Disponível em: <http://www.emporia.edu/earthsci/student/banman3/remoteip.htm>.

Barbosa, M. P. Princípios físicos de sensoriamento remoto. Programa de suporte técnico à gestão de recursos hídricos. ABEAS. Curso de Especialização em Sensoriamento Remoto e SIG. Módulo 2. Brasília, DF, 1996, 47p.

Barbosa, M. R. V.; Lima, I. B. de; Lima, J. R.; Cunha, J. P. da; Agra, M. de F.; Thomas, W. W. Vegetação e flora no Cariri paraibano. Oecol. Bras. v.11, n.3, p.313-322, 2007.

Bastiaanssen, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A Remote Sensing Approach Under Clear Skies in Mediterranean Climates, Tese, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 273. 1995.

Bezerra, N. F. Água e desenvolvimento sustentável no semiárido. FUNCEME. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, Série Debates n.24, 2002.

Boegh, E.; Soegaard, H.; Thomsen, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using LANDSAT TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. Remote Sensing of Environment, v.79, n.1, p.329-343, 2002.

Brandão, M. H. M.. Índice de degradação ambiental na bacia hidrográfica do Rio do Peixe-PB. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 13, 2009, Viçosa. A Geografia Física Aplicada e as dinâmicas de apropriação da natureza. Anais...Viçosa: Editora da UFV, 2009.

Brandelero, C. Espectrorradiometria do visível e infravermelho próximo em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. 82f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro. Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL, 1972 (Boletins DPFS-EPE-MA, 15 - Pedologia, 8).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN-Brasil. Brasília-DF, 2005, 213p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal - MMA. Desertificação. In: Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, 3, 1999, Brasília.

Bryan, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, v.32, p.385-415. 2000.

Calijuri, M. L.; Rohm, S. A. *Sistemas de informações geográficas*. Viçosa: Imprensa Universitária, 1993. 34p.

Câmara, G.; Souza R. C. M.; Freitas U. M.; Garrido, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers e Graphics*, v.20, n.3, p.395-403, 1996.

Campos, M. C. C.; Queiroz, S. B. Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório - Reconhecimento de solos do estado da Paraíba. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.6 n.1, p.45-50, 2006.

Candido, H. G. Barbosa, M. P.; Silva, M. J. Avaliação da degradação ambiental de parte do Seridó Paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.368-371, 2002.

Cáritas. O semiárido brasileiro. *Cadernos Cáritas*. 2002, 80p. Disponível em: <http://caritas.org.br/novo/wp-content/uploads/2011/03/caderno-3.pdf>. Acesso em 6 de setembro de 2012.

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

Chaves, I. B.; Freire, O.; Amorim Neto, M. S. Características da precipitação e risco de erosão na região tropical semiárida brasileira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.20, p.991-998, 1985.

Chaves, I. B.; Slack, D. C.; Guertin, D. P.; Lopes, V. L. Estimativa da erodibilidade e sua relação com outros atributos dos solos do Estado da Paraíba. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*, 15, 2004, Santa Maria. *Anais...Santa Maria*, 2004.

Chaves, I. de B.; Lopes, V. L.; Ffolliott, P. F.; Paes-Silva, A. P. Uma classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da caatinga. *Revista Caatinga*, v.21, n.2, p.204-213, 2008.

Chaves, I. de B.; Francisco, P. R. M.; Lima, E. R. V. de. Classificação das terras para mecanização agrícola e sua aplicação para o estado da Paraíba. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*, 18, 2010, Piauí. *Anais...Piauí: SBCS*, 2010. CD Rom.

Chaves, I. de B.; Guimarães, A. P.; Lima, E. R. V. de; Francisco, P. R. M. Índices espectrais e diagnóstico da degradação da caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, Paraíba-BR. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e Água*, 19, 2012, Lajes. *Anais... Lajes: SBCS*, 2012. CD Rom.

Conti, J. B. A questão climática do Nordeste Brasileiro e os processos de desertificação. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.1, n.1, p.7-14, 2005.

Coppin, P.; Jonckheere, I. ; Nackaerts, K.; Muys, B.; Lambin, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, v.25, n.9, p.1565-1596, 2004.

