



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS**

**AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE DEGRADAÇÃO DAS TERRAS (DESERTIFICAÇÃO)
NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA**

TELMA LUCIA BEZERRA ALVES

**Campina Grande-PB
Fevereiro/2016**

TELMA LUCIA BEZERRA ALVES

**AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE DEGRADAÇÃO DAS TERRAS (DESERTIFICAÇÃO)
NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Recursos Naturais.

Área de Concentração: Sociedade e Recursos Naturais.

Linha de Pesquisa: Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo

**Campina Grande - PB
Fevereiro/2016**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- A474a Alves, Telma Lucia Bezerra.
Avaliação do nível de degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba / Telma Lucia Bezerra Alves. – Campina Grande, 2016.
151 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
"Orientação: Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo".
Referências.
1. Desertificação. 2. Índice de Vegetação. 3. Albedo. 4. Índice de Aridez. 5. Precipitação Pluvial. I. Azevedo, Pedro Vieira de. II. Título.

CDU 504.123(043)

TELMA LUCIA BEZERRA ALVES

**AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE DEGRADAÇÃO DAS TERRAS (DESERTIFICAÇÃO) NO
ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA**

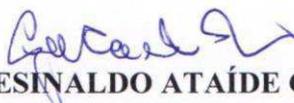
APROVADA COM DISTINÇÃO EM: 25/02/2016

BANCA EXAMINADORA



Dr. PEDRO VIEIRA DE AZAVEDO

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



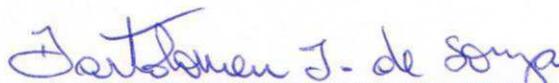
Dr. GESINALDO ATAÍDE CÂNDIDO

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Dr. BARTOLOMEU ISRAEL DE SOUZA

Universidade Federal da Paraíba – UFPB



Dra. JOSICLEDA DOMICIANO GALVÊNCIO

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

O Senhor é o meu pastor, nada me faltará.
Deitar-me faz em verdes pastos, guia-me mansamente a águas tranquilas.
Refrigera a minha alma; guia-me pelas veredas da justiça, por amor do seu nome.
Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte, não temeria mal algum, porque tu estás
comigo; a tua vara e o teu cajado me consolam.
Preparas uma mesa perante a mim na presença dos meus inimigos, unges a minha cabeça com
óleo, o meu cálice transborda.
Certamente que a bondade e a misericórdia divina me seguirão todos os dias da minha vida; e
habitarei na casa do Senhor por longos dias.
(Salmo, 23)

DEDICATÓRIA

A Deus,
fonte de sabedoria e inspiração.

Aos meus pais,
Maria Lucia Alves Bezerra e João Nazário Bezerra, fonte de amor e paz.

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha eterna gratidão, por ter guiado os meus passos para concluir esse trabalho, pela sustentação nos momentos em que eu mais precisei e pelos amigos que colocou em meu caminho ao longo dessa trajetória.

Aos meus pais, Maria Lucia Alves Bezerra e João Nazário Bezerra, pela vida, pelo incentivo, pelos ensinamentos, pelo amor, carinho e compreensão. É por vocês que estou alcançando essa conquista em minha vida.

Ao irmão, Tomaz Arquino Alves Bezerra, que sempre esteve presente em minha vida, compartilhando momentos alegres e tristes, exemplo de humildade e generosidade.

Ao meu amor, André Aires Farias, por ter dividido todas as angústias e felicidades desse percurso acadêmico, sempre me aconselhando, me ouvindo e me apoiando. Obrigada pela compreensão.

Aos familiares, tias, primos e cunhadas que sempre me estimularam a continuar estudando e trilhando os caminhos do conhecimento, em especial a Conceição, Josiana, Joselia e Joana pelo carinho e apoio de sempre!

Ao professor, orientador e amigo, Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo (UACA/UFCG) pela dedicação, incentivo, ensinamentos e, principalmente, por acreditar no meu trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos financeiros concedidos durante o curso.

Aos professores, Dr. Carlos Antonio Costa Santos, Dr. Gesinaldo Ataíde Cândido, Dr. Hermes Alves de Almeida, Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio, Dr. Bartolomeu Israel de Souza, Dr. Marx Prestes Barbosa, Dr. Francisco de Assis Salviano Sousa, Dr. Sérgio Murilo Santos de Araújo e Dr. José Bueno Conti pelas valiosas sugestões na elaboração desse trabalho. A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais (PPGRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, nas pessoas do coordenador, Prof. Dr. Carlos Antonio, e da secretária, Cleide Santos, pelo apoio e amizade.

Aos amigos, Madson Tavares, Renata Barbosa, Amanda Neves, Erickson Melo, Suellen Silva, Argemiro Lucena, Edicarlos Pereira, Jullianna Vitória, Socorro Cordão, Laíse do Nascimento, Railson Messias e Mônica Macêdo pelo incentivo e apoio. Em especial a minha amiga Francineide Amorim Costa Santos, pessoa amável e muito determinada, que me auxiliou em algumas etapas metodológicas.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a elaboração deste trabalho... **Muito obrigada!!**

Alves, T. L. B. **Avaliação do nível de degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba**. Campina Grande, 2016. 143 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

RESUMO

A desertificação é um problema ambiental que atinge várias regiões no mundo, sendo definida como a degradação das terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas resultante de vários fatores, incluindo variações climáticas e atividades humanas. O objetivo desse estudo foi avaliar o nível de degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, através da dinâmica temporal e espacial de aspectos climáticos, biofísicos e socioeconômicos. O alto curso da bacia hidrográfica engloba total ou parcialmente, a área de 18 municípios, distribuídos entre as microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental do estado da Paraíba. Foram utilizados dados climáticos do período de 1950 a 2013 para as variáveis: precipitação pluvial e índice de aridez (I_a), dados de sensores orbitais - Moderate Resolution Imaging Spectro radiometer (MODIS), período de 2000 a 2013, visando à obtenção do albedo da superfície e do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e dados censitários (demográficos e agropecuários) para quantificação do índice socioeconômico e do nível de degradação na região. O teste de Mann-Kendall (MK) foi utilizado para identificação da tendência temporal das variáveis, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, o método de Sen para quantificação da tendência e a krigagem para análise da dinâmica espacial das variáveis. Os principais resultados evidenciam que há uma tendência crescente da precipitação pluvial e decréscimo da aridez no alto curso da bacia como um todo, durante o período estudado. Pode-se inferir que estas condições não contribuem para desencadear o processo de degradação das terras (desertificação), sugerindo que as causas desse problema ambiental não são climáticas. A precipitação média anual aumenta na direção nordeste-noroeste da bacia, com mínimo (320 mm) em Cabaceiras e máximo (680 mm) nas localidades de Ouro Velho e Prata; o albedo da superfície e o índice de vegetação têm seus valores influenciados pela sazonalidade climática da região. A precipitação pluvial é o elemento que condiciona o aumento do índice de vegetação e diminuição do albedo da superfície, considerando-se que estas duas variáveis têm comportamento inverso. A região central do alto curso da bacia hidrográfica (municípios de Congo, Camalaú e Caraúbas) apresentou baixo índice de vegetação e elevado albedo da superfície, caracterizando possivelmente um processo de degradação das terras. Ao longo do período analisado (2000-2013), estas variáveis apresentaram tendência decrescente, mas não significativa, evidenciando um aumento pouco significativo da degradação das terras. Em relação ao índice socioeconômico geral de cada município – I_{se_m} observa-se que sete apresentaram “Moderada” degradação, dez “Baixa” degradação e apenas o município de Boqueirão apresentou situação de “Acentuada” degradação das terras. Os valores médios do I_{se_m} por município revelam que está havendo degradação das terras em todo o alto curso da bacia, porém em níveis Moderados e Baixos, sendo a região noroeste a área com maior pressão antrópica. Há uma tendência de aumento do índice socioeconômico - I_{se_b} no alto curso da bacia hidrográfica com valor médio que indica uma situação de degradação “Moderada” das terras. Esse aumento é resultante do crescimento econômico, de programas sociais implantados e das melhorias nas condições de vida da população ao longo dos anos.

Palavras-chave: índice de vegetação, albedo, índice de aridez e precipitação pluvial.

Alves, T. L. B. **Avaliação do nível de degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.** Campina Grande, 2016. 143 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

ABSTRACT

Desertification is an environmental problem that affects several regions in the world, defined as the land degradation of arid, semi-arid and sub-humid areas resulting from various factors, including climatic variations and human activities. The aim of this study was to evaluate the level of land degradation (desertification) in the upper course of the watershed of Paraíba River, through the temporal and spatial dynamics of climatic, biophysical and socio-economic aspects. The upper reaches of the watershed encompasses all or part of the area of 18 municipalities, distributed among the micro-regions of Western and Eastern Cariri state of Paraíba. Period of climatic data were used in 1950 the 2013 for the variables: rainfall and aridity index (Ia), orbital data from sensors - MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro radiometer), from 2000 to 2013, to obtain the surface albedo and Vegetation Index adjusted to the ground (SAVI) and census data (population and agricultural) to quantify the socio-economic index and the level of degradation in the region. The Mann-Kendall test (MK) was used to identify the time trend variable, the level of significance of $\alpha = 0.05$, the Sen method to quantify the trend and Kriging for analyzing spatial dynamics of the variables. The main results show that there is an increasing trend of rainfall and decrease dryness on the upper course of the watershed as a whole, during the period studied. You can infer that these conditions do not contribute to trigger land degradation process (desertification), suggesting that the causes of this environmental problem is not climate. The average annual precipitation increases in the north-northwest direction of the watershed, with minimum (320 mm) in Cabaceiras and maximum (680 mm) in Ouro Velho and Prata localities; the surface albedo and vegetation index have their values influenced by the seasonality of the region. Rainfall is the element that determines the increase in vegetation index and decrease in surface albedo, considering that these two variables have opposite behavior. The central region of the upper course of the watershed (municipalities of Congo, Camalaú and Caraúbas) showed a low rate of vegetation and high albedo surface, possibly featuring a land degradation process. Throughout the period analyzed (2000-2013), these variables showed a downward trend, but not significant, showing a slight increase of land degradation. Regarding the general socioeconomic index of each municipality – Ise_m it is observed that seven had "moderate" degradation ten "Low" degradation and only the municipality of Boqueirão presented situation of "Severe" land degradation. The municipality by Ise_m average values reveal what's going on land degradation across the upper course of the watershed, but in Moderate and Low levels, and northwest region of the area with increased human pressure. There is a tendency to increase the socioeconomic index - Ise_b in the upper course of the watershed with an average value indicating the degradation of situation "moderate" land. This increase is the result of economic growth, implemented social programs and improvements in the living conditions of the population over the years.

Keywords: vegetation index, albedo, aridity index and rainfall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Áreas susceptíveis a desertificação na região semiárida brasileira.	35
Figura 2.2: Delimitação da região semiárida e do bioma Caatinga no contexto do Nordeste brasileiro.	41
Figura 2.3: Curvas de reflectância espectral típicas para vegetação, solo e água.	49
Figura 2.4: Cartas temáticas do relevo do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. A) Hipsometria; B) Declividade.	56
Figura 2.5: Espacialização dos solos no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	59
Figura 2.6: Uso e cobertura do solo no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	61
Figura 2.7: Esquema representativo do ambiente semiárido brasileiro.	63
Figura 3.1: Localização do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba e a delimitação dos 18 municípios, Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil.	65
Figura 3.2: Organograma com descrição da metodologia de análise.	67
Figura 4.1: Distribuição espacial dos valores médios da precipitação pluvial (A), do índice de aridez (B), período (1950 a 2013), do índice de vegetação ajustado ao solo – IVAS para os meses de agosto (C) e do albedo da superfície (D), período (2000 a 2013), no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	85
Figura 4.2: Distribuição temporal dos valores médios da precipitação pluvial (A), período de 1950 a 2013, do índice de vegetação ajustado ao solo – IVAS (B) e do albedo da superfície (C), período de 2000 a 2013 para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	87
Figura 4.3: Precipitação pluvial média do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período 2000-2013.	88
Figura 4.4: Média mensal da precipitação pluvial e sua relação com o índice de vegetação ajustado ao solo - IVAS (A) e albedo da superfície (B) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	88
Figura 4.5: Comportamento mensal do índice de vegetação ajustado ao solo - IVAS em comparação ao albedo da superfície para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	89
Figura 4.6: Curvas dos valores mínimos, médios, máximos e do CV do índice de vegetação ajustado ao solo – IVAS (A) e do albedo da superfície (B) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período 2000-2013.	90
Figura 4.7: Comportamento do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e do albedo da superfície em relação à precipitação pluvial (representada em barras) para os municípios de Congo (A e B) e São Sebastião do Umbuzeiro (C e D).	91
Figura 4.8: Correlação entre o índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e a precipitação pluvial média (A) e com a temperatura média do ar (B) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	93
Figura 4.9: Análise temporal da precipitação pluvial (A) e do índice de aridez (B) período (1950 a 2013), do índice de vegetação ajustado ao solo - IVAS (C) e do albedo da superfície (D) período (2000 a 2013), no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	95
Figura 4.10: Distribuição espacial da estatística Z do teste de Mann Kendall (MK) para a precipitação pluvial (A), índice de aridez (B), período (1950 a 2013), índice de vegetação ajustado ao solo – IVAS (C) e albedo da superfície (D), período (2000 a 2013) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	96
Figura 4.11: Comportamento da precipitação pluvial no município de Cabaceiras – PB. Período 1911-2013.	98
Figura 4.12: Comportamento sazonal do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, durante o ano de 2013.	102
Figura 4.13: Comportamento sazonal do índice de vegetação ajustado ao solo - IVAS no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, durante o ano de 2008.	104
Figura 4.14: Comportamento sazonal do albedo da superfície no alto curso da bacia	

hidrográfica do Rio Paraíba, durante o ano de 2013.	106
Figura 4.15: Comportamento sazonal do albedo da superfície no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, durante o ano de 2008.	108
Figura 4.16: Valores médios do índice socioeconômico por indicador para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período de 1970 a 2006.	110
Figura 4.17: Evolução do produto interno bruto (PIB) anual dos municípios que compõem o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	111
Figura 4.18: Uso do solo agrícola ao longo dos anos de 1970 a 2006 no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	113
Figura 4.19: Produção de cultivos comerciais (algodão - herbáceo e arbóreo e sisal - fibra e folha) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	115
Figura 4.20: Produção das principais culturas de subsistência no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	116
Figura 4.21: Evolução da pecuária no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período de 1974 a 2014.	117
Figura 4.22: Quantidade de estabelecimentos agropecuários com menos de 10 hectares no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	119
Figura 4.23: Percentual da quantidade (QTD) e da área dos estabelecimentos agropecuários no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba no período de 1970 a 2006.	121
Figura 4.24: Extração de lenha e produção de carvão vegetal na região do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba no período de 1990-2013.	122
Figura 4.25: Espacialização do índice socioeconômico geral por município (I_{se_m}) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2006.	125
Figura 4.26: Evolução do índice socioeconômico (I_{se_b}) para todo o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2006.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Metodologias para o cálculo do índice de aridez (I_a).	30
Tabela 2.2: Classificação do clima em função do índice de aridez (I_a).	31
Tabela 2.3: Características do Satélite Terra – Aqua/MODIS	51
Tabela 2.4: Características gerais dos produtos e aplicações das imagens MODIS	51
Tabela 2.5: Unidades de conservação localizadas no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	63
Tabela 3.1: Características dos municípios que compõem o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	66
Tabela 3.2: Níveis de susceptibilidade à degradação das terras (desertificação), em função do índice de aridez para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	71
Tabela 3.3: Descrição da legenda correspondente à significância da estatística Z do teste Mann-Kendall.	73
Tabela 3.4: Manipulação de dados para o método de Sen, com uma medição de dados por séries temporais.	73
Tabela 3.5: Manipulação de dados para o método Sen com várias medições de dados por séries temporais.	74
Tabela 3.6: Descrição do produto MODIS utilizado.	75
Tabela 3.7: Coeficientes de ponderação (w_b) da equação (3.18), para uso em imagens MODIS.	76
Tabela 3.8: Classificação e representação do índice socioeconômico e a situação dos municípios em relação à degradação das terras.	81
Tabela 4.1: Valores mensais e anuais da evapotranspiração de referência (E_{To}) estimada pelo método de Thornthwaite – E_{To} (T) e Penman-Monteith (FAO-56) – E_{To} (PM) para as localidades de Monteiro – PB e São João do Cariri.	82

Tabela 4.2: Valores médios, mínimos e máximos mensais do índice de aridez (Ia) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período de 1950 a 2013. 1	83
Tabela 4.3: Estatística descritiva dos parâmetros biofísicos estimados mensalmente para o alto curso da bacia hidrográfica do alto curso do Rio Paraíba.	92
Tabela 4.4: Tendência da precipitação pluvial anual pelo teste de Mann-Kendall (MK) com base na estatística (Z) e na inclinação de Sen (Q) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período (1950-2013).	97
Tabela 4.5: Resultados da estatística Z do teste de Mann Kendall (MK) para a precipitação mensal das localidades no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba para o período (1950-2013).	99
Tabela 4.6: Tendência anual do índice de aridez pelo teste de Mann-Kendall (MK) com base na estatística (Z) e inclinação de Sen (Q) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba para o período (1950-2013).	100
Tabela 4.7: Tendência anual do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e do albedo da superfície pelo teste de Mann-Kendall (MK) com base na estatística (Z) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba para o período (2000-2013).	101
Tabela 4.8: Evolução da população rural dos municípios que compõem o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	112
Tabela 4.9: Demonstrativo dos projetos de assentamento (PA) nos municípios que compõem o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Modalidades de desertificação	29
Quadro 2.2: Métodos de detecção e estimativa de tendências	39
Quadro 2.3: Municípios abastecidos pelo Açude Epitácio Pessoa	59
Quadro 2.4: Características gerais dos principais solos do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.	60
Quadro 3.1: Tipos de Caatinga.	77
Quadro 3.2: Comunidades-Tipos da Caatinga do Cariri paraibano.....	78
Quadro 4.1: Soluções biofísicas e socioeconômicas para mitigar o problema da degradação das terras (desertificação).	128

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 2.1: Rio Paraíba em época de cheia, durante a curta estação chuvosa. Caraúbas – PB. Março/2011.....	58
Fotografia 2.2: Vegetação desfolhada e solo descoberto, típica na estação seca da região semiárida, Caraúbas - PB. Dezembro/2012.....	62
Fotografia 2.3: Vegetação recuperando o dossel, apesar das precipitações limitadas, Caraúbas - PB. Abril/2015.....	62
Fotografia 4.1: Presença de algaroba nas margens do Rio Paraíba, município de Caraúbas - PB (A) e áreas de solo exposto no município de Congo (B). Trabalho de campo realizado em dezembro de 2014.....	105
Fotografias 4.2: Aspectos da vegetação e do solo no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. A) Área com predominância de catingueira, no município de Coxixola (-7°37'87"; -36°35'75"); B) Espécies de jurema preta no município de Zabelê (-8°05'22"; -37°05'27"). C) Espécie arbórea entre macambiras, município de Barra de São Miguel (-7°45'84"; -36°22'40") e D) Área em processo de degradação das terras, município de São Domingos do Cariri (-7°38'87"; 36°23'62"). Pesquisa de campo (dezembro/2014).	109
Fotografia 4.3: Aspectos da exploração vegetal no município de Sumé - PB. A) Caminhão transportando lenha; B) Olaria.	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer
ANA – Agência Nacional de Águas
AESAs – Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba
ATSM - Anomalias de temperatura da superfície do mar
ARM - Armazenamento máximo de água do solo
APA - Área de proteção ambiental
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CMMAD - Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CV - Coeficiente de variação
 D_A - Deficiência hídrica
Dd - Densidade demográfica
DND - Dados não detectados
EIA - Estudos de Impacto Ambiental
ETo - Evapotranspiração de referência
Ef - Estrutura fundiária
Ev - Extração vegetal
EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
ENOS - El Niño – Oscilação Sul
FAO - Food and Agriculture Organization
HDF - Hierarchical Data Format
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IVAS - Índice de vegetação ajustado ao solo
IVRS - Índice de vegetação da razão simples
IVDN - Índice de vegetação da diferença normalizada
IVP - Índice de vegetação perpendicular
IVAA - Índice de vegetação resistente à atmosfera
IGMA - Índice global de monitoramento ambiental
IVM - Índice de vegetação melhorado
IICA - Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura
IDH - Índice de desenvolvimento humano
IIH - Índice de impacto humano
INCRA - Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBDF - Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal
IDPM - Índice de desvio padrão em movimento
Ia - Índice de aridez
Iu - Índice de umidade
Ih - Índice hídrico
 Ise_i - Índice socioeconômico de cada indicador
 Ise_g - Índice socioeconômico geral para cada município
Ise - Índice socioeconômico para toda a bacia hidrográfica do alto curso do Rio Paraíba
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
MMA - Ministério do Meio Ambiente
MK - Mann Kendall
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectro radiometer
NEB - Nordeste Brasileiro
ONU - Organização das Nações Unidas
PAN-Brasil - Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca

PNMH - Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas
PNM - Pressão ao Nível do Mar
PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos
PPL - Produção Primária Líquida
PM - Penman-Monteith
Pa - Pecuária
PIB - Produto interno bruto
PROCARIRI - Programa de Desenvolvimento Integrado e Sustentável do Cariri
PA's - Projetos de Assentamentos de Reforma Agrária
SIG - Sistema de informação geográfica
SUDENE - Superintendência para o desenvolvimento do Nordeste
SUDEMA - Superintendência de Administração do Meio Ambiente da Paraíba
TSM - Temperatura da Superfície do Mar
T - Thornthwaite
Ta - Taxa de analfabetismo
UNCCD - United Nations Convention to Combat Desertification
UNEP - United Nations Environment Programme
USA – United States of American
Usa - Uso do solo agrícola
VCAN - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1. Meio ambiente, geografia e sustentabilidade.	21
2.2. Desertos e desertificação: uma abordagem conceitual, diferenciações e ocorrências no mundo.	24
2.2.1. Desertificação no mundo	32
2.3. Climatologia e balanço hídrico climático do Semiárido paraibano	37
2.3.1 Análise da tendência de séries temporais	38
2.4. Semiárido brasileiro: caracterização e histórico da ocupação	39
2.5. Bacias hidrográficas: unidades sistêmicas para o planejamento ambiental	44
2.6. O uso da geotecnologia na análise de degradação das terras	47
2.6.1. Índice de vegetação	47
2.6.2. Albedo da superfície	49
2.6.3. Os satélites Terra/Aqua	50
2.7. Indicadores socioeconômicos e o processo de degradação das terras (desertificação) .	52
2.8. Caracterização ambiental da bacia hidrográfica do Rio Paraíba	54
2.8.1. Alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba	54
2.8.1.1. Geologia e geomorfologia	55
2.8.1.2. Clima e hidrografia	56
2.8.1.3. Solos e vegetação.....	59
2.8.1.4. Aspectos socioeconômicos	64
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	65
3.1. Localização da área de estudo	65
3.2. Abordagem metodológica.....	66
3.3. Dados utilizados	67
3.3.1. Dados orbitais	67
3.3.2. Dados censitários.....	68
3.3.3. Dados meteorológicos	68
3.3.4. Dados de campo.....	68
3.4. Preenchimento de falhas	68
3.5. Modelo de estimativa da temperatura do ar.....	69
3.6. Balanço hídrico climatológico.....	69
3.6.1. Estimativa da evapotranspiração potencial (ET _o)	69
3.7. Índice de aridez.....	71
3.8. Avaliação da tendência	71
3.8.1. Teste de Mann-Kendall (MK).....	71
3.8.2. Método de Sen	73
3.9. Imagens orbitais	74
3.9.1. Índice de vegetação	75
3.9.2. Albedo da Superfície	75
3.10. Observações técnicas de campo	76
3.11. Caracterização da vegetação.....	76
3.12. Geoprocessamento.....	78
3.13. Indicadores socioeconômicos do processo de degradação das terras (desertificação) 78	
3.13.1 Relação positiva e negativa dos indicadores	79
3.13.2. Cálculo do índice socioeconômico	80
3.13.3. Representação do índice socioeconômico	81
3.14. Mitigação do processo de degradação das terras.....	81
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82

4.1. Evapotranspiração de referência (ET _o)	82
4.2. Distribuição espacial das variáveis climáticas e biofísicas	83
4.3. Análise da evolução temporal das variáveis climáticas e biofísicas.....	93
4.4. Comparação do IVAS e albedo da superfície para anos: seco e chuvoso.....	101
4.5. Aspectos da vegetação observados nos trabalhos de campo	108
4.6. Análise dos indicadores socioeconômicos do processo de degradação das terras (desertificação)	110
4.6.1. Caracterização dos indicadores socioeconômicos.....	110
4.6.2. Comportamento do índice socioeconômico geral de cada município	123
4.6.3 Evolução temporal do índice socioeconômico no alto curso da bacia hidrográfica Rio Paraíba	126
4.7. Medidas de mitigação do processo de degradação das terras.....	126
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

1. INTRODUÇÃO

O uso inadequado dos recursos naturais tem conduzido o atual modelo de desenvolvimento da sociedade a uma situação insustentável. No âmbito das bacias hidrográficas brasileiras, essa afirmativa é uma realidade, principalmente por serem unidades que agregam recursos naturais e ações antrópicas mal planejadas (BOTELHO & SILVA, 2004).

Em várias regiões do mundo e, particularmente, na região semiárida brasileira as bacias hidrográficas e seus recursos naturais vêm sendo degradados e pouco priorizados, em comparação aos interesses econômicos. Ações como: pastoreio intensivo, uso da vegetação nativa como fonte energética, retirada da mata ciliar, agricultura tradicional, etc. aliadas a características naturais, como: declividades acentuadas, precipitações torrenciais e secas extremas, dentre outras, provocam a degradação das terras (desertificação). Os estudos até então realizados (Sales, 2002; Conti, 2005; Brasil, 2004; Souza *et al.*, 2004; Alves *et al.*, 2009; Almeida Filho & Carvalho 2010; Souza *et al.*, 2010) têm diagnosticado áreas em processo de desertificação na região Nordeste do Brasil, e no Estado da Paraíba, incluindo algumas áreas inseridas no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. As ações antrópicas e a variabilidade climática têm sido apontadas como desencadeadoras e intensificadoras desse processo.

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba tem elevada importância para o Estado da Paraíba, notadamente o seu alto curso, que abrange os municípios das microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental, e que, devido ao modelo de exploração estabelecido ao longo de décadas na região, tem seus recursos naturais bastante degradados, inclusive nas áreas próximas à nascente do Rio, limitando assim o desenvolvimento regional e local. Por outro lado, a variabilidade da precipitação pluvial e, principalmente a ausência ou ineficiência das políticas públicas para convivência com as características semiáridas, secularmente tem provocado problemas sociais nas comunidades rurais dispersas, que praticam uma agricultura de autoconsumo.

Estudos com base em indicadores socioeconômicos relacionados ao processo de degradação das terras (Vasconcelos Sobrinho, 1978; Sampaio, 2003; Rodrigues, 2006; Matallo Junior, 2001; Nascimento, 2014; Khire & Agarwadkar, 2014; Becerril-Piña *et al.*, 2015) têm sido desenvolvidos com o objetivo de consolidar a análise do problema por meio de vários indicadores, dentre eles: sociais, econômicos, políticos, culturais, etc., e não apenas biofísicos.

Nas últimas décadas, os governos, a sociedade e a comunidade científica de modo

geral têm dispensado mais atenção para as alterações ambientais, especificamente, para as variáveis climáticas. O objetivo é mitigar os eventos de secas extremas e promover a adaptação à condição de semiaridez, buscando minimizar os efeitos para a agricultura e abastecimento de água, que são setores muito importantes para a sociedade e os mais atingidos pelas modificações ambientais.

Tem sido evidenciada degradação das terras no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, sendo necessária à realização de estudos, consolidados pela ótica interdisciplinar, que possam responder ao seguinte questionamento: ***De que forma a variabilidade climática associada às atividades antrópicas praticadas na região (pecuária, agricultura, extrativismo vegetal, etc.) contribuem para o processo de degradação das terras?***

Espera-se que o presente estudo seja útil para o desenvolvimento regional e gestão dos recursos naturais, pois a bacia hidrográfica do Rio Paraíba é a segunda maior do Estado, e o seu alto curso é barrado pelo reservatório “Epitácio Pessoa”, provedor de estoques hídricos para a região metropolitana de Campina Grande. Apesar dessa importância, existem poucos estudos que tenham caracterizado e avaliado a degradação das terras nessa região e, principalmente, que tenham realizado o monitoramento temporal das condições ambientais e socioeconômicas relacionadas à degradação das terras. Assim, existe uma necessidade de estudos sobre a cobertura vegetal, características climáticas e socioeconômicas, em escala espaço-temporal, vislumbrando o conhecimento e mitigação dos impactos antropogênicos. Considera-se ainda, a realização do projeto de integração entre as bacias hidrográficas do Rio São Francisco e do Rio Paraíba (eixo leste do projeto completo), almejando-se, com esse estudo, auxiliar no monitoramento, gestão e manutenção dos recursos naturais na região.

Pesquisas que analisam o comportamento de variáveis climáticas, principalmente precipitação pluvial e índice de aridez, têm sido realizadas em várias regiões áridas e semiáridas no mundo (Shaohong *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2009; Croitoru *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2013; Ahani *et al.*, 2013; Some’e *et al.*, 2013; Hrnjak *et al.*, 2013). Tais estudos estão relacionados a investigação do processo de degradação das terras (desertificação) em âmbito regional (Costa & Soares 2012; Nastos *et al.*, 2013), sendo menos frequente em termos de bacias hidrográficas.

Em virtude da importância e dos reduzidos dados de campo para monitorar a dinâmica espacial e temporal da Caatinga e do uso do solo em regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, pesquisas com sensoriamento remoto têm sido realizadas e permitem compreender o comportamento de parâmetros biofísicos, como índices de vegetação, albedo da superfície, dentre outros, no contexto de análise das consequências das ações antropogênicas. Nesse

sentido, a análise da vegetação ou de outro parâmetro por meio de uma única imagem limita a extração de informações, em termos quantitativos e qualitativos, pois a mesma representa a cena de uma única data da passagem do satélite. Contudo, a utilização de uma série multitemporal de imagens, permite o acompanhamento sistemático da biomassa verde, por exemplo. A identificação e eliminação dos fatores que contribuem para a degradação das terras é a forma mais eficaz de reverter os prejuízos ambientais, auxiliando no planejamento adequado do uso da água, do solo, da vegetação, enfim, de todos os recursos naturais disponíveis (CASTANHO *et al.*, 2004; MAGALHÃES *et al.*, 2013; BEZERRA *et al.*, 2014).

Estudos sobre o emprego de técnicas de sensoriamento remoto para análise da dinâmica da cobertura vegetal, albedo da superfície e avaliação das áreas em processo de degradação das terras são observados em: Li *et al.*, 2000; Accioly *et al.*, 2002; Barbosa *et al.*, 2006; Govaerts & Lattanzio, 2008; Rodrigues *et al.*, 2009; Lopes *et al.*, 2010; Sá *et al.*, 2010; Melo *et al.*, 2011; Aquino *et al.*, 2012 e Cunha *et al.*, 2012.

A combinação de indicadores biofísicos, climáticos e socioeconômicos, constitui proposta inédita para a avaliação do nível de degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, visto que a literatura, normalmente, trata a temática sob um enfoque específico e disciplinar. Esse tratamento disciplinar tem limitado a abordagem de um problema ambiental que é, eminentemente, interdisciplinar. Um dos aspectos mais importantes deste estudo é também a análise do componente "variabilidade climática", presente no conceito de degradação das terras (desertificação) como um fator de influência sobre o processo.

Hipótese de Trabalho: Considera-se a premissa de que a variabilidade climática é marcante na região semiárida brasileira e pode acentuar o processo de degradação das terras. No entanto, o bioma Caatinga é adaptado a essa variabilidade, apresentando-se resiliente quanto às alterações de ordem natural. Deste modo, o uso antrópico que se faz dos recursos naturais, sem o devido planejamento, e o modelo de exploração historicamente adotado na região são alegados como desencadeadores e retroalimentadores do processo de degradação das terras (desertificação).

Entender as causas e consequências da degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba é condição inicial para subsidiar políticas públicas com vistas à sustentabilidade. Assim, o presente estudo foi realizado visando alcançar os seguintes objetivos:

Geral: Avaliar o nível de degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Específicos:

- Caracterizar as tendências das séries anuais de precipitação pluvial e do índice de aridez, visando estabelecer o nível atual de acréscimo ou decréscimo da aridez e sua relação com o processo de degradação das terras;
- Analisar a dinâmica espacial e temporal do albedo da superfície e da cobertura vegetal, por meio do índice de vegetação, para fins de identificação da degradação da cobertura vegetal;
- Identificar o nível de degradação das terras com base em indicadores demográficos, socioeconômicos e agropecuários;
- Recomendar, dentre aquelas presentes na literatura, às medidas de maior impacto na mitigação do processo de degradação das terras (desertificação).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Meio ambiente, geografia e sustentabilidade.

Por ambiente natural, entende-se aquele que é produto dos processos da natureza. Dito de outra forma é o produto da interação dos processos físicos e químicos, cuja dinâmica diz respeito aos processos internos daqueles sistemas, nos quais a espécie humana interfere diretamente com sua presença física (RIBEIRO, 1991). Para Mendonça (2001), o que se compreende hoje como meio ambiente – elementos naturais e sociais conjuntamente – faz parte da origem da Ciência Geográfica e isso lhe confere o mérito de ter sido a primeira a tratar do meio ambiente de forma mais integralizante. Jollivet & Pavé (2002) dizem que as pesquisas sobre meio ambiente emergiram de uma dupla interrogação: a primeira é de origem social, e a segunda de origem científica. Na sua acepção atual, a própria expressão meio ambiente é recente. Ela veio se juntar aos termos natureza e meio natural e, de uma certa maneira, os generalizou. A natureza, em termos de objeto científico, trata-se de tudo aquilo que envolve ou circunda o homem e que obedece a dinâmicas próprias.

A consciência social da questão do meio ambiente data, aproximadamente, dos anos 60, através da tomada de consciência de um certo número de problemas colocados pelo desenvolvimento de nossas sociedades: poluições, degradações dos ambientes naturais, limitação de recursos naturais, urbanização acelerada e mal concebida, caráter global das perturbações de origem antrópica, dentre outras. Tal conscientização institucionalizou-se com a Conferência de Estocolmo (1972), convocada pela Organização das Nações Unidas (ONU).

A abordagem sistêmica ou holística, definida como o conjunto de objetos ou atributos e suas relações, estabelecida para organizar uma função particular, foi desenvolvida inicialmente nos Estados Unidos no final dos anos 20 do século XX. Essa abordagem influenciou muito o desenvolvimento e trajetória da Ciência Geográfica, com o surgimento do método chamado Geossistema, metodologia científica específica para os trabalhos de Geografia Física, que marcou também os anos 60, buscando uma reordenação de concepções em função do acirramento das especificações dos seus ramos, bem como da necessidade da interdisciplinaridade científica. O Geossistema é a expressão dos fenômenos naturais, ou seja, o potencial ecológico de determinado espaço no qual há uma exploração biológica, podendo influir fatores sociais e econômicos na estrutura e expressão espacial, porém sem haver necessariamente, face aos processos dinâmicos, uma homogeneidade interna (MENDONÇA, 2002; CHRISTOFOLETTI, 2004).

Sotchava (1962) citado por Christofolletti (2004) introduziu o termo Geossistema na

literatura soviética, com a preocupação de estabelecer uma tipologia aplicável aos fenômenos geográficos, enfocando aspectos integrados dos elementos naturais numa entidade espacial. O autor utilizou teorias sobre paisagens, elaboradas pela escola russa, interpretando-as sob uma visão da Teoria Geral dos Sistemas, o que permitiu que o conceito de paisagem fosse considerado como sinônimo de Geossistema, sendo esta, portanto, formada por atributos sistêmicos fundamentais: estrutura, funcionamento, dinâmica, evolução e informação (GUERRA & MARÇAL, 2006).

No limiar da Geografia Física a metodologia Ecodinâmica, do geógrafo francês Jean Tricart, publicada no Brasil em 1977, também foi muito importante, destacando que a natureza é um todo dinâmico, onde as variáveis se inter-relacionam e interagem, produzindo meios/unidades que são classificados como: estáveis, intergrades e instáveis (TRICART, 1977).

a) *Unidades ecodinâmicas estáveis* – a noção de estabilidade está associada ao modelado, na interface litosfera-atmosfera. Evolui muito lentamente, sendo dificilmente perceptível. Os processos mecânicos atuam de forma tênue e com lentidão. Os meios morfodinamicamente estáveis encontram-se em regiões dotadas de condições como: cobertura vegetal; dissecação moderada e ausência de manifestações vulcânicas.

b) *Unidades ecodinâmicas intergrades* – correspondem a áreas de transição entre meios estáveis e instáveis. Essa passagem do estável para o instável ou vice-versa é apresentada porque na natureza não há um corte abrupto de uma situação para outra. O que caracteriza esses meios é a interferência permanente da morfogênese-pedogênese, exercendo-se de maneira concorrente em um mesmo espaço.

c) *Unidades ecodinâmicas instáveis* – meios nos quais a morfogênese é o elemento predominante na dinâmica natural e fator determinante do sistema natural, ao qual outros elementos estão subordinados. Essa situação pode ter diferentes origens, suscetíveis de se combinarem entre elas.

A abordagem sistêmica tem sido o caminho mais utilizado pelos geógrafos físicos para o desenvolvimento de seus trabalhos. A Teoria dos Sistemas, aprimorada, sobretudo do ponto de vista da modelização e quantificação dos elementos arrolados na abordagem geográfica, tem sido defendida pela maioria dos que se concentram no estudo do ambiente sob a ótica da ciência geográfica. Tal abordagem corresponde a um novo modo de pensar, em termos de conexidade, de relações, de contextos. De acordo com essa visão, as propriedades essenciais de um organismo, ou sistema vivo, são propriedades do todo, que nenhuma das partes possui. Elas surgem das interações e das relações entre as partes. Essas propriedades são destruídas

quando o sistema é dissecado, física ou teoricamente, em elementos isolados (MENDONÇA, 2001; CAPRA, 2006).

No Brasil, o desenvolvimento mais acentuado da Geografia Física Aplicada deu-se a partir da década de 1980, mais precisamente a partir da promulgação da Lei Federal nº 6.938/81, que institui a obrigatoriedade dos Estudos de Impactos Ambientais (EIAs) como parte dos instrumentos legais da Política Nacional do Meio Ambiente, sobretudo com a Resolução do Conama – 001, de 23/01/1986 (ROSS, 2009). Esse autor também concluiu que não se pode confundir Ecossistema com Geossistema, pois o Ecossistema associa-se a Ecologia, cujo centro de preocupações é a vida animal e vegetal, enquanto que o Geossistema associa-se a uma concepção geográfica da natureza, tendo os fenômenos naturais, suas estruturas e peculiaridades espaciais afetadas pelos fatores econômicos e sociais.

Segundo Ross (2011) é objeto de preocupação da geografia atual conhecer cada dia mais o ambiente natural de sobrevivência do homem, bem como entender o comportamento das sociedades humanas, suas relações com a natureza, suas relações socioeconômicas e culturais. É, portanto, de interesse da geografia apreender como cada sociedade humana estrutura e organiza o espaço físico-territorial em face das imposições do meio natural, de um lado, e da capacidade técnica, do poder econômico e dos valores socioculturais, de outro, vislumbrando um desenvolvimento com mais sustentabilidade.

O conceito de desenvolvimento sustentável mais citado e universalmente aceito é o da comissão Brundtland (CMMAD, 1991): *“é aquele que atende as necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade ou a capacidade de as gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades”*. Este conceito surge do reconhecimento da função de suporte da natureza, condição e potencial do processo de produção, em função da crise ambiental que se tornou evidente a partir dos anos 60, refletindo-se na irracionalidade ecológica dos padrões dominantes de produção e consumo, e marcando os limites do crescimento econômico. Desta maneira, inicia-se o debate teórico e político para valorizar a natureza e internalizar as “externalidades socioambientais” ao sistema econômico. Trata-se de uma definição filosófica, uma espécie de declaração de princípio, que certamente servirá de lema e de bandeira para os defensores de uma globalização sadia (LEFF, 2001; VIEIRA, 2002).

Sachs (2004) sugere que a sustentabilidade ambiental seja baseada no duplo imperativo ético de solidariedade sincrônica com a geração atual e de solidariedade diacrônica com as gerações futuras, com escalas múltiplas de tempo e espaço, buscando soluções triplamente vencedoras: sociais, ambientais e econômicas.

No contexto das questões sobre a sustentabilidade, ressalta-se a importância da

educação ambiental, que aponta para transformações nas relações de produção, nas relações sociais, nas relações homem-natureza, na relação do homem com sua própria subjetividade, num processo de construção coletiva de uma ética, uma nova cultura, novos conhecimentos. Processos esses assumidos por sujeitos individuais e coletivos que desvelem a necessidade da construção de novo paradigma, um novo modelo de relacionamento com a natureza (GUIMARÃES, 2007).

Assim, com base em fundamentações próprias da ciência geográfica, e vislumbrando um desenvolvimento mais sustentável acerca da utilização dos recursos naturais, é que o processo de degradação das terras (desertificação) deve ser abordado, inclusive conhecendo-se as diferenciações de conceitos e nomenclaturas que vão diferenciar fenômenos de ordem natural de fenômenos conduzidos pela ação humana.

2.2. Desertos e desertificação: uma abordagem conceitual, diferenciações e ocorrências no mundo.

Etimologicamente, *deserto* e *desertificação* têm a mesma origem, embora representem situações diferenciadas. De acordo com Nimer (1988), os desertos são grandes espaços terrestres com menos de 250 mm de média anual de chuva (segundo a classificação bioclimática de W. Köppen, 1918), alguns um pouco mais. No interior dos desertos, a precipitação pluvial é ainda bem inferior. Em qualquer deserto, porém, além das chuvas escassas, há forte calor – até mesmo nos desertos de altas altitudes. A pouca umidade do ar permite intenso aquecimento e elevados fluxos de calor nos solos.