Costa, T. C. C.; Accioly, L. J. O.; Oliveira, M. A. J.; Burgos, N.; Silva, F. H. B. B. Phytomass mapping of the Seridó caatinga vegetation by the plant area and the normalized difference vegetation indices. *Scientia Agrícola*, v.59, n.4, p.707-715, 2002.

Costa Filho, J. F. da; Francisco, P. R. M.; Andrade, M. V. de; Silva L. da; Dantas, R. L. Estimativa do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) na microrregião de Sousa-PB utilizando imagens do CBERS-2. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 15, 2007, Aracaju. Anais.... Aracaju, 2007. CD Rom.

Crepani, E.; Medeiros J. S. de. Imagens CBERS + Imagens SRTM + Mosaicos GeoCover LANDSAT em ambiente SPRING e TerraView: Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento gratuitos aplicados ao desenvolvimento sustentável. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. Anais...Goiânia: INPE, p.2637-2644.

Denardin, J. E. Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo, 1990.

Desertwatch. DesertWatch Extention project. European Space Agency. Disponível em: <http://www.desertwatch.info/>. Acesso em 12/12/2012.

Di Pace, F. T.; Silva, B. B. da; Silva, V. de P. R. da; Silva, S. T. A. da. Mapeamento do saldo de radiação com imagens LANDSAT 5 e modelo de elevação digital. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.385-392, 2008.

Duque, G. Conviver com a seca: contribuição da Articulação do Semiárido/ASA para o desenvolvimento sustentável. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, n.17, p.133-140, 2008.

FAO/UNESCO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. World Soil Classification. Rome, Italy, 1974.

Feitosa, J. R. P.; Costa Filho, J. F. da; Silva, B. B. da. Avaliação de índices de vegetação em área irrigada do sub-médio São Francisco, Petrolina-PE, a partir de imagens do satélite LANDSAT 5-TM. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 18, 2004, Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2004.

Fernandes, A. G. Fitogeografia do Semiárido. In: Reunião Especial da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. In: Reunião/SBPC, 4, 1996, Feira de Santana. Anais...Feira de Santana, 1996. 215-219p.

Ferreira, M. E.; Ferreira, L. G.; Ferreira, N. C. Cobertura vegetal remanescente em Goiás: distribuição, viabilidade ecológica e monitoramento. In: Ferreira, L. G. (org.). Conservação da biodiversidade e uso sustentável em Goiás. Estratégias, prioridades e perspectivas. Goiânia: SEMARH/Agência Ambiental/Banco Mundial. Cap. 4, p.95-111, 2006.

Florenzano, T. G. Imagens de satélite para estudos ambientais. Oficina de Texto. São Paulo, 2002. 97p.

Francelino, M. R.; Fernandes Filho, E. I.; Resende, M.; Leite, H. G. Contribuição da Caatinga na sustentabilidade de projetos de assentamentos no Sertão Norte-Rio-Grandense. Revista Árvore, v.27, n.1, 2003. p.79-86.

Francisco, P. R. M.; Chaves, I. B.; Lima, E. R. V. Mapeamento das Terras para Mecanização Agrícola - Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Geografia Física, v.5, n.2, p.233-249, 2012.

Francisco, P. R. M. Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas. 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.

Francisco, P. R. M.; Chaves, I. B.; Lima, E. R. V.; Bandeira, M. M.; Silva, B. B. Mapeamento da caatinga com uso de geotecnologia e análise da umidade antecedente em bacia hidrográfica. Revista Brasileira de Geografia Física, v.5, n.3, 2012. p.676-693.

Golsmith, F. B.; Harrison, C. M.; Morton, A. J. Description and analysis of vegetation. In Methods in plant ecology (P. D. Moore and S. B. Chapman). Blackwell, London, p.437-524, 1986.

Guimarães, A. P. Dinâmica da resposta espectral da vegetação de caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2009.

Guimarães, R. V. Aplicação de geoprocessamento para o aumento da eficiência de percurso em operações agrícolas na cultura da cana-de-açúcar (*saccharum spp*). 98p. Dissertação (Mestrado). USP/ESALQ. Piracicaba, 2004.

Huete, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. International Agrophysics, v.4, n.4, p.367-376, 1988.