Os desertos ocorrem nas regiões quentes ou frias. Massas de ar secas atingem a superfície nas latitudes subtropicais, espalhando-se para o norte e para o sul, depois de condensadas nas áreas intertropicais com diminuição de sua capacidade de evaporar e reter água, aumentando à medida que descem e são aquecidas. Passam, então a retirar vapor da terra, provocando aridez climática centrada nas latitudes próximas de 30° norte e sul em relação à Linha do Equador. É exatamente nestas faixas onde se desenvolvem os grandes desertos quentes, como: Kalahari, Namíbia, Árabe e Saara, no continente Africano; Sonoran, Chihuahuan, Mohave na América do Norte; Atacama, na América do Sul e o deserto Australiano. A primeira resposta a escassez de água é a rarefação da vegetação. Por essa razão, os desertos possuem maior extensão de solo nu do que de solos cobertos por vegetação. Mas há muitas formas de vida (fauna e flora) que estão adaptadas a essas condições. A aridez nos desertos, em geral, é acompanhada por amplitudes térmicas diurnas e noturnas muito acentuadas. Os desertos se encontram em várias situações topográfico-climáticas (RICKLEFS, 2010; ROSS, 2011).

Do ponto de vista da distribuição geográfica, Conti (2011) destaca que as regiões desérticas no mundo se associam a quatro situações bem conhecidas:

- a) *Cinturões de anticiclones subtropicais, em ambos os hemisférios*: as áreas de subsidência atmosféricas ou de altas pressões, nas quais o movimento de descida do ar frio e seco na alta troposfera gera, na superfície, áreas divergentes com baixos índices de umidade;
- b) *Continentalidade*: quanto maior a extensão de uma superfície continental, menores serão os índices de evaporação e, dependendo das características geográficas da área, também os de evapotranspiração, em virtude da grande distância dos oceanos que são a principal fonte de umidade, aspectos que concorrem para a instalação de condições desérticas nas escalas regional e local;
- c) *Fachadas ocidentais das latitudes tropicais dos continentes, banhadas por correntes frias*: as águas das correntes frias produzem estabilidade na base da atmosfera além de apresentarem baixo poder de evaporação, resultando em condições de ar mais seco, o que leva a formação de áreas menos úmidas ou semiáridas e desérticas. As correntes de Humboldt na América do Sul e de Benguela na África Meridional podem ser citadas como exemplos dessa ocorrência e associam-se aos baixos índices de umidade do deserto do Atacama (América) e da Namíbia (África);
- d) *Posição de sotavento*: áreas situadas no reverso de montanhas, protegidas da ação de ventos dominantes. O teor de umidade das massas de ar é, de maneira geral, e em sua maior parte, desenvolvido a superfície na porção a barlavento das montanhas, restando menor umidade na porção a sotavento.

De acordo com os relatos de Cavalcanti & Coutinho (2005) o termo “desertificação” foi utilizado pela primeira vez pelo engenheiro francês A. Aubreville, um estudioso do meio natural para designar áreas em via de degradação na África tropical, em virtude do uso predatório dos recursos naturais. Desde o início, portanto, o termo vem associado à ideia de ação antrópica. O fenômeno começou a despertar a atenção dos estudiosos quando intensos processos de degradação ocorreram em algumas áreas de clima seco dos Estados Unidos da América que, junto com uma forte estiagem que aconteceu durante o mesmo período, ocasionou um processo conhecido como *dustbowl* (nuvem/caldeirão de poeira). Outras ocorrências de degradação em áreas com clima semiárido passaram a ser observadas, com destaque para a África, principalmente na década de 60, ocasionando, ao final da grande seca que assolou o Sahel entre 1968 e 1974, no primeiro esforço internacional para conter a desertificação.

No Brasil, Vasconcelos Sobrinho tem sido considerado um pioneiro nos estudos sobre

a desertificação. Sua trajetória teve início com a publicação, em 1971, do trabalho intitulado: Núcleo de desertificação no polígono das secas. Na contextualização desses núcleos (áreas-pilotos) foram consideradas seis unidades mínimas, para se realizar estudos, distribuídas nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco (MATALLO JUNIOR, 2001). Vasconcelos Sobrinho (1978) destacou que a vocação ecológica da região semiárida para a desertificação decorre dos seguintes fatores: regime pluviométrico de baixos totais anuais de precipitações, limitada amplitude térmica e extrema irregularidade; solos rasos com reduzida capacidade de retenção de água; amplo fotoperiodismo e ventos secos e quentes.

Nimer (1988) afirmou que o processo de desertificação é caracterizado por uma crescente degradação ambiental expressa no ressecamento e perda da capacidade dos solos. Esta degradação é provocada pela ação humana, sem necessariamente passar pela mudança climática regional na área onde o processo se dá, e sem tampouco considerar que esse processo conduz a formação de desertos climáticos e ecológicos, mas tão somente a crescente perda da capacidade dos solos em estocar a água pluvial, que seria cedida à superfície dos solos, as plantas e aos animais durante a estação de carência ou ausência completa de chuva.

Com relação às terminologias utilizadas para caracterizar este processo, Duque (1973) atribuindo as causas da desertificação aos processos antrópicos, utilizou o termo “saarização” referindo-se aos processos de deterioração dos solos no Nordeste e sua conseqüente perda da capacidade produtiva.

Reis (1988) propôs o termo “esterilização ambiental”, considerando-se a perda da fauna, devastação da flora, perda da capacidade produtiva do solo, sendo, portanto, a expressão referida, adequada para traduzir essa problemática. O autor ainda comenta sobre a fragilidade ou suscetibilidade dos ecossistemas, informando que os ecossistemas podem ter equilíbrio instável, no qual, uma vez rompido, o desgaste tende a se processar de modo rápido e acentuado.

Conti (2003) relata também o uso do termo “desertização” para designar a extensão de paisagens e formas tipicamente desérticas, em áreas semiáridas ou subúmidas, como conseqüência da ação humana. “Sahelização”, “estepização”, e “sudanicização”, para caracterizar diferentes graus de desaparecimento do estrato arbóreo e “aridificação” ou “aridização” para indicar uma evolução natural em direção a um clima mais seco.

Em 1977 houve a Conferência de Nairóbi, no Quênia, a primeira reunião mundial sobre desertificação convocada pela ONU, a qual 95 países se fizeram representar. Em 1992, no Rio de Janeiro, na ECO-92, foi confirmado um conceito para a desertificação: **“degradação das terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas resultantes de**

vários fatores, incluindo variações climáticas e atividades humanas”, que havia sido estabelecido em Nairóbi, e em 1994 foi assinada a United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), sendo ratificada pelo Brasil em 1997.

Por degradação da terra, entende-se como sendo a redução ou perda, nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, da produtividade biológica ou econômica e da complexidade 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 combinação de processos, incluindo os que resultam da atividade humana e das suas formas de ocupação do território (UNCCD, 1994), tais como:

- a) a erosão do solo causada pelo vento e/ou pela água;
- b) a deterioração das propriedades físicas, químicas e biológicas ou econômicas do solo;
- c) a destruição da vegetação por períodos prolongados.

Os aspectos climáticos podem intensificar o processo de degradação das terras (Conti, 2011), na medida em que condicionam o ambiente a um estresse hídrico, trazendo consequências para a fauna e flora e promovendo a erosão dos solos. Entretanto, estes aspectos climáticos podem passar a ser influenciados pela nova dinâmica ambiental (desertificação), especialmente devido à retirada da cobertura vegetal que pode interferir nos componentes do ciclo hidrológico.

Com relação às atividades humanas, cinco componentes ou indicadores da degradação das terras (desertificação) são citados pela Food and Agriculture Organization (FAO):

- a) Redução das populações animais e vegetais (redução ou perda da biodiversidade) de vastas áreas do semiárido devido à caça e a extração de madeira;
- b) Degradação do solo, decorrente de efeitos físicos (erosão hídrica ou eólica e compactação causada pelo uso da mecanização pesada) ou químicos (salinização ou sodificação);
- c) Degradação das condições hidrológicas de superfície devido à perda da cobertura vegetal;
- d) Degradação das condições geohidrológicas (águas subterrâneas) devido a modificações nas condições de recarga;
- e) Degradação da infraestrutura econômica e da qualidade de vida dos assentamentos humanos.

Ab'Saber (1977) publicou importante trabalho intitulado “Problemática da desertificação e da savanização no Brasil intertropical no qual define como processos parciais de desertificação, todos aqueles fatos pontuais, suficientes para criar degradações irreversíveis da paisagem e dos tecidos ecológicos naturais. Destacam-se assim, nove geótopos áridos no Nordeste, como as áreas mais atingidas:

- Altos pelados – correspondem aos interflúvios desnudos das colinas rasas, nos quais mais de 80% da cobertura vegetal foi retirada, favorecendo a remoção da camada superficial do solo e o aparecimento de fragmentos de quartzo. Ocorrem na região do Alto Jaguaribe, na fronteira do Ceará com a Paraíba e no Vale do rio Vaza Barris (norte da Bahia);
- Salões – planícies aluviais dos baixos vales costeiros com solos salinizados, onde predomina a presença da vegetação rasteira halófila. Ocorrem principalmente nas várzeas do Baixo Mossoró e Baixo Apodi, no Rio Grande do Norte;
- Vales e encostas secas – ocorrem em setores localizados de caatingas abertas em vales secos ou encostas de escarpas e/ou serras situadas a sotavento, ocorrem também em áreas de relevos de encostas, com chão pedregoso e baixo nível de alteração de rochas, e nos enclaves de caatingas em áreas de cerrados. Localizam-se principalmente na região Centro-sul do Piauí, no Sudeste da escarpa da Ibiapaba e na encosta da chapada do Apodí;
- Lajedos-Mares de pedra – inselbergs e campos de inselbergs, que se caracterizam pela aridez rochosa definida, ressaltada por degradação antrópica do entorno. Ocorrem nos sertões de Paulo Afonso/BA, Milagres/BA, Quixadá/CE, Patos/PB, e Arcoverde/PE;
- Áreas de paleodunas quaternárias – este geótopo refere-se especificamente ao campo de dunas de Xique-Xique na Bahia. São paleodunas quaternárias facilmente remobilizadas pelas atividades antrópicas;
- Áreas de topografias ruiformes e Cornijas Rochosas Desnudas com Aridez Rochosa Característica – topografias ruiformes situadas à frente ou na base de morros testemunhos e escarpas estruturais, com pouca ou nenhuma interferência antrópica. A melhor representação dessas áreas fica por conta de Sete Cidades em Piracuruca no Piauí;
- Áreas de revolvimento anômalo da estrutura superficial da paisagem – colinas superficialmente degradadas com a remoção parcial dos solos rasos, por erosão antrópica formando um tipo regional de terras ruins. Aparece nos arredores de Sertânia em Pernambuco;
- Malhadas ou Chão pedregosos – diferentes tipos de chão pedregosos, oriundos da liberação de fragmentos de quartzo proveniente de cabeços de dique e veios ou da desagregação de antigas cascalheiras. Ocorrem numerosos casos de malhadas na Bahia, Ceará, Pernambuco e Paraíba;
- Áreas degradadas por raspagem ou empréstimos de Terra – faixas de terra degradadas à margem de caminhos e estradas, relacionadas com a raspagem de solos e empréstimo de terra para construção de aterros e barragens.

Conti (2003) estabelece duas modalidades para a classificação da Desertificação: natural (ou climática) e antrópica (ou ecológica) – Quadro 2.1:

Quadro 2.1: Modalidades de desertificação

	CLIMÁTICA	ECOLÓGICA
Conceito	Diminuição de água no sistema natural	Criação de condições semelhantes as dos desertos
Avaliação	Índices de aridez	Empobrecimento da biomassa
Indicadores	Elevação da temperatura média; Agravamento do déficit hídrico dos solos; Aumento do escoamento superficial (torrencialidade); Intensificação da erosão eólica; Redução das precipitações; Aumento da amplitude térmica diária; Diminuição da umidade relativa (UR) do ar	Desaparecimento de árvores e arbustos lenhosos (desmatamento); Diminuição das espécies; Elevação do albedo, ou seja, maior refletividade na faixa do infravermelho; Mineralização do solo em encostas com mais de 20° de inclinação (perda de húmus); Forte erosão do manto superficial (voçorocas); Invasão maciça de areias
Causas	Mudanças nos padrões climáticos	Crescimento demográfico e pressão sobre os recursos naturais
Exemplos	Oscilações dos cinturões áridos tropicais durante as glaciações quaternárias	Desertificação das regiões periféricas ao Saara (Sahel)

Fonte: Adaptado de Conti (2003).

A desertificação climática corresponde à progressiva redução das chuvas, determinadas por causas naturais, como alterações na atividade solar, mudança na temperatura de águas oceânicas e fenômenos geológicos, entre outros. Já a desertificação ecológica ocorre quando os ecossistemas perdem sua capacidade de regeneração, verificando-se a rarefação da fauna e a redução da superfície coberta por vegetação, seguida do empobrecimento dos solos e da salinização.

Os elementos climáticos usados com mais frequência para caracterizar o clima sobre qualquer região são a temperatura e a pluviosidade (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007), também utilizados na obtenção do índice de aridez (Ia). O aumento da aridez intensifica a desertificação, tanto indiretamente pela maior variabilidade da precipitação como diretamente por secas prolongadas (GEIST & LAMBIN, 2004). Os efeitos do aumento da aridez incluem o aumento na ocorrência da erosão do solo provocada por uma maior e mais frequente oscilação entre condições mais quentes, secas, frias e úmidas. O Ia classifica o tipo de clima em relação à disponibilidade de água. É um índice climático, que pode ser usado para o monitoramento e previsão da seca e é calculado através da recolha e processamento de dados meteorológicos, tais como a temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração. Mas, os índices de aridez de confiança não poderiam ser desenvolvidos até a existência de séries

longas e de instrumentos eficientes. Assim, os índices de aridez são um produto do século XX (NASTOS *et al.*, 2013). É possível encontrar na literatura algumas metodologias utilizadas para o cálculo do Ia (Tabela 2.1):

Tabela 2.1: Metodologias para o cálculo do índice de aridez (Ia).

Método	Equação	Interpretação do índice
Barat	$Ia = \delta (1 - \rho) / 365 - N - (Ev/365)$ δ = débito anual das chuvas; ρ = coeficiente de escoamento; $\delta (1 - \rho)$ = lâmina de água infiltrada, expressa em mm. Ev = evaporação anual (mm); N = nº de dias de chuva do ano	$Ia < - 20$ = deserto; $-20 < Ia < zero$ = semiárido; $Zero < Ia < 7$ = formas subúmidas, incluindo floresta estável; $Ia > 7$ = grande floresta ombrófila estável.
Biot	$I_m = P * J / T$ I_m = índice mensal; P = precipitação mensal; J = nº de dias chuvosos no mês; T = temperatura média do mês	Todo mês com índice inferior a 10 é considerado seco, sendo, necessariamente mês de verão.
Capot-Rey	$I = ((100 * P) / E + (p / e)) / 2$ P = total anual da precipitação; E = total anual da evaporação; p = precipitação do mês mais úmido; e = evaporação do mês mais úmido	120 = superúmido; $120 - 70$ = úmido I; $70 - 50$ = úmido II; $50 - 40$ = transição semiúmido; $40 - 30$ = sertão subúmido; $30 - 20$ = sertão hipoxerófito; 20 = sertão hiperxerófito;
Dubief	$D = Pr / Ed$ P = altura anual das precipitações; Ed = evaporação diária medida no evaporímetro Piche	20 = limite do deserto; 100 = limite das culturas não irrigadas; 365 = chuvas excedem a evaporação potencial.
De Martonne	$I = P / (T+10)$ P = precipitação média anual (mm); T = temperatura média anual (°C).	$0-5$ = desértico; $5-10$ = semidesértico; $10-20$ = estepes; $20-30$ = região de cultivo de cereais
Emberger	$I = (P * 100) / (M+m) * (M-m)$ P = precipitação anual; M = médias das máximas diárias do mês mais quente (°C); m = média das mínimas diárias do mês mais frio (°C).	$0-30$ = árido; $30 - 50$ = semiárido; $50 - 90$ = subúmido; >90 = úmido;
Koppen	$P < 2t + 28$ (seca de inverno) e $P < 2t$ (seca de verão) = BS (semiárido); $P < t + 14$ (seca de inverno) e $P < t$ (seca de verão) = BW (árido).	BSh = clima quente de estepe; BSk = clima frio de estepe; BW h = clima quente de deserto; BW k = clima frio de deserto.
Lang	$I = P / T$ P = precipitação anual média (mm); T = temperatura média do ar anual (°C).	$0-20$ (desértico), $20-40$ (zona árida), $40-60$ (zona úmida de estepe e savana)
Thornthwaite	$Ia = 100 \times DEF / ETp$ DEF = deficiência hídrica (mm) ETp = evapotranspiração potencial (mm)	$0 - 10$ (pouco ou nenhum déficit hídrico); $10-20$ (déficit moderado de verão ou inverno); Acima de 20 (grande déficit de verão ou inverno).
Gausson&Bagnouls	$P \leq 2T$ P = precipitação (mm) T = temperatura (°C)	Determinar mês seco, ou seja, aquele no qual o total das precipitações, em mm, é igual ou inferior ao dobro da temperatura média mensal, expressa em graus centígrados.

Fonte: Adaptado de Ayoade (2003); Mendonça & Danni-Oliveira (2007); Araújo *et al.*, (2008); Conti (2013).

Estudos realizados por Zhang *et al.* (2009); Croitoru *et al.* (2012); Liu *et al.* (2013); Ahani *et al.* (2012); Some'e *et al.* (2013) analisaram a tendência do índice de aridez e de outras variáveis, como a precipitação pluvial e a temperatura do ar, com base em séries de dados relativamente longas. Foram obtidos resultados variados como: áreas mais vulneráveis a semiaridez, regiões com diminuição ou tendências crescentes do índice de aridez, variabilidades ocasionadas pela sazonalidade, dentre outras.

A definição de aridez foi utilizada pela United Nations Environmental Programme (UNEP) em 1992 para fins de aplicação no Plano de Ação e Combate à Desertificação, elaborado pelas Nações Unidas. Baseia-se na metodologia desenvolvida por Thornthwaite (1948), na qual o índice de aridez (Ia) de uma região depende da quantidade de água advinda da chuva (P) e da evapotranspiração de referência (ET_o). Assim, o Ia é expresso pelo quociente P/ET_o, usado pela FAO e as classes de variação para este índice são apresentadas na Tabela 2.2. Este índice não corresponde a um subproduto do balanço hídrico climático, resultante da razão entre os valores anuais da deficiência hídrica (D_A) e ET_{oA}.

Tabela 2.2: Classificação do clima em função do índice de aridez (Ia).

Classificação climática	Índice de aridez (Ia)
Hiperárido	< 0,05
Árido	< 0,05 < 0,20
Semiárido	0,21 < 0,50
Subúmido seco	0,51 < 0,65
Subúmido e úmido	> 0,65

Fonte: UNEP (1992)

Conforme Ayoade (2003) a classificação climática racional e empírica de Thornthwaite está baseada no conceito de evapotranspiração, no balanço hídrico e em um índice de umidade, derivado de dados puramente climáticos. Esta abordagem é considerada útil em diversos campos, tais como na ecologia, na agricultura e no desenvolvimento da gestão dos recursos hídricos. Contudo, o modelo não ficou ileso as críticas, sendo apontadas fragilidades com relação à estimativa da evapotranspiração. Dentre os vários métodos de estimativa da evapotranspiração potencial ou de referência, o mais recomendado é o Penman-Monteith (FAO-56).

Sobre os problemas teóricos e metodológicos relacionados à desertificação, Matallo Junior (2001) elenca cinco, a saber: amplitude conceitual, pois a degradação da terra inclui vários componentes, que estão relacionados a metodologias específicas; o segundo está relacionado à ausência de métodos universalmente aceitos, com isso surge uma tendência à proliferação de métodos; o terceiro é concernente à ausência de métodos confiáveis para a identificação de processos de desertificação, que esclareçam sobre as causas e contribuam

para a construção de modelos explicativos; o quarto diz respeito à falta de “clareza empírica” entre desertificação e seca e o quinto problema é a falta de uma metodologia de avaliação econômica, para quantificar as perdas dessa natureza. O autor supracitado ainda informa que para alguns estudiosos e políticos, a desertificação não passaria de um mito, originado no processo de expansão temporária do Saara, ou mesmo uma forma de pressão para captar fundos dos países desenvolvidos.

Apesar dessas inconsistências, pesquisas têm relatado áreas em processo de desertificação no mundo, principalmente no norte da China e na África, tornando-se um problema sério nesses países. Conhecer a abrangência do problema é importante para a identificação das causas e consequências das alterações ambientais, e para o planejamento adequado das medidas mitigadoras.

2.2.1. Desertificação no mundo

A desertificação é um problema de ocorrência mundial, porém de difícil avaliação. Diversas metodologias e resultados com algumas limitações consensuais dificultam o diagnóstico e também prognóstico desse problema ambiental. No entanto, a desertificação incide sobre 33% da superfície da terra, espaço em que vivem aproximadamente 2,6 bilhões de pessoas ou 42% da população mundial. Seus efeitos são agravados na região da África Subsaariana, com mais de 200 milhões de habitantes, representando 20% a 50% das terras degradadas. Também na Ásia e América Latina, por exemplo, a degradação dos solos é severa (BRASIL, 2004).

O Sahel Africano, região semiárida na fronteira com o deserto do Saara, ao sul, é um ecossistema dinâmico que responde a variações nas condições climáticas e de uso antropogênico das terras. Govaerts & Latanzio (2008) utilizando dados de sensoriamento remoto explicaram que o déficit de precipitação nessa região em anos secos leva a uma supressão excessiva da vegetação, a qual, por sua vez, conduz a um aumento do albedo da superfície, o que agrava o processo de desertificação.

Na região Sul da África, onde estão localizados os desertos de Kalahari e da Namíbia, o pastoreio excessivo de gado é a causa mais importante da desertificação. Luijk *et al.* (2013) estudaram as implicações hidrológicas da desertificação na África do Sul, comparando áreas preservadas e desertificadas, e constataram que a perda da cobertura vegetal nativa modifica as propriedades e interações entre solo e água, ligadas à prestação de serviços ecossistêmicos, como a prevenção da erosão, manutenção do solo, prevenção de inundações e manutenção do escoamento de base do rio. Pereira & Nascimento (2013) conhecendo a susceptibilidade à

desertificação em Moçambique, na África, apresentaram proposta de classificação do estado de conservação ou degradação da terra no distrito de Chicualacuala. A proposta abarca o espectro dos vários estágios do processo que, passando pela susceptibilidade à desertificação, culmina com a desertificação de fato.

A Mongólia, na Ásia, também é afetada pelo problema da desertificação, onde estima-se que mais de 78% do total deste território está sob o risco de desertificação, dos quais cerca de 60% é classificado como altamente vulnerável (YANG *et al.*, 2004; HUANG & SIERGET, 2006). Estudos realizados por Li *et al.* (2000) também para a Mongólia, avaliaram o aumento do albedo da superfície decorrente do pastoreio intensivo em região semiárida. Os autores utilizaram dados de estações micrometeorológicas e dividiram a área experimental em quatro parcelas com intensidades diferenciadas de pastoreio. Os resultados mostraram que o aumento do albedo em conjunto com a ocorrência de seca e ventos fortes no inverno e na primavera, quando as plantas estão dormentes, agrava a desertificação.

Xu *et al.* (2014) estudaram a dinâmica da desertificação nos últimos 10 anos e sua relação com as mudanças climáticas e atividades humanas na região agrícola e pastoril do norte da China. Os autores utilizaram imagens MODIS, correspondentes ao período de 2000 a 2010, e compararam a variação da produção primária líquida (PPL), que foi induzida pelas alterações climáticas e atividades humanas, para cada pixel que experimentou reversão ou expansão da desertificação. Os resultados indicaram que a atividade humana controlou esse processo de expansão e reversão. Medidas de proteção ecológica adotadas pelo governo chinês estão associadas ao processo de reversão da desertificação, por exemplo.

Khire & Agarwadar (2014) no estudo da desertificação em região central da Índia utilizaram vários parâmetros: biofísicos (índice de vegetação, albedo da superfície, mudanças no uso e cobertura da terra e erosividade da chuva), socioeconômicos (índice de pressão populacional e da pecuária) e climáticos (índice de aridez e secas meteorológicas). Os resultados indicaram áreas com nível moderado de desertificação (32,1%) e severo (21,2%).

Becerril-Piña *et al.* (2015) estudando a vulnerabilidade à desertificação em região semiárida do México utilizaram um conjunto de índices que representam quatro fatores da desertificação: vegetação, solo, clima e ações antrópicas. Classificando as áreas vulneráveis em quatro categorias: baixo, médio, alto e extremo, os autores identificaram que os municípios de Querétaro, El Marqués, Santa Catarina, Corregidora, Apaseo el Alto e Celaya estão em situação extrema de desertificação.

Nas paisagens heterogêneas em regiões áridas e semiáridas da Austrália também se identifica o processo de degradação das terras, em função do tradicional pastoreio de ovinos

na região. Jafari *et al.* (2008) utilizou dados de sensoriamento remoto para obter um índice de desvio padrão em movimento (IDPM) que mostrou valores significativamente mais elevados em áreas degradadas, em torno de pontos de água, em comparação com locais de referência, com ausência de pastoreio.

A região sudoeste dos Estados Unidos da América também é propensa à ocorrência da desertificação, a mesma apresenta clima árido e semiárido e foi estudada por Mueller *et al.* (2007) que modelou os fluxos de água e nutrientes (amônia, nitrato e fósforo) através de cenários, em áreas de transição de vegetação, identificando relações desses fluxos com a degradação das terras nessa região.

Na Europa, a região mediterrânea têm grandes áreas com susceptibilidade à desertificação. Costa & Soares (2012) em estudo sobre a dinâmica local do índice de aridez no Sul de Portugal, observaram que a região Sudeste é a mais ameaçada pela seca e aridez extrema. Períodos de seca ampliam a erosão do solo, provocam danos à vegetação, reduzem os recursos hídricos, aumentam a vulnerabilidade à salinização, esgotam e degradam as terras agrícolas, entre outros fenômenos que causam à degradação do solo, ocasionando suscetibilidade à desertificação. Áreas do Mediterrâneo europeu podem ser afetadas por processos de degradação das terras que levam à desertificação, principalmente devido a conflitos de uso das terras, no passado e no presente, ou entre as prioridades econômicas e ecológicas (HILL *et al.*, 2008).

No Brasil, as áreas mais susceptíveis à desertificação estão localizadas na região semiárida, predominantemente localizada no Nordeste brasileiro. Essa região é coberta principalmente por vegetação xerófila, bioma Caatinga, e é uma região muito populosa (22.598.318 habitantes). Como em outras partes do mundo, os processos de desertificação em curso no semiárido brasileiro devem-se principalmente ao uso inadequado da terra e dos recursos naturais, como por exemplo: exploração madeireira excessiva, má gestão de áreas de pastagem, irrigação mal planejada, etc. (CAVALCANTI & COUTINHO 2005).

Conti (2005) afirma que a região semiárida do Nordeste exhibe os exemplos mais expressivos de desertificação, e através de metodologia climatológica, identifica áreas de concentração de pontos com tendência pluviométrica negativa na região. Estudos de modelagem realizados por Oyama & Nobre (2004) e Souza & Oyama (2011) explicam que a desertificação no semiárido brasileiro pode afetar o clima local e regional, diminuindo a precipitação pluvial, a evapotranspiração e alterando as componentes do ciclo hidrológico.

De acordo com informações governamentais (BRASIL, 2004; BRASIL, 2007), as áreas brasileiras susceptíveis à desertificação foram determinadas seguindo os pressupostos

norteadores da UNCCD, os quais propõem a adoção do índice de aridez, calculado pela razão entre a precipitação pluvial e a evapotranspiração. Dentre as regiões climáticas de abrangência da UNCCD (áridas, semiáridas e subúmidas secas), o Brasil não possui áreas com clima árido, apenas semiárido e subúmido seco (Ia entre 0,21 e 0,65). As áreas semiáridas, subúmidas secas e de entorno (características semelhantes) – Figura 2.1, são o lócus de atuação do Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e mitigação dos efeitos da Seca, PAN – Brasil.

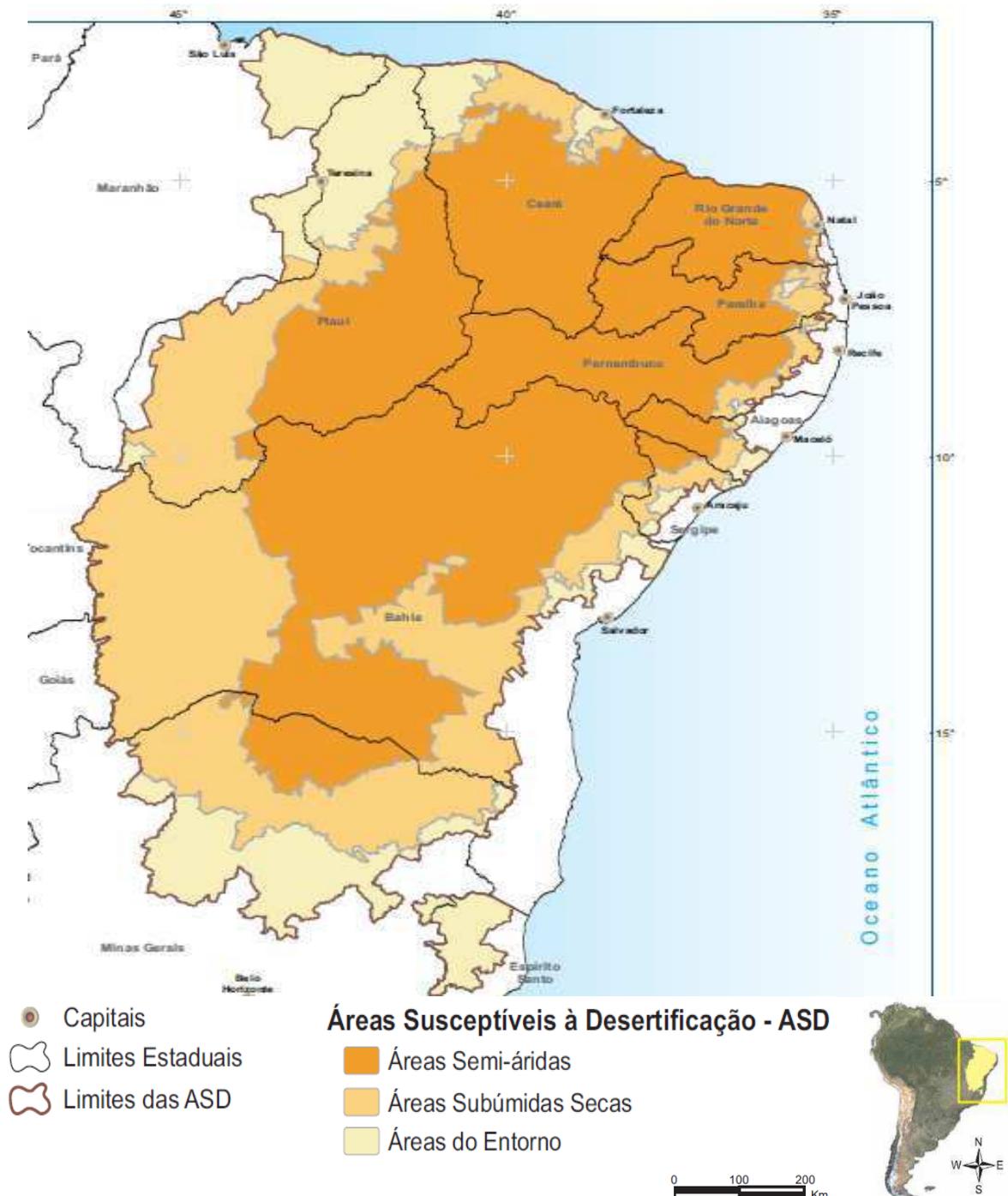


Figura 2.1: Áreas susceptíveis a desertificação na região semiárida brasileira.
Fonte: Adaptado de Brasil (2004).

Os primeiros núcleos de desertificação foram estudados por Vasconcelos Sobrinho (1978), que selecionou, empiricamente, seis áreas piloto, onde existiam processos de degradação de solo e da cobertura vegetal, nos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Bahia. Baseado nesses estudos, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) promoveu visitas de um grupo de pesquisadores a essas áreas. Dentre elas, quatro foram caracterizadas como de alto risco à desertificação, conhecidas como núcleos de desertificação de Gilbués (PI), Irauçuba (CE), Seridó (PB-RN) e Cabrobó (PE).

Estudo realizado por Alves *et al.* (2009) sugere que a desertificação se espalha lentamente a partir de pequenos núcleos até atingir grandes superfícies. Esses núcleos foram identificados para o Estado da Paraíba e denominados de focos de solos desnudos ou com ulceração acentuada do tecido ecológico. As áreas com mais evidências na Paraíba estão na antiga microrregião dos Cariris Velhos, atualmente denominada de Cariri Oriental e Cariri Ocidental, abrangendo os seguintes municípios: Juazeirinho, São João do Cariri, Serra Branca, Cabaceiras e Camalaú; e no núcleo do Seridó.

O Programa de Ação Estadual de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAE-PB (2011) estimou áreas em processo de desertificação no Estado da Paraíba, utilizando dados de sensoriamento remoto para avaliar a cobertura vegetal, além de outros indicadores (erosão, uso da terra, matéria orgânica, densidade populacional, etc.). Os resultados indicaram que 56,4 % da área do estado se encontram com alto nível de desertificação.

A desertificação nas microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental foi estudada por Souza *et al.* (2004) a partir da análise de variáveis representativas do clima, vegetação, solos e aspectos socioeconômicos na bacia hidrográfica do Rio Taperoá. Os autores verificaram a susceptibilidade potencial desta bacia à desertificação, apresentando-se basicamente nos locais mais predispostos de forma natural a esse processo, onde houve, e continua havendo, forte intervenção antrópica. Souza *et al.* (2010) também identificaram os vales dos rios como as principais áreas ocupadas pela população e pelas atividades econômicas, caracterizando, ao longo de séculos, a ocorrência da desertificação nessa região. Os autores analisaram políticas públicas, dados censitários e fundiários para obtenção desses resultados.

Nascimento *et al.* (2014) analisaram a degradação da caatinga, por meio do uso do NDVI obtido com sensores orbitais, na bacia hidrográfica do alto curso do Rio Paraíba. Os resultados mostraram que, no período compreendido entre 1989 e 2004, houve um considerável avanço na deterioração da condição da cobertura vegetal, sendo este processo diretamente relacionado ao desenvolvimento das atividades agropecuárias desenvolvidas de

modo insustentável ao longo dos anos. Lima & Artigas (2013) estudando a mesma região, e incluindo o médio curso do Rio Paraíba observaram mudanças de uso do solo entre 1990 - 2000 e 2000 – 2006, evidenciando uma diminuição da vegetação de caatinga.

Para se compreender adequadamente o processo de desertificação e os seus principais causadores, é preciso conhecer muitas variáveis e seus comportamentos ao longo do tempo. Os aspectos climatológicos característicos da região, que condicionam muitas atividades socioeconômicas e compõem uma dinâmica bastante peculiar, devem ser bem descritos e analisados a fim de elucidar o problema.

2.3. Climatologia e balanço hídrico climático do Nordeste brasileiro

As constantes variabilidades climáticas do Nordeste brasileiro estão relacionadas, entre outros fatores, a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), ao fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENOS), oscilações de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), os quais são mecanismos inter-relacionados que causam variabilidade na precipitação e no clima (NOBRE & SHUKLA, 1996; MOLION & BERNARDO, 2002).

O modelo mensal e interanual de distribuição de chuvas no Semiárido paraibano é extremamente irregular, tanto no tempo quanto no espaço geográfico. Na maioria dos anos, há uma predominância de estação chuvosa com duração de apenas dois a três meses, em outros persistem por até nove meses ou chove torrencialmente num local e quase nada na sua circunvizinhança (ALMEIDA & SILVA, 2008). Nascimento & Alves (2008) explicam que a microrregião do Cariri paraibano apresenta deficiência pluviométrica, dentre outros motivos, por localizar-se na vertente a sotavento do Planalto da Borborema, mostrando a influência que a distância do oceano e a morfologia do relevo exercem na distribuição dos climas. Convém ressaltar ainda que a variabilidade da precipitação nessa região está relacionada também ao fato de que nas baixas latitudes, a precipitação é controlada principalmente pela dinâmica dos ventos, nas zonas associadas de convergência e divergência. Essa característica de irregularidade das precipitações demonstra a falta de confiabilidade com as quais determinadas quantidades de precipitação podem ser esperadas.

Em regiões semiáridas, o conhecimento do regime pluvial, que se caracteriza por alto déficit hídrico, é de extrema importância para vários setores da sociedade, tornando-se fundamental conhecer os efeitos dos elementos do clima no processo de evapotranspiração potencial (ETp) de forma a se obter um gerenciamento e uso racional dos recursos hídricos. A precipitação pluvial e a evapotranspiração potencial são elementos do clima que ocorrem de forma oposta e são expressos na mesma unidade de medida (mm). Conhecendo-se o regime

pluvial e o processo de evapotranspiração, pode-se estabelecer o balanço hídrico climatológico. Para se estimar as reais disponibilidades de água em qualquer região e em particular na região semiárida, onde o problema do déficit hídrico provoca grandes impactos sociais, não basta apenas que se conheça o regime pluvial, mas é necessário, também, a realização do balanço hídrico. Assim, contabilizando-se a chuva (entrada), e a evapotranspiração (saída), tem-se o balanço hídrico, que permite caracterizar as condições de umidade e do clima de uma determinada região. Na escala macro, o “balanço hídrico” é o próprio “ciclo hidrológico”, cujo resultado nos fornecerá a água disponível no sistema (no solo, rios, lagos, vegetação úmida e oceanos), ou seja, na biosfera (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Como produto do balanço hídrico de Thornthwaite & Matter (1955), apresentam-se os índices climáticos: o índice de umidade (Iu), que representa a relação percentual entre o excesso anual de água e a evapotranspiração potencial anual; o índice de aridez (Ia) que expressa a deficiência hídrica em percentagem da evapotranspiração potencial anual e o índice hídrico (Ih) que relaciona os dois índices já citados.

Através do balanço hídrico é possível identificar áreas climaticamente favoráveis à exploração de uma determinada cultura, bastando para isso que se conheçam as exigências climáticas dessa mesma cultura, expressas também em termos de parâmetros do balanço hídrico (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Silva *et al.* (2011) destacam que o sucesso das culturas implantadas depende da regularidade e quantidade das chuvas. Deste modo, as variabilidades espaciais e temporais da precipitação pluvial nas regiões áridas e semiáridas são fatores limitantes para a agricultura de sequeiro, que é uma prática de sobrevivência realizada por parcela significativa da população da região semiárida brasileira.

Estudos climáticos são relevantes em regiões semiáridas para o planejamento agrícola e de abastecimento hídrico, dentre outras, e são viabilizados pela análise de séries temporais que caracterizam o comportamento de variáveis, indicando tendências crescentes ou decrescentes.

2.3.1 Análise da tendência de séries temporais

Uma das dificuldades que ocorre na interpretação dos dados ambientais é a quantificação das tendências e demonstração de que a estimativa da tendência é estatisticamente significativa. Para tal, utilizam-se os testes estatísticos não-paramétricos, particularmente na estimativa da tendência de séries de dados ambientais. Vários testes estão disponíveis para a detecção e/ou quantificação de tendências. O primeiro passo na análise de

qualquer conjunto de dados, no entanto, é um gráfico dos dados, geralmente como uma função de espaço ou de tempo. Representações gráficas de dados facilitam a observação das tendências gerais e ciclos que podem ajudar na escolha de um teste estatístico apropriado. O Quadro 2.2 resume os vários métodos para a detecção e/ou estimativa das tendências utilizando diferentes técnicas. Cada técnica tem vantagens e desvantagens, por isso, deve-se examinar cuidadosamente o volume de dados coletados antes de escolher a técnica mais apropriada.

Quadro 2.2: Métodos de detecção e estimativa de tendências

Teste	Aplicabilidade	Comentários	Referências
Métodos gráficos	Estimativa visual da presença/ ausência de tendência.	Não há resultados quantificáveis.	
Regressão linear	Fornece uma estimativa de inclinação, intervalo de confiança e quantifica a bondade de ajuste.	Permite a estimativa quantificada da influência de múltiplas variáveis independentes. Não lida com dados faltantes; Pode ser muito afetado por dados cíclicos e discrepantes.	
Modelo de Box-Jenkins	Teste para tendências de longo prazo, com espaçamentos regulares de dados.	Requer grande conjunto de dados. Requer constante espaçamento temporal de dados.	Box & Jenkins (1976)
Mann-Kendall	Teste para a existência de tendência positiva ou negativa.	Teste não-paramétrico. Permite os dados em falta; Não é afetado por erros de dados brutos e discrepantes.	Mann (1945) Kendall (1975)
Método de Sen	Valor estimado e intervalo de confiança para a inclinação.	Permite os dados em falta; Não faz suposições sobre a distribuição de dados; Não é afetado por erros e discrepâncias de dados brutos.	Sen (1968) Thiel (1950)

Fonte: Adaptado de Brauner (2013).

A seguir são detalhadas algumas dificuldades potenciais inerentes ao uso do método de Sen:

Séries de dados com falhas (pontos sem dados): Para o teste de Sen, simplesmente não calcular uma inclinação para os pontos de dados faltosos (cuidado deve ser tomado para não considerar os pontos de dados faltosos no número total de amostras, n).