Huete, A. R.; Liu, H. Q.; Batchily, K.; van Leeuwen, W. A. Comparion of vegetation indices over global set of TM images for EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, v.59, p.440-451, 1997.

Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodríguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index. Remote Sensing of Environment, 83, p.195-213, 2002.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2009. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 12 março de 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 28 dezembro de 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Manuais Técnicos em Geociências número 1. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Sistema fitogeográfico, Inventário das formações florestais e campestres, Técnicas e manejo de coleções botânicas, Procedimentos para mapeamentos. 2012. Disponível em:

ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/manuais_tecnicos/manual_tecnico_. Acesso em 28 dezembro de 2012.

INSA. Sinopse do Censo Demográfico para o Semiárido Brasileiro. Medeiros, S. de S. et al. Campina Grande, 2012. 103p.

Iqbal, M. An introduction to solar radiation. Academic Press. Toronto, 1983.

Jacomine, P. K. T. Solos sob caatinga: características e uso agrícola. In: Alvarez, V. H.; Fontes, L. E. F.; Fontes, M. P. F. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, SBCS/UFV/DPS, 1996. p.95-133.

Jackson, R. D.; Huete, A. Interpreting vegetation indices. Preventive Veterinary Medicine, v.11, p.185-200, 1991.

Justice, C. O.; Vermote, E.; Townshend, J. R. G.; Defries, R.; Roy, D. P.; Hall, D. K.; Salomonson, V. V.; Privette, J. L.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, W.; Myneni, R. P.; Knyazikhin, Y.; Running, S. W.; Nemani, R. R.; Wan, Z.; Huete, A. R.; van Leeuwen, W.; Wolfe, R. E.; Giglio, L.; Muller, J.; Lewis, P.; Barnsley, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. NASA Publications. Paper 28, 1998.

Kaufman, Y. J.; Tanré, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE. Transactions on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings, v.30, p.261-270, 1992.

Kazmierczak, M. L. Índice de vegetação derivado do NOAA/AVHRR: análise da sazonalidade da cobertura vegetal em região de clima semiárido (caatinga). Fortaleza: FUNCEME, 1993. 106p.

Kazmierczak, M. L.; Seabra, F. B. Índice de susceptibilidade de degradação ambiental ISDA em áreas do cerrado paulista. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18, 2007, Florianópolis. Anais... Florianópolis: INPE. 2007. p.2745-2752.

Leblon, B. Soil and vegetation optical properties. Applications in remoting sensing, vol. 4, 2011. Disponível em <http://rscc.umn.edu/rscc/Volume4/Leblon/leblon>.

Leite, F. R. B.; Soares, A. M. L.; Martins, M. L. R. Áreas degradadas susceptíveis aos processos de desertificação no Estado do Ceará. Anais da Conferência Nacional da Desertificação, Fortaleza, 1994. Brasília, Fundação Esquel Brasil. p.73-78, 1994.

Leite, F. R. B.; Oliveira, S. B. P.; Barreto, M. M. S.; Carvalho, G. M. B. S.; Freitas Filho, M. R. Degradação ambiental e susceptibilidade aos processos de desertificação na região do Médio Jaguaribe – CE. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, Belo Horizonte, 2003. Anais...INPE, p.1315-1322. 2003.

Lemos, J. J. S. Desertification of drylands in Northeast of Brazil. Riverside, Califórnia. Economic Department da University of California, 1995.

Lemos, J. J. S. Níveis de degradação no nordeste brasileiro. Revista Econômica do Nordeste. Fortaleza, v.32, n.3, p.406-429, 2001.

Lopes, E. S. S. Tutorial 10 aulas SPRING 3.6. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.

Lopes, H. L.; Accioly, L. J. O; Candeias, A. L. B.; Sobral, M. C. Análise de índices de vegetação na bacia do rio Brígida, sertão do estado de Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 3, 2010, Recife. Anais... Recife, 2010. p.01-08.

Madeira Netto, J. S. Comportamento espectral dos solos. In: Meneses, J. R.; Madeira Netto, J. S., org. Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília, DF. UnB/Planaltina: Embrapa Cerrados, p.127-154, 2001. 262p.