Dados não detectados (DND): o método de Sen pode ainda ser utilizado para prever uma inclinação mediana, se o número de medições de DND é menor do que $(n-1)/2$, mas pode limitar severamente a previsão de um intervalo de confiança para a estimativa.

2.4. Semiárido brasileiro: caracterização e histórico da ocupação

As condições climáticas são comumente apontadas como causas das dificuldades socioeconômicas vivenciadas pelos habitantes da região semiárida do Nordeste do Brasil. A esse respeito Rebouças (1997) é contundente ao recusar tal determinismo físico-climático que tem servido historicamente de justificativa para a “cultura da seca”. As condições físico-climáticas que predominam na região Nordeste do Brasil podem, relativamente, dificultar a

vida, exigir maior empenho e maior racionalidade na gestão dos recursos naturais em geral e da água em particular, mas não podem ser responsabilizadas pelo quadro de pobreza amplamente manipulado e sofridamente tolerado na região.

A expressão “semiárido” é usada para descrever o clima e as regiões onde ocorrem precipitações médias anuais inferiores a 800 mm, índice de aridez (I_a) entre 0,21 e 0,50, e cuja vegetação é composta prioritariamente por arbustos, considerando-se uma paisagem bastante alterada, que perde as folhas nos meses mais secos ou por pastagens que secam na época de estiagem, características do bioma Caatinga, presente na região Nordeste do Brasil. No entanto, os conhecimentos acumulados sobre o clima permitem concluir não ser apenas a falta de chuvas a responsável pela oferta insuficiente de água na região, mas também sua má distribuição, associada a uma alta taxa de evapotranspiração, que resultam no fenômeno da seca, a qual periodicamente assola a população da região (BRASIL, 2005). Além da menor quantidade e da má distribuição das chuvas, destaca-se que os solos predominantes são pouco profundos (rasos), estabelecendo uma relação onde prevalece como regra, o pequeno armazenamento de água no subsolo, contribuindo fortemente para a escassez desse líquido, entre outros processos.

De acordo com o Instituto Nacional do Semiárido (INSA) a região semiárida contabiliza 1.135 municípios distribuídos no espaço geográfico de nove unidades da Federação: Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e Minas Gerais, enquadrados em critérios estabelecidos (precipitação, índice de aridez e risco de secas). A área classificada oficialmente como semiárida é de 980.133 km². Na região vivem 22.598.318 milhões de pessoas, das quais 8.595.200 milhões estão na zona rural (IBGE, 2010). Essa região ocupa 63% da região Nordeste do país e apresenta elevada variabilidade temporal e espacial das precipitações; há predominância de solos rasos baseados sobre rochas cristalinas e conseqüentemente baixas trocas de água entre o rio e o solo adjacente. O resultado é a existência de densa rede de rios temporários. A Figura 2.2, elaborada com informações do Ministério do Meio Ambiente – MMA apresenta a delimitação do semiárido brasileiro.

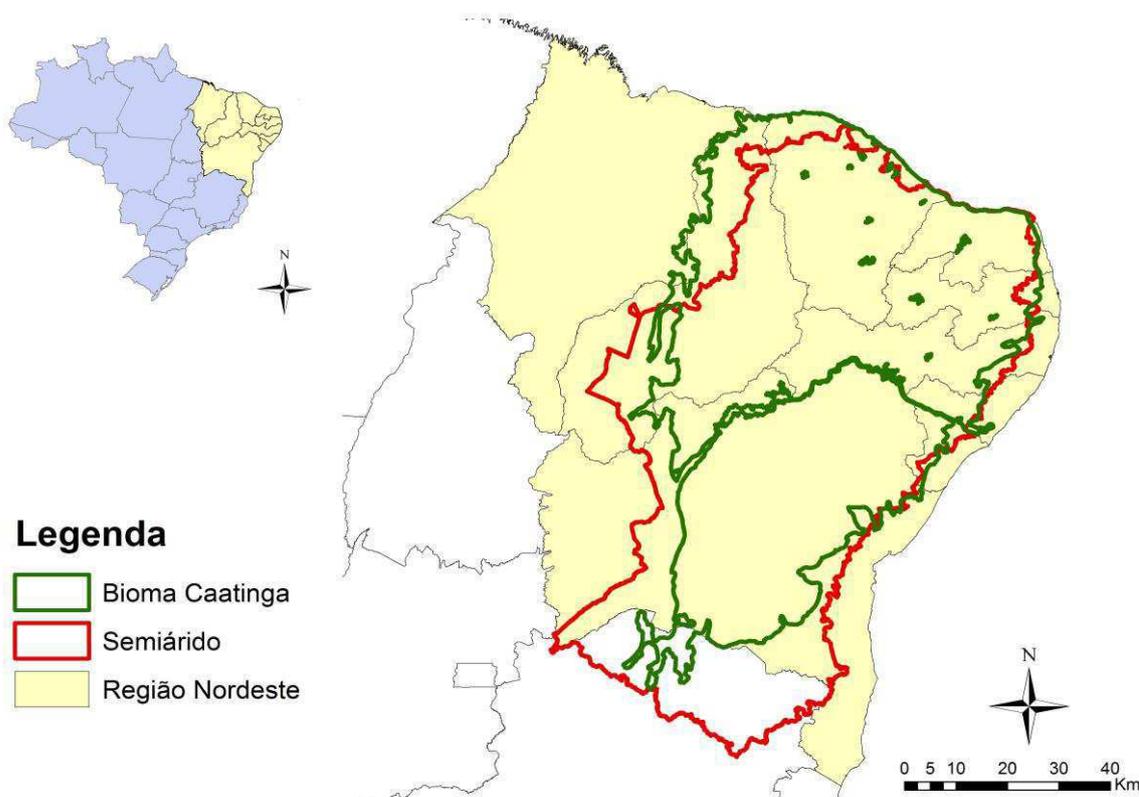


Figura 2.2: Delimitação da região semiárida e do bioma Caatinga no contexto do Nordeste brasileiro.

Conforme descrição apresentada por Cirilo (2008), a região Nordeste do Brasil, cujo território corresponde praticamente a uma interseção com o semiárido brasileiro, ocupa a posição norte - oriental do país, entre 1° e 18°30' de latitude Sul e 34°30' e 40°20' de longitude Oeste de Greenwich. Sua área, que é de 1.219.000 km², equivale a aproximadamente um quinto da superfície total do Brasil, abrangendo nove Estados (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia).

Com relação à ocupação histórica da região, a partir de 1663 são registradas as concessões das primeiras sesmarias (sesma: sexta parte de alguma coisa), através das quais as regiões que hoje fazem parte do semiárido brasileiro e particularmente do Cariri do estado da Paraíba, começaram a ser colonizadas e exploradas economicamente. Foi pioneiro nessa organização territorial o Sr. Antônio de Oliveira Lêdo, originário de Pernambuco, que requereu 30 léguas de terras ao longo do Rio Paraíba, fazenda essa estabelecida no lugar que deu origem a atual cidade de Boqueirão (ALMEIDA, 1979).

Pádua (1987) destaca quatro variáveis para que se possa entender a ocupação do território brasileiro e semiárido no período colonial: a terra farta, criando assim uma percepção de que o território estaria sempre aberto ao avanço da produção econômica e da ocupação; as técnicas rudimentares, baseadas em uma postura parasitária em relação à produtividade do mundo natural, onde se destacou a queimada extensiva e com intervalos de

tempo pequenos; o braço escravo, uma vez que este facilitou o domínio do latifúndio, da monocultura e da falta de cuidado com a terra e, por último, a mentalidade de que a terra era para gastar e arruinar e não para proteger. Toda esta exploração inicial contribuiu para a expansão do capital mercantil europeu.

Distribuídas as terras pelo sistema de sesmarias, a cana-de-açúcar foi o primeiro ciclo econômico desenvolvido nos estados que hoje compõem a região Nordeste, pois o açúcar era um produto de elevado valor comercial na Europa. A partir do momento em que os engenhos litorâneos necessitaram de maior quantidade de animais para o consumo de carnes e para a utilização como força motriz, e que a criação próxima às lavouras de cana-de-açúcar estava inviável, houve um processo de interiorização dos rebanhos. Seguindo os rios, caminhos naturais, iniciou-se o processo de povoamento do interior do Nordeste.

O sisal e o algodão, culturas importantes desenvolvidas na metade do século XX na região semiárida paraibana, perderam sua importância econômica em meados dos anos 80, sendo substituídas pela palma forrageira e pela algaroba, que serviam de alimento para os rebanhos bovinos e caprinos. Com a perda da importância econômica do sisal e do algodão, além da praga do bicudo que prejudicou significativamente o algodão, algumas áreas foram sendo tomadas pela vegetação arbustiva, que foi formando capoeiras e recompondo um cenário de caatinga rala e esparsa (secundária). Capoeira é uma palavra de origem indígena (*Caapuera*) e significa “mata que foi”, ou seja, uma antiga área desmatada para fins agrícolas, pecuários, ou que sofreu extrativismo vegetal, onde a vegetação nativa começa a se recompor do ponto de vista da sucessão ecológica, ocorrendo, nesta área, vegetação arbustiva. Em seu lugar, os arbustos vão recompondo uma vegetação de pouca expressão física e baixa diversidade, os tocos e restos de raízes rebrotam e lentamente vão recompondo uma fitologia terciária (MARIANO NETO, 1999; PEREIRA, 2008).

Souza *et al.* (2010) relatam que com a interiorização dos rebanhos houve a expansão da pecuária extensiva, bovina inicialmente e depois caprina e ovina, e começaram também as modificações maiores nos padrões das caatingas do Cariri em particular e, como regra, em toda a zona semiárida paraibana e nordestina, não apenas pelo consumo direto da vegetação nativa, mas também pelas constantes queimadas a que eram submetidas, cujo objetivo era a renovação do pasto durante o período chuvoso. Além disso, e em quantidades cada vez maiores, à medida que a população aumentava, era necessária a exploração de madeira para produzir carvão, lenha, cercas e material de construção para as moradias. As áreas próximas às várzeas dos rios passaram ainda mais a ser exploradas nesse processo de expansão da ocupação inicial.

Pereira (2006) descreveu alguns ciclos de antropização da Caatinga na região do Cariri paraibano, tais como: a cultura do algodão (*Gossypium* L.), do sisal (*Agave sisalana*), da palma (*Opuntia Cochenillifera*), da algaroba (*Prosopis juliflora*, Sw DC) e da caprinocultura.

Moreira & Targino (1997) explicam que no Sertão da Paraíba, a pequena produção de alimentos desenvolveu-se inicialmente associada à atividade pecuária. A necessidade de abastecimento dos vaqueiros teria contribuído para o surgimento de uma produção alimentar baseada nas culturas do feijão e do milho no interior das fazendas, sobretudo nas áreas de baixios, nos vales e leitos secos dos rios temporários que cortam a região. Já no final do século XVIII, a cultura do algodão assume posição hegemônica no sistema de uso do solo no Sertão e também no Agreste.

A partir de meados do século XIX, intensificou-se o cultivo de algodão no semiárido, também conhecido como “ouro branco”. O proprietário pecuarista viu na exploração desta cultura uma grande virtude. É que devido às constantes secas, a redução do rebanho era muito elevada, demandando vários anos para a recuperação do mesmo, de modo a se ter uma segurança patrimonial. Com o algodão, o lucro gerado pelas altas produções, altos preços e rápido ciclo da cultura, transformou o cenário, se estabelecendo o sistema gado-algodão. A utilização das terras para a cultura algodoeira foi responsável pelo desflorestamento de milhares de hectares, que hoje se encontram degradados, devido à má conservação do solo em termos da fraca proteção da planta, plantios sucessivos e reduzido ou inexistente pousio (PEREIRA & PEREIRA, 2012).

Além da exportação e do suprimento de matéria-prima, para a indústria têxtil regional, fatores explicam a expansão do algodão no Sertão, tais como: representação de uma nova fonte de renda para o produtor sertanejo, possibilidade de cultivo associado a culturas de subsistência e utilização dos restos culturais para alimentar o gado. Com a consolidação da cotonicultura no Sertão, estabeleceu-se a combinação gado-algodão-culturas alimentares, até a segunda metade do século XX, sendo o último elo o mais frágil (MOREIRA & TARGINO, 1997).

As ações humanas vêm sendo degradadoras ao longo do tempo na região semiárida brasileira e particularmente no cariri paraibano, caracterizando-se pelo desmatamento, extração de madeira, construção de cercas, produção de carvão, além da expansão e criação de novos campos agrícolas e pecuária intensa. Somando-se a estas ações, as condições naturais edafoclimáticas, percebe-se que em áreas onde a ação humana foi intensa, ocorre uma recuperação mínima, que com a recorrência das secas, a situação vai se agravando sucessivamente.

Estas apreensões e considerações são observadas em nível de uma unidade territorial, que guarda especificidades, cujas características climáticas são marcantes e perceptíveis. Esta unidade territorial é a bacia hidrográfica, que pode viabilizar significativamente a análise do processo de degradação das terras (desertificação).

2.5. Bacias hidrográficas: unidades sistêmicas para o planejamento ambiental

Nas últimas décadas, a bacia hidrográfica vem sendo reconhecida e apontada como unidade fundamental para as análises relacionadas não só a Geografia Física, mas a uma diversidade de áreas, por reunir as características ambientais, econômicas e sociais necessárias ao entendimento da sua gestão. Experiências a partir das bacias hidrográficas, em países como a França, são bem mais antigas (século XVIII), e mostram que o uso dessa unidade possibilita uma visão sistêmica e integrada do meio (TUNDISI, 2003).

Lamonica (2002) diz que o homem sempre teve a necessidade de estabelecer unidades espaciais e temporais bem constituídas na superfície terrestre para melhor intervir, observar, acompanhar e compreender as relações existentes entre ele e o espaço no qual está inserido. E acrescenta que a justificativa para a utilização da bacia hidrográfica como uma unidade ambiental está na praticidade que esta oferece da melhor forma de acompanhar o processo de renovação/manutenção dos recursos naturais. As bacias hidrográficas passam a constituir uma unidade territorial, no momento em que se configuram numa apropriação de uma parcela do espaço para um determinado fim, no entanto é o limite topográfico que delimita ambas as abordagens.

A bacia hidrográfica é entendida como sendo uma unidade básica de análise e planejamento ambiental, por permitir conhecer e avaliar os seus diversos componentes, processos e interações. Por isso, numa bacia é possível avaliar de forma integrada as ações humanas sobre o ambiente e seus desdobramentos sobre o equilíbrio hidrológico. Conceitualmente, a bacia hidrográfica é uma área delimitada por um divisor de águas que drena a água de chuvas por ravinhas, canais e tributários, para um curso principal, ou exutório, desaguando diretamente no oceano ou num lago. As bacias podem ser desmembradas em sub-bacias, a depender do ponto de saída considerado ao longo do canal coletor. É um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo seu exutório, levando em consideração, como perdas intermediárias, os volumes evaporados e transpirados e ainda os infiltrados profundamente (BOTELHO & SILVA, 2004; GUERRA & CUNHA, 2006; TUCCI, 2007; ANA, 2010).

O limite topográfico é aquele que permite uma maior facilidade e praticidade em

destacá-la como unidade no espaço. Portanto seus divisores constituem uma linha em torno de uma determinada área da superfície terrestre, concretizando o limite da separação que divide as precipitações que vão alimentar um, ou outro, sistema fluvial. Acabando por também determinar onde começam e onde terminam as unidades conhecidas por bacias hidrográficas.

A maior parte das bacias hidrográficas tem saída direta para o mar e são chamadas de exorreicas. As interiores, geralmente terminando em um lago, são as endorreicas. Nas áreas desérticas, onde a rede de drenagem é mal estruturada e acaba sendo coberta pelas areias, é chamada de arreica.

Bacia hidrográfica é também entendida como uma célula de estudos e de ação educativa (LEAL & GUIMARÃES, 2009). A partir do momento em que a sociedade começa a buscar explicações para a perda da qualidade da água dos rios, percebeu-se que a situação de um rio é decorrente das condições em que se encontram a sua bacia de drenagem. Portanto, a bacia hidrográfica é a unidade espacial que permite mostrar a complexidade da problemática ambiental, seja no contexto urbano ou rural.

As bacias hidrográficas têm sido adotadas como unidades físicas de reconhecimento, caracterização e avaliação, a fim de facilitar a abordagem sobre os recursos hídricos. Considera-se que o comportamento de uma bacia hidrográfica ao longo do tempo ocorre por dois fatores, sendo eles, de ordem natural, responsáveis pela pré-disposição do meio à degradação das terras, e antrópicos, onde as atividades humanas interferem de forma direta ou indireta no funcionamento da bacia (NASCIMENTO & VILAÇA, 2008).

Para facilitar o gerenciamento dos recursos naturais, o território brasileiro foi dividido hidrograficamente, de acordo com o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, em doze regiões hidrográficas, cuja justificativa se respalda nas diferenças existentes no país, tanto no que se refere aos ecossistemas como também diferenças de caráter econômico, social e cultural. Os Estados brasileiros por sua vez, no âmbito dos seus territórios, organizaram as divisões hidrográficas para fins de gestão, utilizando diferentes critérios (ANA, 2010). No Estado da Paraíba são identificadas onze bacias hidrográficas: Piranhas, Paraíba, Curimataú, Camaratuba, Mamanguape, Miriri, Gramame, Guaju, Jacu, Trairi e Abiaí (AESAs, 2006).

Segundo Guerra & Cunha (2006) no Brasil, os planos de gerenciamento de bacias hidrográficas têm abordado apenas o aspecto da utilização dos recursos hídricos (irrigação, saneamento ou geração de energia), acarretando problemas de ordem socioambiental, econômica, política e cultural. Estes planos, com ênfase apenas na utilização do recurso, não estão relacionados ao desenvolvimento sustentável, pois a capacidade ambiental de dar suporte ao desenvolvimento possui sempre um limite, a partir do qual todos os outros

aspectos serão inevitavelmente afetados.

Nesse contexto, um importante marco para a normatização ambiental que contribuiu para uma reavaliação de ações e mudanças de paradigmas foi a implantação da Lei Federal nº 6.938/81, que estabeleceu a Política Nacional do Meio Ambiente, onde seus instrumentos e principais mecanismos de formulação e implementação estão vinculados a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, que assegura a participação da sociedade civil nas decisões ambientais.

O Decreto nº 94.076, de 5 de março de 1987, que instituiu o Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas (PNMH), sob a supervisão do Ministério da Agricultura, visando promover um adequado aproveitamento agropecuário dessas unidades ecológicas, mediante a adoção de práticas de utilização racional dos recursos naturais renováveis, com os seguintes objetivos: execução de ações voltadas para a prática de manejo e conservação dos recursos naturais renováveis, evitando sua degradação, objetivando um aumento sustentado da produção e produtividade agropecuária, bem como da renda dos produtores rurais; estímulo a participação dos produtores rurais e suas organizações nestas atividades; promoção da fixação das populações no meio rural e consequente redução dos fluxos migratórios do campo para cidade.

A Lei Nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 veio consolidar a tendência nacional de gestão ambiental, principalmente dos recursos hídricos, instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), na qual a bacia hidrográfica é considerada a unidade territorial para a implementação dessa política e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

No Art. 3º do capítulo III dessa lei, são consideradas diretrizes gerais de ação para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, que estão de acordo com os propósitos do planejamento e atuação em bacias:

- 1) A gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade;
- 2) A adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País;
- 3) A integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental.

Antes da implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos, o Estado da Paraíba criou a sua Política Estadual de Recursos Hídricos, instituída pela Lei Nº 6.308, de 02 de julho de 1996, cujos instrumentos são: I - Sistema Integrado de Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos; II - Plano Estadual de Recursos Hídricos; III - Planos e

Programas Intergovernamentais.

Com esta normatização dos procedimentos relacionados à gestão dos recursos hídricos, as áreas das bacias hidrográficas estão mais resguardadas. Nascimento & Vilaça (2008) enfatizam que o gerenciamento dos recursos hídricos, centralizado em Comitês de Bacias Hidrográficas, como sugere a Lei supracitada, possibilita um novo mecanismo de cooperação multilateral entre as esferas federal e estadual, na solução de problemas regionais, potencializando as parcerias interdisciplinares, interinstitucionais e ainda a participação das comunidades locais.

2.6. O uso da geotecnologia na análise de degradação das terras

Lillesand & Kiefer (2003) definem o sensoriamento remoto como a ciência e a arte de obter informação sobre um objeto (alvo), área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno sob investigação. Assim, é possível avaliar as condições da cobertura vegetal e do uso do solo, dentre outras, através de imagens obtidas de sensores orbitais.

A cartografia digital e o geoprocessamento são ferramentas essenciais para os estudos geográficos e ambientais e vem se constituindo, atualmente, como ferramentas indispensáveis, possibilitando avanços significativos no desenvolvimento de pesquisas e processos de gestão, relativas à questão espacial (FITZ, 2008).

O uso de imagens de satélites é conhecido pelo relativo baixo custo de seus produtos, quando comparado com tradicionais métodos fotogramétricos e topográficos. Outra vantagem apresentada por esta tecnologia é a frequência com que cada região na superfície da terra é coberta, o que possibilita o monitoramento temporal de diferentes fenômenos e recursos naturais (GIONGO & VETTORAZZI, 2014). Florenzano (2011) diz que a evolução das técnicas de sensoriamento remoto é fruto de um esforço multidisciplinar, bem como sua aplicação envolve um número cada vez maior de profissionais de diferentes áreas do conhecimento. O monitoramento contínuo é necessário para entender os processos que levam à desertificação. Como o processo ocorre em áreas extensas, o sensoriamento remoto é necessário para subsidiar o monitoramento desse fenômeno. O sensoriamento remoto tem sido aplicado para monitorar a desertificação e para mapear a cobertura vegetal e o uso da terra (WANG *et al.*, 2000; BARBOSA *et al.*, 2006).

2.6.1. Índice de vegetação

De acordo com Ponzoni *et al.* (2012) diversos índices de vegetação têm sido propostos na literatura com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação,

especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Esses índices são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice de área foliar, além de minimizarem os efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição, que influenciam os valores de refletância da vegetação.

Os autores explicam que quanto maior for a densidade da cobertura vegetal de uma determinada área, maior será a absorvância na região do visível, em razão da maior oferta de pigmentos fotossintetizantes. Por outro lado, maior será a reflectância verificada na região do infravermelho próximo, por causa do espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética na estrutura foliar das plantas.

A vegetação é caracterizada, assim, por uma intensa absorção, devido à clorofila, na região do vermelho e por uma intensa energia refletida na região do infravermelho próximo, causada pela estrutura celular das folhas. A água tem reflectância na banda 3 (visível), maior do que na banda 4 (infravermelho próximo). Portanto, apresenta valores negativos, próximos a -1, no IVAS (Índice de vegetação ajustado ao solo). As nuvens refletem de forma semelhante no visível e no infravermelho próximo, assim, espera-se que o valor do pixel seja bem próximo de zero. O solo nu sem vegetação, ou com vegetação rala e esparsa, apresenta valores positivos, mas não muito elevados (MELO *et al.* 2011).

Os principais índices de vegetação disponíveis na literatura são: índice de vegetação da razão simples (IVRS), índice de vegetação da diferença normalizada (IVDN), índice de vegetação perpendicular (IVP), índice de vegetação ajustado para o solo (IVAS); índice de vegetação resistente à atmosfera (IVAA), índice global de monitoramento ambiental (IGMA) e índice de vegetação melhorado (IVM) (Accioly *et al.*, 2002; Barbosa *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2009; Cunha *et al.*, 2012; Ponzoni *et al.*, 2012). O IVAS é um dos mais adequados para analisar a vegetação em regiões semiáridas (Machado *et al.*, 2011 e Becerril-Piña *et al.*, 2015).

O IVAS foi desenvolvido a partir do índice de vegetação da diferença normalizada (IVDN) ao qual foi introduzido um fator com o intuito de minimizar os efeitos da presença do solo. O fator de correção para minimizar as variações de brilho do solo, o torna preferível em regiões semiáridas, de vegetação tendencialmente mais esparsa onde a resposta do solo predomina em relação à resposta da vegetação (Machado *et al.*, 2011).

Estudos sobre o emprego de técnicas de sensoriamento remoto para análise da dinâmica da cobertura vegetal e avaliação das áreas de degradação das terras/desertificação são observados em: Accioly *et al.*, 2002; Lopes *et al.*, 2010; Sá *et al.*, 2010; Melo *et al.*, 2011 e Aquino *et al.*, 2012, justificando-se assim o uso dessa técnica de análise para um fenômeno

complexo e dinâmico.

2.6.2. Albedo da superfície

Conforme Lillesand & Kiefer (2003), o gráfico que mostra a resposta espectral de determinado objeto para os diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético é denominado curva espectral. Esse gráfico é importante para a escolha da região do espectro para a qual se pretende adquirir os dados de sensoriamento remoto para uma determinada aplicação. A Figura 2.3 apresenta as curvas de reflectância espectral de três objetos típicos da superfície terrestre: vegetação verde saudável, solo exposto seco e água límpida. As linhas representam as curvas de reflectâncias médias calculadas a partir de uma grande amostragem de características.

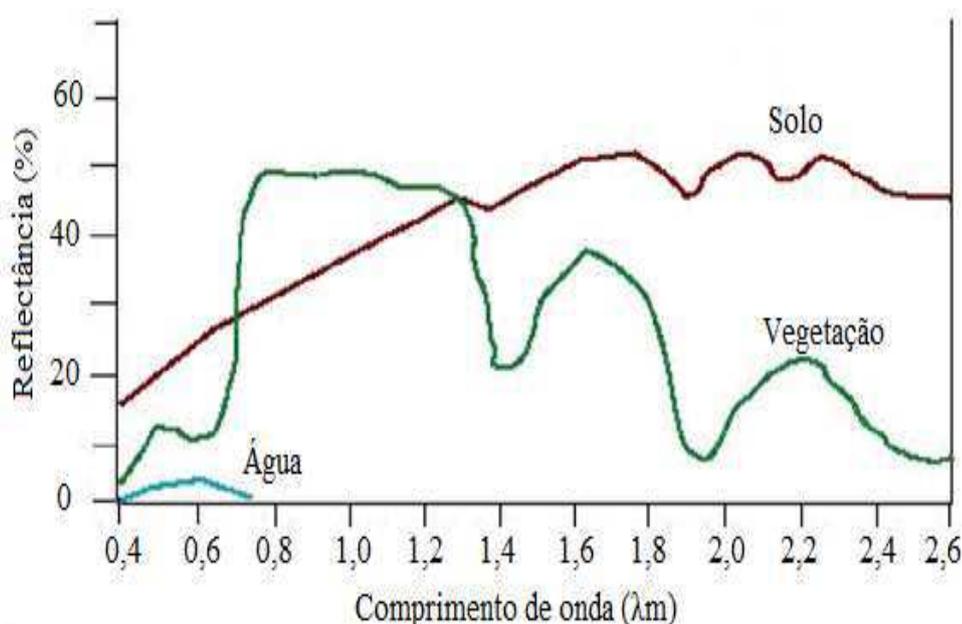


Figura 2.3: Curvas de reflectância espectral típicas para vegetação, solo e água.
Fonte: Adaptado de Lillesand & Kiefer (2003).

Em relação à curva de reflectância espectral da vegetação, na faixa do visível, ocorre a absorção pela clorofila em pontos em torno de 0,45 e 0,67 μm. A absorção é alta nas bandas azul e vermelho, enquanto que a reflexão é alta no verde, fazendo com que nossos olhos percebam a vegetação saudável como verde. Os vales ocorrem nos pontos 1,4, 1,9 e 2,5 μm devido à presença de água nas folhas, que propicia a absorção destes comprimentos de onda. Na porção do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, a reflectância da vegetação verde sadia aumenta sensivelmente, podendo chegar a 50%. A reflectância nesse intervalo resulta principalmente da estrutura interna das folhas.

Entre as propriedades físicas dos corpos terrestres, destaca-se o albedo (reflectância) da superfície, comumente dado em porcentagem, que se caracteriza pela capacidade que os

corpos têm de refletir a radiação solar que incide sobre eles. O albedo da superfície varia de acordo com a cor e a constituição do corpo. Assim, será máximo nos corpos brancos e mínimo nos corpos pretos (MENDOÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007). Os autores acrescentam que um dado corpo com elevado albedo terá, em consequência, uma baixa intensidade de absorção de energia, já que a maior parte dela foi refletida.

Varejão-Silva (2006) explica que nas superfícies planas e horizontais não vegetadas, o albedo varia com as propriedades físicas dos materiais que as constituem (cor, rugosidade etc.) e com o ângulo zenital do Sol, sendo menor quando este astro se encontra próximo à culminação. Havendo vegetação, o albedo varia com a espécie, a fase do desenvolvimento, o estado de sanidade, a geometria da copa, o índice de área foliar, etc., das plantas presentes. Em geral, utiliza-se o valor médio em um dado intervalo de tempo (uma dada fase de desenvolvimento da cultura em estudo, por exemplo).

O albedo da superfície é definido como a razão entre as irradiâncias refletida e incidente. Em algumas aplicações, o albedo restringe-se aos comprimentos de onda do visível, enquanto que, em outras ocasiões, a definição é estendida para incluir a radiação do infravermelho próximo e médio. Em geral, o termo albedo, usado na literatura meteorológica, considera a radiação de onda curta, aproximadamente entre 0,15 e 4,0 μm (GIONGO & VETTORAZZI, 2014).

Conti (2011) explica que com o desmatamento, surgem grandes extensões de solo nu, fato que contribui para mudar a reflectância da superfície, aumentando os valores do albedo. Isso leva a redução da energia térmica disponível - processo agravado pela ausência de nebulosidade, que favorece o escape da radiação infravermelha originada na superfície. O resultado é a não formação de correntes convectivas ascendentes, condição desfavorável à formação de nuvens, processo chamado pelos cientistas de mecanismo biogeofísico de *feedback* (retroalimentação).

O mapeamento temático a partir das bandas ou faixas espectrais depende das características da área em estudo (região plana ou acidentada); época do ano (inverno ou verão); elevação e azimute solar e conhecimento de campo pelo fotointérprete.

2.6.3. Os satélites Terra/Aqua

O Moderate Resolution Imaging Spectro radiometer (MODIS) é um instrumento fundamental a bordo dos satélites Terra/Aqua. A órbita do satélite Terra é cronometrada para que ele passe de norte a sul através do Equador na parte da manhã (10:30h), enquanto a do Aqua passa de sul ao norte ao longo do Equador, na parte da tarde (13:30h). O Terra/MODIS

e o Aqua/MODIS estão visualizando toda a superfície da Terra diariamente, adquirindo dados em 36 bandas espectrais, ou grupos de comprimentos de onda (NASA, 2013). Algumas informações técnicas referentes aos satélites e as imagens MODIS, são observadas nas Tabelas 2.3 e 2.4:

Tabela 2.3: Características do Satélite Terra – Aqua/MODIS

Sistema	Altitude (km)	Resolução temporal (dias)	Resolução espacial (em metros)
Terra-Aqua/MODIS	705	1	250 m (faixas 1-2) 500 m (faixas 3-7) 1000 m (faixas 8-36)

Tabela 2.4: Características gerais dos produtos e aplicações das imagens MODIS

Uso principal	Banda	Largura de Banda ¹	Irradiância Espectral ²
Terra/Nuvem/Aerossóis	1	620-670	21,8
	2	841-876	24,7
Terra/Propriedades aerossóis	3	459-479	35,3
	4	545-565	29,0
	5	1230-1250	5,4
	6	1628-1652	7,3
	7	2105-2155	1,0
Fitoplâncton/Biogeoquímica	8	405-420	44,9
	9	438-448	41,9
	10	483-493	32,1
	11	526-536	27,9
	12	546-556	21,0
	13	662-672	9,5
	14	673-683	8,7
	15	743-753	10,2
	16	862-877	6,2
Vapor de água	17	890-920	10,0
	18	931-941	3,6
	19	915-965	15,0
Superfície/Temperatura	20	3,660-3,840	0,45 (300K)
	21	3,929-3,989	2,38 (335K)
	22	3,929-3,989	0,67 (300K)
	23	4,020-4,080	0,79 (300K)
Temperatura atmosférica	24	4,433-4,498	0,17 (250K)
	25	4,482-4,549	0,59 (275K)
Vapor de água	26	1,360-1,390	6,00
	27	6,535-6,895	1,16 (240K)
	28	7,175-7,475	2,18 (250K)
Propriedades das nuvens	29	8,400-8,700	9,58 (300K)
Ozônio	30	9,580-9,880	3,69 (250K)
Superfície/Temperatura	31	10,780-11,280	9,55 (300K)
	32	11,770-12,270	8,94 (300K)
Altitude das nuvens	33	13,185-13,485	4,52 (260K)
	34	13,485-13,785	3,76 (250K)
	35	13,785-14,085	3,11 (240K)
	36	14,085-14,385	2,08 (220K)

¹Bandas 1-19 estão em nm; Bandas 20-36 em mμ.

²Valores de irradiância espectral são (W/m² mícrons-sr).

Nota-se que o sensor MODIS possui um intervalo diário para a revisita de uma área, o que lhe confere uma grande capacidade para estudos de dinâmicas ecológicas tanto terrestres, quanto oceânicas. Contudo, afirma-se que além do uso das geotecnologias para análise dos fenômenos de ordem natural é necessária à análise de indicadores relacionados aos aspectos socioeconômicos, para o entendimento e esclarecimento das ações humanas, que contribuem de forma direta e indireta para a degradação das terras (desertificação).

2.7. Indicadores socioeconômicos e o processo de degradação das terras (desertificação)

Tão importante quanto a caracterização ambiental é o “retrato” socioeconômico obtido em uma determinada região, pois existe uma ligação entre ambos. Estudos com base em indicadores socioeconômicos relacionados ao processo de degradação das terras (Vasconcelos Sobrinho, 1978; Sampaio, 2003; Rodrigues, 2006; Matallo Junior, 2008; Nascimento 2014; Khire & Agarwadkar, 2014; Becerril-Piña *et al.*, 2015) são desenvolvidos com o objetivo de consolidar a análise do problema por meio de indicadores socioeconômicos e não apenas biofísicos. Waquil *et al.* (2010) e Macêdo & Cândido (2011) apresentam aplicação de metodologia de análise de indicadores de sustentabilidade que pode ser utilizada com êxito na análise de indicadores de degradação das terras (desertificação).

O objetivo principal dos indicadores é agregar e quantificar informações de uma maneira que sua significância fique mais aparente. Os indicadores simplificam as informações sobre fenômenos complexos tentando melhorar com isso o processo de comunicação e podem ser quantitativos ou qualitativos. Para Van Bellen, (2005) a seleção de indicadores é a chave para o monitoramento da relação entre causa e efeito dos problemas ambientais, sendo essencial encontrar a inter-relação que há entre as dimensões analisadas. Siche *et al.* (2007) apresenta revisão de autores acerca do conceito de indicador e índice, esclarecendo que indicador é uma ferramenta que permite a obtenção de informações sobre uma dada realidade e pode ser um dado individual ou um agregado de informações, sendo que um bom indicador deve conter os seguintes atributos: simples de entender; quantificação estatística e lógica coerente; e comunicar eficientemente o estado do fenômeno observado. Um índice revela o estado de um sistema ou fenômeno e pode ser construído para analisar dados através da junção de um jogo de elementos com relacionamentos estabelecidos.

Matallo Junior (2001) apresenta revisão de alguns indicadores relacionados à desertificação e mostra um total de 70 diferentes indicadores. Esse alto número não está consolidado ou sistematizado em nenhuma metodologia. Isso, evidentemente, mostra as dificuldades para a formulação de metodologia mínima consensual que possa orientar a

comunidade científica e órgãos que têm interesse no problema. Vasconcelos Sobrinho (1978) propôs 36 indicadores, distribuídos em categorias físicas, biológicas, agrícolas, sociais, de uso da terra e socioeconômicas. Também Rodrigues (1997) e Rodrigues (2006) contribuíram com a seleção de indicadores para analisar o processo de degradação das terras.

De acordo com Sampaio (2003), os municípios com menor IDH-M são mais susceptíveis à degradação que conduz ao ciclo de desertificação, considerando-se que a população utiliza mais os recursos naturais. A redução da taxa de analfabetismo pode indicar o quanto uma determinada população pode ampliar sua compreensão em relação a práticas de preservação ambiental e uso mais racional dos recursos naturais. A densidade demográfica é um indicador negativo, na medida em que a concentração populacional em uma determinada área causa maior degradação das terras. Pereira (2008) considera que assentamentos rurais de reforma agrária nos Cariris do Estado da Paraíba, ao contrário das sesmarias, tiveram sua gênese na desertificação propiciada por avaliações técnicas que não contabilizaram os ativos e passivos ambientais existentes historicamente nas propriedades, nem propiciaram cenários de uso racional dos mesmos, incluindo densidades demográficas e capacidade de suporte de rebanhos.

Araújo Filho & Carvalho (1997) afirmam que o rebanho caprino, originalmente em menor quantidade que o bovino, mas com recente predomínio no cariri está diretamente relacionado, em princípio, a maior resistência destes animais à seca e principalmente a sua necessidade de alimento que, comparada a dos bovinos, é bem menor. Além disso, os caprinos também se alimentam de uma maior variedade de espécies vegetais, são mais fáceis de serem comercializados e proporcionalmente, mais rentáveis do que bovinos. Duarte (2002) considera que diante da heterogeneidade edafoclimática do semiárido nordestino, não é possível estabelecer qual é a área ideal de uma propriedade que permita a uma família do semiárido sobreviver aos impactos de uma grande seca. Admitindo-se que uma propriedade de solos pobres e carentes de pontos d'água teria que ter área superior a 100 hectares. A reestruturação fundiária é, portanto, fundamental para a mitigação dos efeitos sociais da seca e consequentemente da degradação das terras, que são extremos em decorrência da falta de infraestrutura e de políticas públicas.

Analisando a taxa de lotação média estimada para os dois rebanhos, enquanto são necessários de 10 a 12 ha de caatinga para criar um bovino, nas mesmas condições de pasto podem se alimentar 8 caprinos, o que equivale a uma taxa de cerca de 1 caprino/1,5ha (Souza *et al.* 2010).

Vasconcelos Sobrinho (1978) apresenta os indicadores de propensão à desertificação, que são necessários para identificar as áreas críticas constituídas por ecossistemas frágeis, onde já se teve o início do processo e devem servir para o diagnóstico e contribuição na execução de programas corretivos. Além disso, possuem as seguintes finalidades:

- avaliar a vulnerabilidade à desertificação;
- prever o começo da desertificação antes que ela se inicie;
- vigiar o processo nas regiões que sofrem a desertificação e naquelas susceptíveis ao problema;
- avaliar os efeitos dos processos de desertificação e dos programas para combatê-los.

2.8. Caracterização ambiental da bacia hidrográfica do Rio Paraíba

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba está compreendida entre as latitudes 6°51'47" e 8°18'12" Sul e as longitudes 34°47'37" e 37°21'22" Oeste de Greenwich, localizada na região semiárida, nas mesorregiões da Borborema, do Agreste e do Litoral do Estado da Paraíba, dividida em uma sub-bacia (Rio Taperoá) e três regiões: alto, médio e baixo Paraíba. A área total da bacia hidrográfica é de 20.071,83 km². Esta bacia é considerada a segunda maior do Estado da Paraíba, pois abrange 38% do seu território, com 84 municípios, a qual abriga 1.885.655 habitantes, que correspondem a 52% da população total do Estado (AESAs, 2006).

O Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional é um empreendimento do Governo Federal, sob a responsabilidade do Ministério da Integração Nacional. Tem como objetivo assegurar oferta de água para 12 milhões de habitantes de 390 municípios do Agreste e do Sertão dos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, sendo dividido em dois eixos: norte e leste. O eixo leste terá sua captação no lago da barragem de Itaparica, no município de Floresta - PE, e se desenvolverá por 220 km até o Rio Paraíba - PB, no município de Monteiro-PB (BRASIL, 2013).

2.8.1. Alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba

Situada na parte sudoeste do Planalto da Borborema, o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba faz fronteira ao norte com a sub-bacia do Rio Taperoá, ao sul e a oeste com o Estado de Pernambuco e a leste com a região do médio Paraíba. Localiza-se entre as latitudes (7°20'47" e 8°18'12") Sul e entre as longitudes (36°07'44" e 37°21'22") Oeste de Greenwich, compreendendo, total ou parcialmente, a área de 18 municípios.

Drena uma área de 6.717,39 km² através dos rios: Sucuru, Umbuzeiro e Monteiro, contribuintes da margem esquerda, direita e da porção central, respectivamente, até formar o

Rio Paraíba, que é o principal; este por sua vez deságua no Oceano Atlântico, no município de Cabedelo.

2.8.1.1. Geologia e geomorfologia

O Estado da Paraíba tem aproximadamente 89% de sua área estabelecida sobre rochas pré-cambrianas, onde se encontram exposições da denominada Província Borborema, um cinturão orogênico de idade meso a neoproterozóica.

Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (AESA, 2006), com base em uma estrutura hidrogeológica, ocorre no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba o *Sistema Cristalino*, que é constituído de três mega-associações lito-estratigráficas:

- 1) rochas constituintes do embasamento, de idades arqueana e/ou paleoproterozóica, representadas por migmatitos, ortognaisses e granitóides diversos;
- 2) rochas constituintes de coberturas supracrustais, de idades paleo, meso e neoproterozóica, representadas por metasedimentos diversos, com predominância de xistos e, subordinadamente, por outros metasedimentos, como quartzitos, meta-arcósios, filitos, calcários cristalinos (mármore) e outras rochas calco-silicáticas;
- 3) os granitóides diversos (granitos, granodioritos, dioritos, etc.), que penetram as referidas rochas supracrustais ou estão, geneticamente, associados à origem das mesmas, através do processo de migmatização. Este sistema ocupa uma área de cerca de 49.000 km² (87% da área estadual), inserindo-se, todo ele, na região semiárida do estado, tendo os seus recursos repartidos entre as bacias hidrográficas de Piranhas, Paraíba, Jacu, Curimataú, Mamanguape, Miriri, Camaratuba e Gramame.