Maldonado, F. D. Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semiárido. 311p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). São José dos Campos: INPE, 2005.

Maldonado, F. D. Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semiárido brasileiro: Quixaba – PE, Brasil. (INPE-7180-TD/680). 116p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: INPE, 1999.

Mantovani, W. Conceituação e fatores condicionantes. Simpósio sobre Mata Ciliar. Campinas: Fundação Cargill, 1989. p.11-19.

Manzatto, H. R. H; Cunha, T. J. F; Silva, C. A; Matos, J. A. de; Ramos, D. P. Diagnóstico ambiental como subsídio ao desenvolvimento sustentável para produção rural em comunidades das microbacias hidrográficas no estado do Rio de Janeiro. Embrapa Solos - CNPS, n.8, 1998, 4p.

Marengo, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. Revista Parcerias Estratégicas, Secretaria de Assuntos Estratégicos (Brasil), Brasília-DF, n.27, 149-176p. 2008.

Martins, R. A.; Santos, E. V. dos; Ferreira, I. M. Atualização do mapa de remanescente florestal do município de Morrinhos–GO: utilizando imagem LANDSAT-TM. In: Simpósio Regional de Geografia Local, 11, Anais...UFG, Jataí, 2009.

Markham, B. L.; Barker, J. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. Int. Journal of Remote Sensing, v.8, n.3, p.517-523, 1987.

Meneses, P. R. Origens das feições espectrais. In: Meneses, J. R.; Madeira Netto, J. S. (org.). Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília, DF. UnB/Planaltina: Embrapa Cerrados, p.43-123, 2001. 262p.

Meneses, P. R.; Netto, J. S. M. Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília. UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MMA-BRASIL. Monitoramento dos Biomas Brasileiros – Bioma Caatinga. Portalbio, 2010.

Molion, L. C. B.; Bernardo, S. de O. Dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11, 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2000. p.1334-1342.

Moreira, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação. 2. ed. São José dos Campos, Viçosa: UFV, 2004. 307p.

Moreira, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 3. ed. Viçosa: UFV, 2005. 320p.

Moreira, M. A.; Assunção, G. V. Princípios básicos, metodologias e aplicações de sensoriamento remoto na agricultura. INPE, São José dos Campos, 1997. 138p.

Novo, E. M. L. de M. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2008. 308p.

NASA. USGS. SRTM - Shuttle Radar Topography Mission Home page. 2002.

Nascimento, S. S.; Alves, J. J. A. Ecoclimatologia do Cariri paraibano. Revista Geográfica Acadêmica, n.3, v.2, p.28-41, 2008.

Nimer, E. Pluviometria e recursos hídricos de Pernambuco e Paraíba. Rio de Janeiro, IBGE/SUPREN, 1979.

Noy-meir, I. Desert ecosystems: environment and producers. Annual Reviews Ecology, 1973.

Oliveira, W. M. de; Chaves, I. de B.; Lima, E. R. V. de. Índices espectrais de vegetação de caatinga em um neossolo litólico do semiárido paraibano. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal. Anais... Natal: INPE, 2009. p.2103-2110.

Oliveira, L. B.; Ribeiro, M. R.; Ferraz, F. B.; Jacomine, P. K. T. Classificação de solos Planossólicos do sertão do Araripe. Revista Brasileira de Ciência do Solo, n.4, v.27, p.685-693, 2003.

Oliveira-Galvão, A. L. C. de; Saito, H. C. A modelagem de dados temáticos geoespacializados na identificação dos diferentes níveis de susceptibilidade à desertificação da região semiárida do nordeste brasileiro. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 2003, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: INPE, 2003. p.1399-1406.

Paes-Silva, A. P.; Chaves, I. B.; Sampaio, E. V. S. B. Cobertura vegetal da bacia hidrográfica do Açude Namorado no cariri oriental paraibano. Agropecuária Técnica. v. 24, n.1, p.47-59, 2003.

Paixão, F. E.; Vale, R. de M. C. do; Lobão, J. S. B. Mapeamento de áreas susceptíveis à desertificação no nordeste da Bahia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2009, Natal. Anais... Natal: INPE, 2009. p.4195-4200.

PARAÍBA. Secretaria de Educação, Universidade Federal da Paraíba. Atlas Geográfico do Estado da Paraíba. João Pessoa, Grafset, 1985.

PARAÍBA. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA. PERH-PB: Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo e Atlas. Brasília, 2006. 112p.

PARAÍBA. Governo do Estado - Secretaria de Agricultura e Abastecimento – CEPA – PB. Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba. Relatório ZAP-B-D-2146/1. UFPB-EletoConsult Ltda. Dez, 1978. 448p.

Pontes, M. A. G. GIS e geoprocessamento. Apostila de Topografia. FACENS Sorocaba, 2002.

Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação. 1. ed. São José dos Campos: Ed. Parêntese. v.1, 2007. 135p.

Prado, D. E. As caatingas da América do Sul. In: Leal, I. R.; Tabarelli, M.; Silva, J. M. C. (eds.). Ecologia e conservação da caatinga. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003. p. 3-73.

Pruski, F. F. Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2ª.ed. atual e ampl. – Viçosa: Ed. UFV, 2009. 279p.

Renard, K. G.; Foster, G. R.; Weesies, G. A.; McCool, D. K.; Yoder, D. C. (coordinators). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agr. Handb. n.703, 1997.

Resende, M.; Curi, N.; Rezende, S. B.; Corrêa, G. F. Pedologia: base para distinção de ambientes. 2ª.ed. Viçosa: NEPUT, 1997. 367p.

Ribeiro, C. A. A. S.; Varella, C. A. A.; Sena Jr., D. G.; Soares, V. P. Sistemas de Informações Geográficas. Agricultura de precisão. Editado por Aluizio Borém et al. Viçosa, 2000. 467p.

Ribeiro, M. R.; Sampaio, E. V. S. B.; Galindo, I. C. L. Os solos e o processo de desertificação no semiárido brasileiro. In: Tópicos em ciência do solo, v.6, 497p. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, 2009, 413-449p.

Rodal, M. J. N. Fitossociologia da vegetação arbustiva-arbórea em quatro áreas de caatinga em Pernambuco. Tese (Doutorado). Universidade de Campinas, 1992.

Rosendo, J. S. Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na bacia do rio Araguari – MG utilizando dados do sensor MODIS. 152p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território). Universidade de Uberlândia, MG, Uberlândia, 2005.

Rebouças, A. Potencialidade de água subterrânea no semiárido brasileiro. In: Conferência Internacional de Captação de Água de Chuva, 9, 1999, Petrolina. Anais...Petrolina, 1999.

Sá, I. I. S.; Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B. de; Sá, I. B. Uso do índice de vegetação da diferença normalizada (IVDN) para caracterização da cobertura vegetal da Região do Araripe Pernambucano. Revista Brasileira de Geografia Física, v.1, n.1, p.28-38, 2008.

Sá, I. B. Monitoramento ambiental: a degradação ambiental no Trópico Semiárido do Nordeste Brasileiro. In: Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 1, 2002, Aracaju. Anais...Aracaju, 2002.

Sampaio, E. V. S. B.; Sampaio, Y. S. B. Desertificação: conceitos, causas, consequências e mensuração. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2002. 85p.

Sampaio, E. V. S. B.; Sampaio, Y. S. B.; Araújo, S. B.; Sampaio, G. R. Desertificação no Brasil: conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência. Recife: Ed. Universitária, 2003. 202p.

Sampaio, E. V. S. B.; Rodal, M. J. N. Fitofisionomias da Caatinga. In: J. M. C. Silva & M. Tabarelli (coord.). Workshop Avaliação e identificação de ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade do bioma Caatinga. Petrolina, Pernambuco. 2000. Disponível em www.biodiversitas.org.br/caatinga.

Sandi, R. D.; Heringer, L. P. A previdência social nos municípios do semiárido brasileiro. Informe da Previdência Social. v.13, n.8, 2001. 16p.

Santos, L.; Silva, E. A. Carta de trafegabilidade do terreno usando sig e imagem de alta resolução. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. UFSC-Florianópolis, 2004.