Com relação aos *Domínios Morfoestruturais*, ocorrem em escala regional, e organizam a geomorfologia segundo o arcabouço geológico marcado pela natureza das rochas e pela tectônica que atua sobre elas. O alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba está compreendido nos cinturões móveis neoproterozóicos. Estes domínios correspondem a extensas áreas representadas por planaltos, alinhamentos serranos e depressões interplanálticas elaboradas em terrenos dobrados e falhados, incluindo principalmente metamorfitos e granitóides associados (IBGE, 2009).

A *unidade geomorfológica* correspondente é o compartimento do relevo mais importante do setor oriental do Nordeste brasileiro: o Planalto da Borborema. É um planalto em núcleo cristalino arqueado, fazendo parte do cinturão orogênico da faixa atlântica, encontrando-se em posição relativamente isolada (ROSS, 2011).

De acordo com Corrêa *et al.* (2010) compreende-se como sendo parte deste

“planalto”, todo o setor de terras altas, acima da isolinha de 200 metros, podendo ultrapassar 1000 m de altitude, situado a norte do Rio São Francisco, estruturado nos diversos litotipos cristalinos correspondentes aos maciços arqueanos remobilizados, sistemas de dobramentos brasileiros e intrusões ígneas neoproterozóicas pós-orogênicas.

O limite oriental do planalto é genericamente definido pela ruptura de gradiente existente entre a encosta e os patamares rebaixados do piemonte em direção à costa. A depressão sertaneja, a oeste, define o limite ocidental como um semicírculo de terras baixas semiáridas separadas do topo do planalto por uma escarpa, que ressalta os controles litológicos e estruturais. Na figura 2.4 observa-se a altitude (A) e a declividade (B) do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. A porção sudoeste da bacia apresenta altitude e declividade elevadas, diminuindo na porção central e nordeste da bacia.

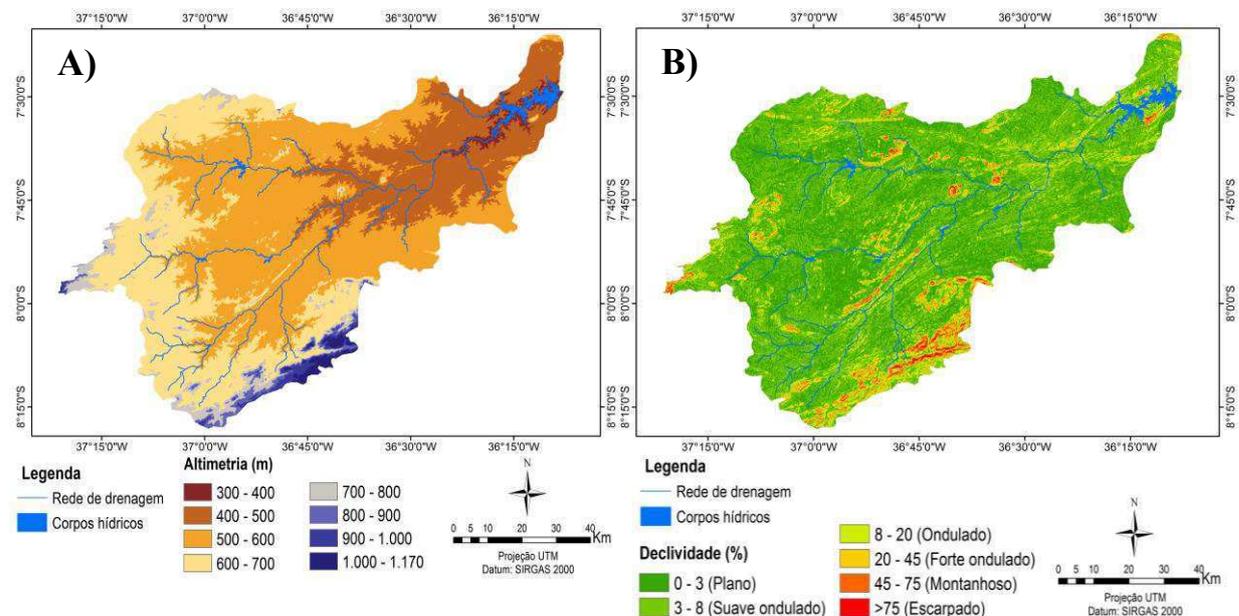


Figura 2.4: Cartas temáticas do relevo do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. A) Hipsometria; B) Declividade.

2.8.1.2. Clima e hidrografia

O Estado da Paraíba, por sua localização dentro da faixa equatorial, é submetido à incidência de alta radiação solar com um grande número de horas de insolação, em virtude da escassa nebulosidade. Tal condição determina um clima quente, temperatura média anual em torno de 26°C, pouca variação intra-anual e uma distribuição espacial da temperatura altamente dependente do relevo.

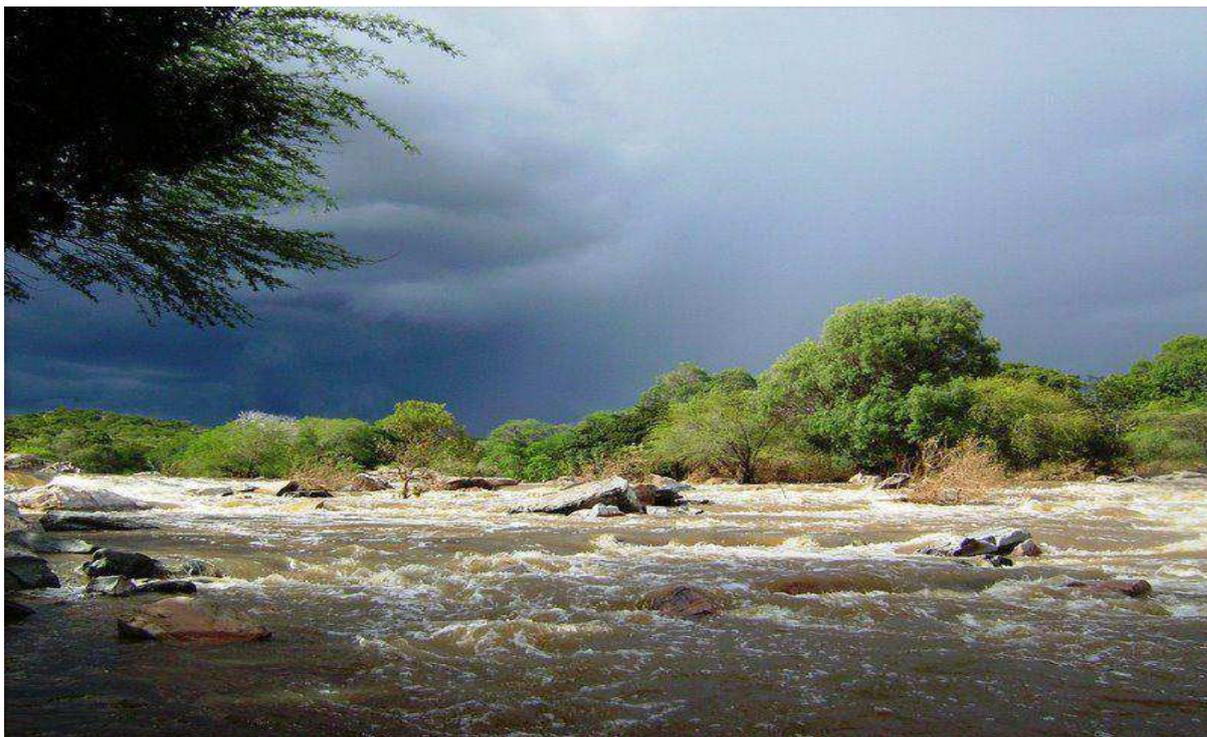
Do ponto de vista climático a região Nordeste do Brasil é considerada semiárida por apresentar substanciais variações temporal e espacial da precipitação pluviométrica, e elevadas temperaturas ao longo do ano. O clima é do tipo BSh, ou seja, semiárido quente, de

acordo com a classificação climática de Koppen. O regime pluviométrico na região do alto curso do Rio Paraíba apresenta precipitações médias anuais que variam entre 350 a 600 mm. Sendo que os totais anuais se concentram em um período de quatro meses, que geralmente, correspondem aos meses de fevereiro, março, abril e maio (AZEVEDO *et al.*, 1998; AESA, 2006; MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Em geral, segundo Uvo & Berndtsson (1996) e Ferreira & Mello (2005), cinco mecanismos governam o regime de chuvas da região: 1) Eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); 2) Temperatura da superfície do mar (TSM) na bacia do oceano Atlântico, Ventos Alísios, Pressão ao Nível do Mar (PNM); 3) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o oceano Atlântico, 4) Frentes Frias, e 5) Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN).

O semiárido está situado próximo ao Equador, com altas temperaturas durante o ano todo, ventos fortes e baixa umidade do ar, que contribuem para alta evaporação potencial. Caso as barragens não sejam suficientemente profundas, certamente estarão vazias em poucos meses após o fim das chuvas (GALVÍNCIO *et al.*, 2006).

A principal característica hidrográfica da região semiárida brasileira é o caráter intermitente de seus rios. Esta característica está diretamente relacionada com a precipitação da região. Os rios e riachos são irregulares, onde o fluxo de água superficial desaparece durante o período de estiagem. A principal característica geomorfológica destes rios é a presença de grandes avenidas e ausência de meandros. Apesar da temporalidade de seus fluxos, as águas chegam a desaguar no oceano Atlântico. Esta característica, além de evitar a salinização excessiva destes ecossistemas, a distingue de outras regiões áridas e semiáridas (MALTCHICK, 1999). Na Fotografia 2.1 observa-se o fluxo do Rio Paraíba, em período chuvoso, no município de Caraúbas – PB.



Fotografia 2.1: Rio Paraíba em época de cheia, durante a curta estação chuvosa. Caraúbas – PB. Março/2011.

A nascente do Rio Paraíba está localizada na Serra de Jabitacá, no município de Monteiro-PB. O padrão de drenagem da bacia hidrográfica é dendrítico, apresenta elevada densidade hidrográfica, sendo esta bem ramificada (MARINHO, 2011). Existem 15 açudes (reservatórios) construídos no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, a saber: Bichinho (Barra de São Miguel), Epitácio Pessoa (Boqueirão), Camalaú (Camalaú), Campos (Caraúbas), Cordeiro (Congo), Pocinhos (Monteiro), Poções (Monteiro), Serrote (Monteiro), São José II (Monteiro), Ouro Velho (Ouro Velho), Prata II (Prata), São Paulo (Prata), Sumé (Sumé), São Domingos (São Domingos do Cariri) e Santo Antônio (São Sebastião do Umbuzeiro) (AESAs, 2006). De acordo com Galvêncio *et al.* (2006), considerando-se que não houve modificação no padrão da precipitação ao longo do tempo, a construção destes reservatórios alterou o escoamento superficial da bacia hidrográfica, ocasionando retardo e diminuição. A vazão média mensal anual está concentrada nos meses de março, abril e maio, correspondendo aproximadamente a uma vazão média de 30,0 m³/s. O Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) tem uma capacidade máxima de armazenamento de 411.686.287 m³, e é responsável pelo abastecimento de vários municípios (Quadro 2.3), inclusive de regiões que não apresentam as deficiências hídricas observadas na área de estudo.

Quadro 2.3: Municípios abastecidos pelo Açude Epitácio Pessoa

Sistema Adutor do Cariri - SAC	Sistema Adutor de Campina Grande - SACG	Sistema Adutor do Brejo - SAB
Boa Vista Boqueirão Cabaceiras Cubati Juazeirinho Pedra Lavrada Olivedos Seridó Soledade São Vicente do Seridó	Barra de Santana Campina Grande Caturité Queimadas Pocinhos	Lagoa Seca São Sebastião de Lagoa de Roça Alagoa Nova Matinhas

Fonte: Meneses (2011).

2.8.1.3. Solos e vegetação

Os solos predominantes no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba são do tipo luvisolos crômicos, argissolos vermelho-Amarelo, neossolos litólicos, vertisolos e afloramentos que cobrem todo o cristalino existente na área (Figura 2.5) e são descritos no Quadro 2.5.

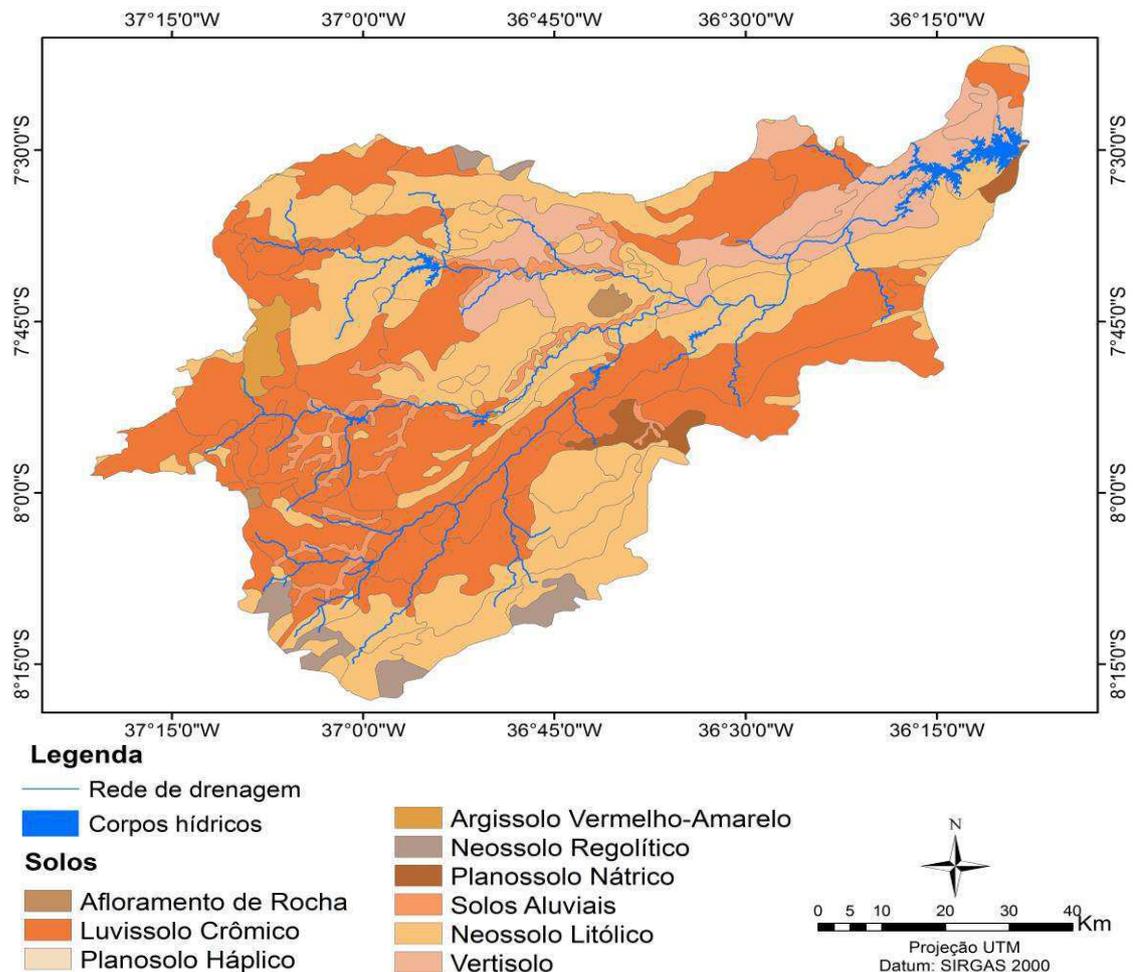


Figura 2.5: Espacialização dos solos no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Fonte: AESA, 2006 (escala 1:100.000).

Quadro 2.4: Características gerais dos principais solos do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Tipo de solos	Características dos Solos
Luvissolos crômicos:	São caracterizados por serem rasos, geralmente argilosos com moderada capacidade de infiltração e de retenção hídrica. Seu material originário advém do saprólito de gnaiss e migmatitos pertencente à época Pré - Cambriana (Rochas Cristalinas); a vegetação predominante é remanescente da floresta subcaducifólia e hiperxerófila seguidas de muitas formações secundárias. São solos geralmente utilizados com culturas de subsistência (milho, feijão e mandioca) e com pecuária extensiva, susceptíveis à erosão hídrica, ricos em nutrientes com exceção do fósforo. Tem horizonte argílico (B textural), com elevada percentagem de saturação de bases, o horizonte A fraco e moderadamente desenvolvido, apresentando mudança textural abrupta do horizonte A para o B. Em condições de clima muito seco pode apenas ser utilizado como pastagem natural de baixa capacidade de suporte.
Argissolos vermelho-amarelo:	São solos geralmente profundos (+ de 150 cm), apresentando um horizonte A de textura muito variável, com horizonte B apresentando textura argilosa de coloração amarela, vermelha ou acinzentada. Podem ainda apresentar, nesta camada, rochas avermelhadas endurecidas chamadas de mosqueados. A transição abrupta dos horizontes com marcante mudança de textura é uma característica dos podzólicos. Tem origem num substrato gnaiss ou granito, nas regiões cristalinas, ocorrendo também em regiões sedimentares; quando são solódicos, os podzólicos podem provocar problemas de salinidade.
Neossolos litólicos:	São solos derivados do saprólito de rochas gnáissicas e graníticas do Pré-Cambriano e em certos locais são comuns os afloramentos de rocha, nos quais predominam a vegetação de floresta caducifólia. Devido às fortes limitações de relevo, pedregosidade e rochiosidade devem ser utilizados com reflorestamento de espécies nativas. São solos pouco desenvolvidos, rasos ou muito rasos, normalmente pedregosos e rochosos. Apresentam um horizonte A frequentemente fraco, repousando diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C em evolução. Acontecem no semiárido normalmente em relevos ondulados a fortemente ondulados ou acidentados, por isto são muito susceptíveis a erosão.

Fonte: Embrapa (2006).

O uso e cobertura do solo no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba são evidenciados na Figura 2.6. Observa-se a presença de solo exposto e vegetação de Caatinga Sub-arbustiva na porção Central da bacia, caracterizando uma área mais antropizada, principalmente nas margens do rio, seja pela prática de agricultura e/ou utilização da vegetação nativa como pastagem para os rebanhos existentes na região. As áreas da porção Sul apresentam uma vegetação de Caatinga Arbórea, caracterizando um uso menos intensivo do solo, devido às altitudes mais elevadas. Observa-se ainda que as áreas próximas ao reservatório Epitácio Pessoa são caracterizadas pela existência de agricultura irrigada e também estão situadas na transição entre as mesorregiões da Borborema (mais seca) e Agreste (mais úmida) do estado da Paraíba. As imagens foram obtidas por sensor acoplado ao Landsat 8, órbita 215, pontos 065-066, em 14/11/2015.