Sarmiento, E. C.; Weber, E.; Hasenack, H. Avaliação da situação da cobertura florestal na Bacia do Rio Cadeia/Feitoria e identificação de áreas críticas usando técnicas de geoprocessamento. UFRGS. Centro de Ecologia, 2001. Disponível em <<http://www.ufrgs.br>>. Acesso em 12 de março de 2012.

Silva, B. B.; Lopes, G. M.; Azevedo, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens LANDSAT 5-TM. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.13, n.2, p.11-21, 2005.

Silva, B. B. da; Mendonça, R. R. de O.; Silva, S. T. A. da; Ferreira, R. da C. Mapeamento do albedo de áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM - LANDSAT 5. Revista de Geografia, v.25, n.2, p.24-41, 2008.

Silva, B. B.; Mendonça, R. R. O.; Araújo, S. T.; Bezerra, B. G. Obtenção do albedo e IVDN em áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM - Landsat 5 e algoritmo SEBAL/METRIC. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal, Anais...Natal, INPE, p.475-482. 2009.

Silva, S. S. R. da; Chaves, I. de B.; Alves, J. J. A. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ambiental; bacia hidrográfica do açude Camará-PB. Mercator, v.9, n.20, p.239-252, 2010.

Slater, P. N. Remote sensing: optics and optical systems. Reading, MA, Addison-Wesley, 1980. 575p.

Souza Filho, F. de A. de. A política nacional de recursos hídricos: Desafios para sua implantação no semiárido brasileiro. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. 440p.

Sousa, R. F. de; Barbosa, M. P; Sousa Júnior, S. P. de. Terceiro Neto, C. P. C.; Moraes Neto, J. M. Estudo da degradação de terras do município de Boa Vista - Paraíba. Revista Engenharia Ambiental, v.4, n.2, p.5-13, 2007.

Souza, B. I. de; Suertegaray, D. M. A.; Lima, E. R. V. de. Desertificação e seus efeitos na vegetação e solos do Cariri Paraibano. Mercator, v.8, n.16, p.217-232, 2009.

UNITED NATIONS. Text of the United Nations Convention to Combat Desertification. 2001. Disponível em <www.unccd.int/convention/text/convention.php>. Acesso em 12 março de 2012.

Varejão-Silva M. A.; Braga, C. C.; Aguiar M. J. N.; Nietzsche M. H.; Silva, B. B. Atlas Climatológico do Estado da Paraíba. UFPB, Campina Grande, 1984.

Wiegand, C. L., Richardson, A. J.; Escobar, D. E. Vegetation indices in crop assessment. Remote sensing of environment, v.35, p.105-119. 1991.

Viganó, H. A.; Borges, E. F.; Franca-Rocha, W. J S. Análise do desempenho dos índices de vegetação NDVI e SAVI a partir de imagem Aster. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. Anais...Curitiba, INPE, p.1828-1834, 2011.

Wischmeier, W. H.; Johnson, C. B.; Cross, B. W. A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, v.26, n.5, p.189-193, 1971.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. USDA, Washington. 58p. 1978. (Agriculture Handbook 537).

ANEXOS

Anexo 1. Pontos de observação, classificação e estimativa do índice de biomassa da vegetação de caatinga

Ponto	Coordenadas		Classe			Subclasse	IBVL
11	-7.033.115	-36.692.572	Subarbórea	Arbórea		Muito densa	0,85
GPS21	-7.346.248	-36.469.988	Arbórea			Densa	0,80
18d	-7.032.779	-36.684.936	Subarbórea	Arbórea		Densa	0,68
15a	-7.033.394	-36.680.684	Subarbórea			Densa	0,60
3a	-7.011.279	-36.694.527	Subarbórea			Densa	0,60
16	-7.022.667	-36.678.211	Subarbórea			Densa	0,60
GPS19-20	-7.350.642	-36.653.804	Arbustiva	Subarbórea		Densa	0,47
3	-6.912.403	-36.196.451	Arbustiva	Subarbórea		Aberta	0,36
6	-6.927.674	-36.268.380	Subarbórea	Arbustiva		Densa	0,52
12	-7.026.058	-36.669.249	Arbustiva	Subarbórea		Densa	0,48
111	-7.344.514	-36.499.830	Arbustiva	Arbórea		Densa	0,53
5	-7.015.545	-36.711.788	Arbórea	Subarbórea		Densa	0,72
4	-6.891.743	-36.195.572	Subarbustiva	Arbustiva		Aberta	0,21
GPS4	-7.016.037	-36.708.528	Subarbórea	Arbustiva		Densa	0,52
4	-7.118.964	-36.640.785	Arbórea			Densa	0,80
1	-7.010.632	-36.662.633	Subarbórea			Densa	0,60
5a	-6.986.740	-36.532.701	Arbustiva	Subarbustiva		Aberta	0,24
10	-6.995.793	-36.439.992	Subarbórea	Arbustiva	Arbórea	Densa	0,57
2	-7.020.615	-36.661.057	Arbustiva	Subarbustiva	Subarbórea	Densa	0,37
20 GPS 32	-7.318.171	-36.548.503	Subarbórea			Densa	0,60
7	-6.983.832	-36.453.989	Subarbórea	Arbustiva		Aberta	0,39
3b	-6.925.397	-36.181.379	Arbustiva	Subarbórea		Aberta	0,36
12	-7.328.410	-36.502.351	Arbustiva	Subarbórea		Aberta	0,36
6	-7.022.385	-36.707.876	Arbustiva	Subarbustiva		Aberta	0,24
9	-7.104.343	-36.646.747	Subarbórea	Arbustiva		Densa	0,52
GPS 27	-7.344.051	-36.531.233	Arbustiva	Subarbórea	Subarbustiva	Aberta	0,33
2	-7.001.307	-36.435.666	Arbustiva			Aberta	0,30
GPS12	-7.322.527	-36.418.844	Arbustiva			Densa	0,40
2 fech	-7.090.650	-36.626.118	Subarbustiva	Arbustiva		Aberta	0,21
6b	-7.021.119	-36.708.517	Subarbustiva	Arbustiva		Aberta	0,21
17	-7.030.122	-36.679.370	Subarbórea	Subarbustiva	Arbustiva	Rala	0,22
2-GPS13	-7.323.042	-36.427.113	Arbustiva	Subarbustiva	Subarbórea	Aberta	0,28
6 GPS04	-7.440.166	-36.466.092	Subarbórea	Arbustiva		Densa	0,52
GPS 28	-7.351.735	-36.531.850	Arbustiva	Subarbórea		Densa	0,47
7 GPS14	-7.457.817	-36.591.079	Arbustiva	Subarbórea		Aberta	0,36
5b	-6.989.010	-36.532.495	Arbustiva	Subarbustiva		Densa	0,32
19 p4 GPS 29	-7.338.134	-36.545.656	Arbustiva	Subarbórea		Aberta	0,36
7	-7.446.157	-36.451.621	Arbustiva	Subarbórea		Aberta	0,36
17	-7.379.755	-36.546.583	Arbustiva	Subarbustiva		Aberta	0,35
21 GPS 33	-7.302.530	-36.614.258	Subarbórea	Arbustiva		Rala	0,27
GPS18	-7.344.514	-36.480.622	Arbustiva	Subarbustiva		Aberta	0,24
3 GPS16	-7.308.130	-36.428.724	Arbustiva			Aberta	0,30
1	-7.088.907	-36.632.325	Arbustiva			Rala	0,20
GPS03	-7.420.118	-36.504.298	Subarbustiva	Arbustiva		Aberta	0,21
GPS22	-7.334.396	-36.460.419	Subarbustiva	Arbustiva		Muito rala	0,06
GPS14	-7.321.601	-36.428.622	Subarbustiva	Arbustiva		Rala	0,18
14-4x	-7.384.200	-36.485.973	Arbustiva			Aberta	0,30
3 GPS 15	-7.312.495	-36.427.439	Arbustiva	Subarbustiva	Subarbórea	Aberta	0,28
GPS16	-7.304.494	-36.428.888	Subarbustiva	Arbustiva		Rala	0,18
GPS16 verm	-7.306.072	-36.426.178	Subarbustiva	Arbustiva		Muito rala	0,06
GPS17	-7.514.042	-36.658.642	Subarbustiva	Arbustiva		Rala	0,18
17	-7.377.826	-36.545.877	Arbustiva	Subarbustiva		Muito rala	0,08