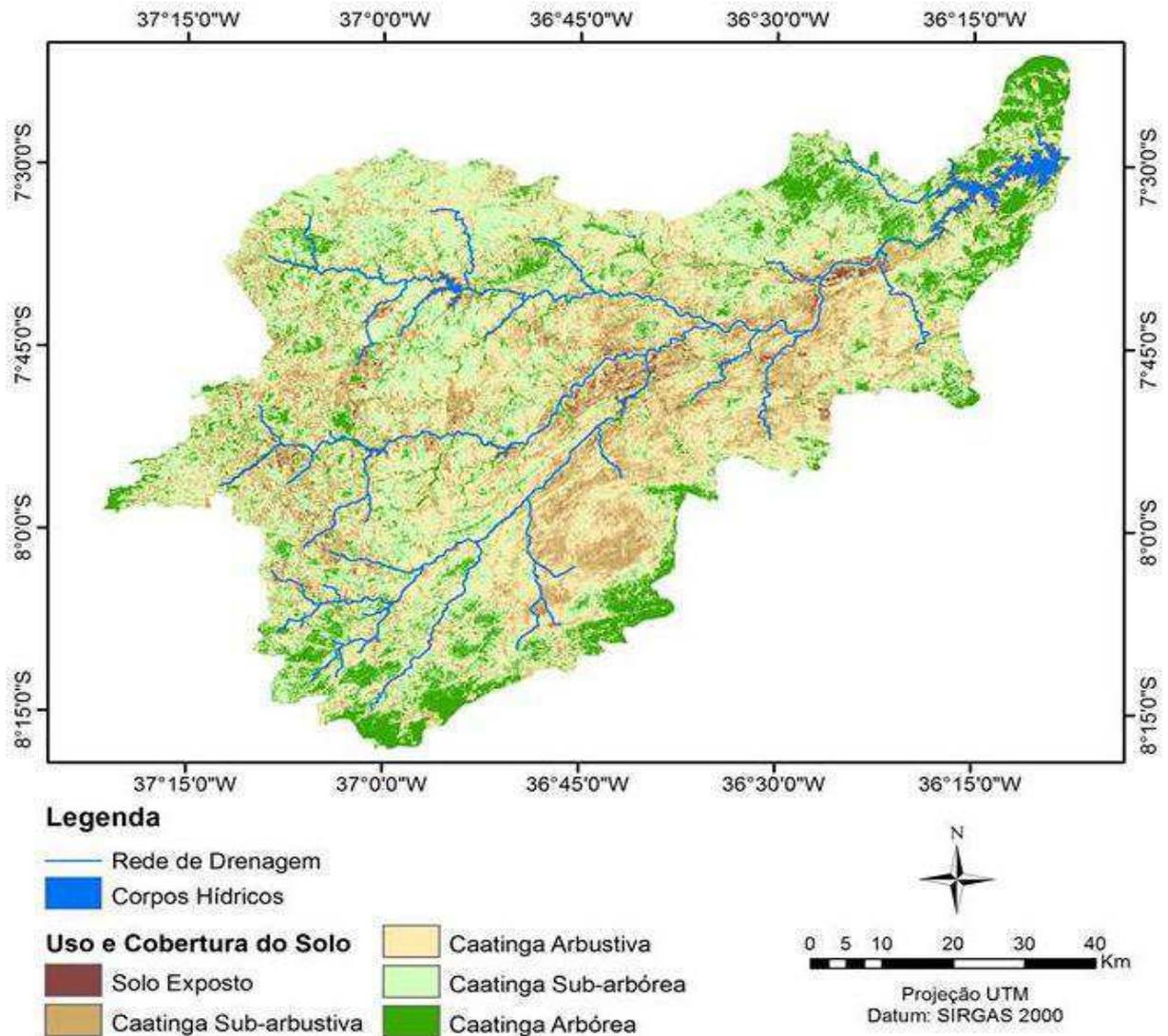


Figura 2.6: Uso e cobertura do solo no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Na Flora são identificadas as cactáceas, recheadas pela água que acumulam, e as bromélias. Os cactos pela sua frequência e pelas formas curiosas destacam-se na paisagem, sendo famosas três espécies: o xique-xique (*Pilosocereus gounellei*), o facheiro (*Pilosocereus glauscens*) e o mandacaru (*Cereus jamacaru* DC). Há ainda espécies como a palmatória de espinhos (*Opuntia palmadora*) e a coroa-de-frade (*Melocactus zehntneri*). Das bromélias, a macambira é a espécie mais difundida. Quando o porte é arbóreo domina na paisagem, as espécies como o angico (*Piptadenia macrocarpa* Benth), a baraúna (*Schinopsis brasiliensis* Engl), a aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão), o umbuzeiro (*Spondias tuberosa*), a quixabeira (*Bumelia sartorum* Mart) e o juazeiro (*Zizyphus joazeiro* Mart), de particular significação para os homens e para os animais, por ser a única árvore que conserva sua copa frondosa durante todo o ano (BERNARDES, 1999). Na Fotografia 2.2 observam-se algumas

características do relevo e das espécies vegetais, em período de estiagem e início do período chuvoso (Fotografia 2.3) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.



Fotografia 2.2: Vegetação desfolhada e solo descoberto na estação seca em área desertificada no município de Caraúbas - PB. Dezembro/2012



Fotografia 2.3: Vegetação recuperando o dossel, apesar das precipitações pluviais limitadas, município de Caraúbas - PB. Abril/2015.

O Domínio morfoclimático da Caatinga é predominante na região, com características hiperxerófilas, floresta caducifólia e sub-caducifólia. Conforme Ab' Saber (2003) são

predominantes nessa região espécies de metabolismo resistentes, hiperxerófitas, com múltiplos espinhos protetores, caducifólias, que perdem suas folhas durante a estação seca, mas quando chegam às primeiras chuvas, tudo reverdece, pois a existência de água na superfície dos solos, em combinação com a forte luminosidade, restaura a funcionalidade da fotossíntese. Estas espécies são adaptadas as condicionantes climáticas que atuam na região. Na área de estudo e no seu entorno estão localizadas algumas unidades de conservação listadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Unidades de conservação localizadas no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Unidade de Conservação	Município	Área (ha)
Área de Proteção Ambiental (APA) das Onças	São João do Tigre	36.000,00
Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Fazenda das Almas	São J. dos Cordeiros	3.505,00
Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Fazenda Santa Clara	São João do Cariri	750,50

A Figura 2.7 apresenta um esquema da vegetação combinada ao tipo de solo e unidade geomorfológica nas áreas semiáridas. Observa-se que, em áreas com degradação das terras (desertificação), há uma predominância das espécies pioneiras ou colonizadoras: jurema, mameleiro e catingueira. Já nas áreas mais elevadas, há uma predominância de espécies mais arbóreas, como o pereiro e o umbuzeiro, espécies típicas de áreas mais preservadas.

Nota-se, contudo, que os algarobais se concentram em solos aluviais, que correspondem na maioria dos casos, a áreas agrícolas que foram abandonadas e rapidamente ocupadas por esta espécie.

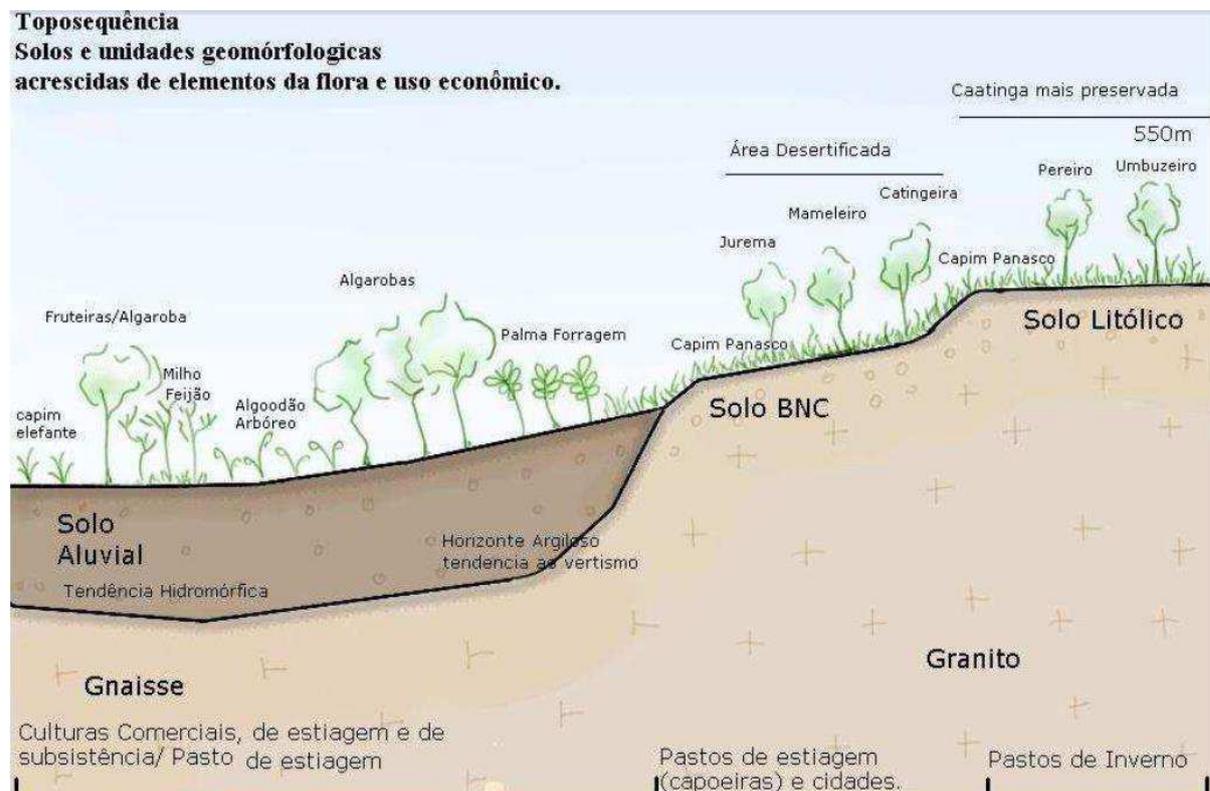


Figura 2.7: Esquema representativo do ambiente semiárido brasileiro.

Fonte: Souza (2008).

2.8.1.4. Aspectos socioeconômicos

Os municípios situados no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba apresentam baixa produtividade agrícola e reduzidas opções de cultivos; limitadas técnicas de conservação do solo, irregularidade na disponibilidade dos recursos hídricos e reduzida área de preservação natural, o que pode causar prejuízos à biodiversidade.

As famílias camponesas praticam uma agricultura de autoconsumo que, no semiárido paraibano, está representada por milho, mandioca e feijão. Essas culturas representam a importante fonte de renda e de alimentação para a comunidade rural. Há um predomínio da pecuária hiper-extensiva (bovinos, caprinos e ovinos) na região e uma exploração comercial, sem manejo sustentável, dos recursos florísticos. Quando as condições climáticas não são favoráveis, ocorrem muitos problemas de ordem social, devido as mais diversas vulnerabilidades as quais a população está submetida, conforme relata Araújo (2010).

É importante ressaltar que, diferentemente de tempos pretéritos, os efeitos sociais das estiagens têm sido amenizados devido a iniciativas do tipo: concessão e ampliação das aposentadorias rurais, ações assistencialistas por parte do governo federal, instalação de tecnologias rurais de captação de água de chuva, com fundos para custeio diversificados, entre outras. Nesse contexto, um paradoxo ganha notoriedade: à medida que a degradação das terras aumenta a qualidade de vida das pessoas também apresenta melhorias.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área de estudo

O presente trabalho foi realizado no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, localizada na parte sudoeste do Planalto da Borborema e limita-se, ao norte com a sub-bacia do Rio Taperoá, ao sul e a oeste com o Estado de Pernambuco e a leste com a região do médio curso do Rio Paraíba (Figura 3.1).

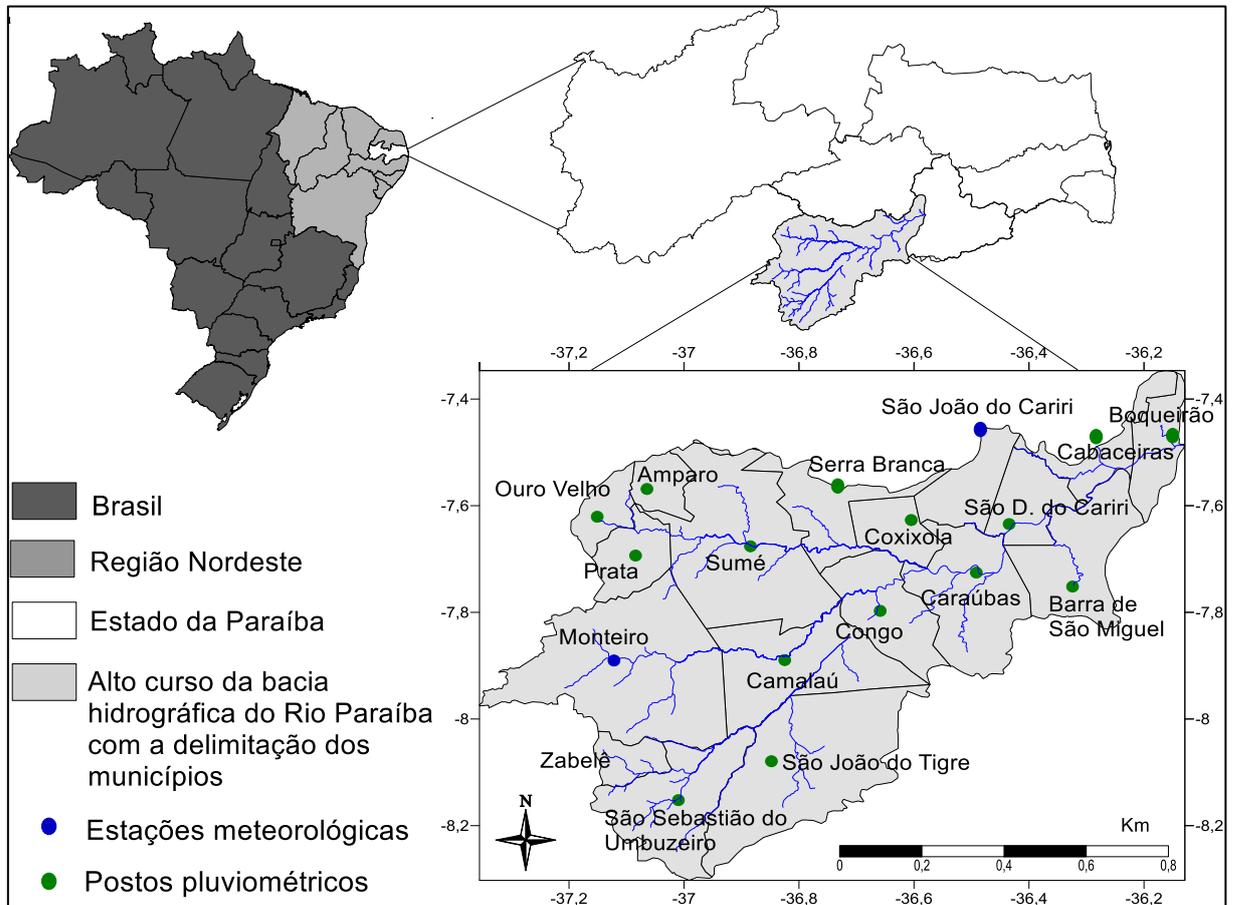


Figura 3.1: Localização do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba e a delimitação dos 18 municípios, Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil.

O alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba tem uma área de aproximadamente 6.727 km², e engloba total ou parcialmente, a área de 18 municípios, distribuídos entre as microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental do Estado da Paraíba (Tabela 3.1):

Tabela 3.1: Características dos municípios que compõem o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Município	Latitude (° ' '')	Longitude (° ' '')	Altitude (m)	Microrregião do Cariri	Inserção da área do município na BH*	Série dos dados de precipitação pluvial
Amparo	-7 56 24	-37 06 41	635	Ocidental	Total	1998-2013
Barra de São Miguel	-7 74 28	-36 30 52	486	Oriental	Total	1963-2013
Boqueirão	-7 47 75	-36 12 74	355	Oriental	Parcial	1961-2013
Cabaceiras	-7 58 01	-36 27 87	388	Oriental	Parcial	1911-2013
Camalaú	-7 88 08	-36 82 26	521	Ocidental	Total	1963-2013
Caraúbas	-7 72 96	-36 48 57	451	Oriental	Total	1931-2013
Congo	-7 78 53	-36 66 08	480	Ocidental	Total	1963-2013
Coxixola	-7 63 14	-36 60 51	475	Ocidental	Total	1963-2013
Monteiro	-7 88 08	-37 12 25	599	Ocidental	Total	1911-2013
Ouro Velho	-7 61 81	-37 15 17	591	Ocidental	Total	1996-2013
Prata	-7 67 91	-37 07 74	577	Ocidental	Total	1963-2013
São D. do Cariri	-7 63 14	-36 42 73	400	Oriental	Total	1998-2013
São João do Cariri	-7 39 26	-36 52 28	458	Oriental	Parcial	1911-2013
São João do Tigre	-8 07 19	-36 84 65	577	Ocidental	Total	1935-2013
São S. do Umbuzeiro	-8 13 82	-37 01 10	594	Ocidental	Total	1963-2013
Serra Branca	-7 48 28	-36 66 34	493	Ocidental	Parcial	1962-2013
Sumé	-7 66 02	-36 87 84	532	Ocidental	Total	1931-2013
Zabelê	-8 04 32	-37 05 54	632	Ocidental	Total	-

*BH – Bacia Hidrográfica

3.2. Abordagem metodológica

A escolha da área de estudo foi feita a partir do conhecimento prévio da região, vislumbrando a possibilidade de realização de um trabalho sistêmico, relacionando sociedade e natureza, com base na importância dessa bacia hidrográfica para o Estado da Paraíba.

A abordagem metodológica adotada foi à holística, que é necessária para compreender como as entidades ambientais físicas e humanas se estruturam e se organizam espacialmente, compondo um Geossistema. O resultado da combinação de um potencial ecológico, uma exploração biológica e uma ação antrópica, não apresentando homogeneidade fisionômica, e sim um complexo essencialmente dinâmico, compõe um Geossistema (CHRISTOFOLETTI, 2004). Com base nesses aspectos foi elaborado o organograma da Figura 3.2 que sistematiza as etapas metodológicas realizadas na execução da pesquisa, por meio de três eixos principais de análise: climatológico, biofísico e socioeconômico.

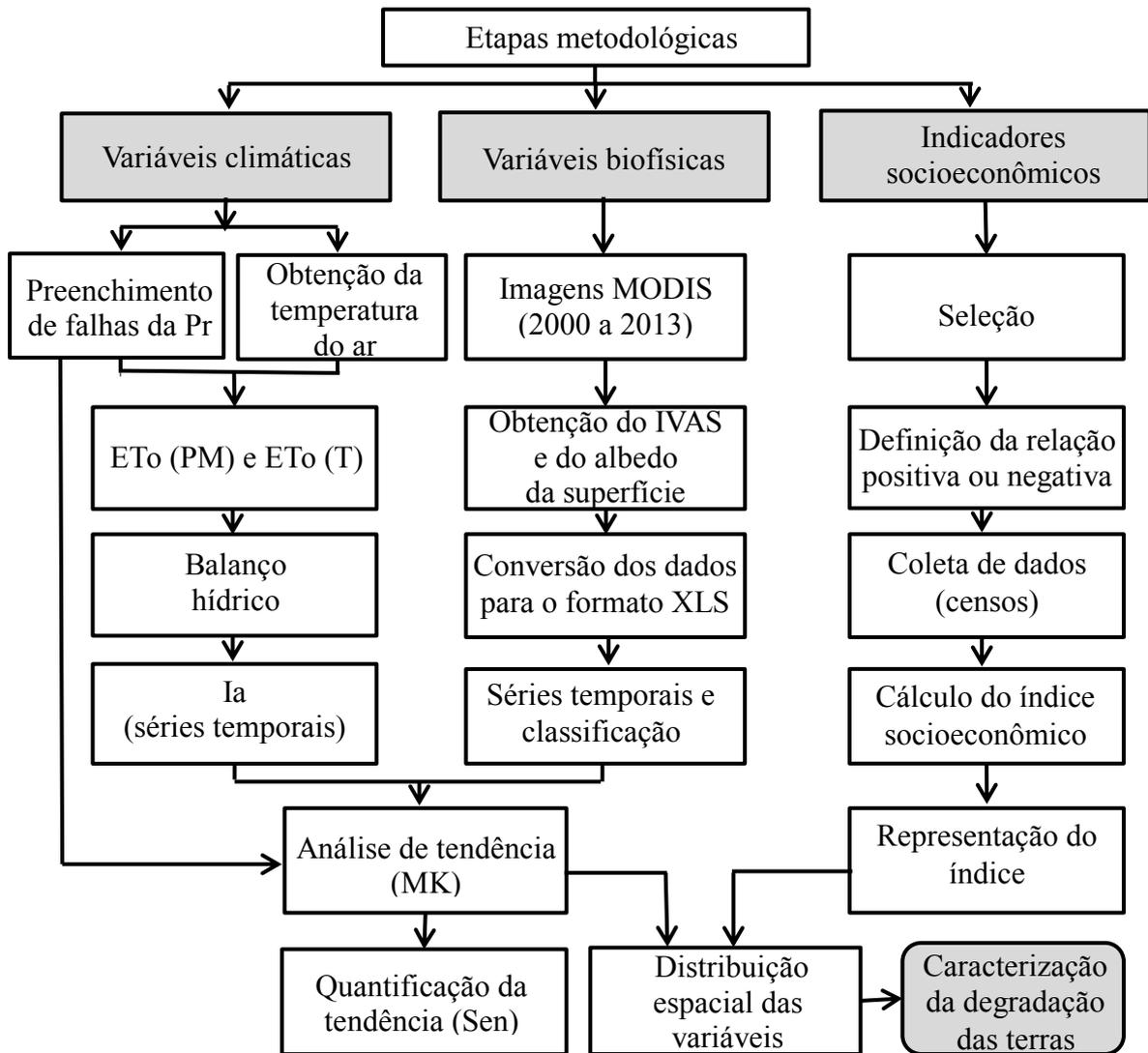


Figura 3.2: Organograma com descrição da metodologia de análise.

(Pr: Precipitação pluvial; MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; ETo: Evapotranspiração de referência; PM: Penman-Monteith; T: Thornthwaite; IVAS: índice de vegetação ajustado ao solo; XLS: formato de arquivo do Excel; Ia: índice de aridez; MK: Mann Kendall).

3.3. Dados utilizados

Foram utilizados os seguintes materiais: dados bibliográficos (internet, livros e publicações em periódicos nacionais e internacionais); imagens obtidas do sensor orbital (MODIS – Terra); suporte computacional (Software R, ERDAS Imagine 8.5; Surfer 8.0; Estima T; ArcGIS 10.3), dados censitários, dados meteorológicos e dados de campo.

3.3.1. Dados orbitais

Foram utilizadas imagens digitais orbitais do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), para obtenção do índice de vegetação e do albedo da superfície, disponíveis em grande quantidade, pois a resolução temporal é diária.

3.3.2. Dados censitários

Para os indicadores socioeconômicos foram utilizados dados municipais dos censos demográficos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE nos anos de: 1970, 1980, 1991 e 2000 e dos censos agropecuários, também realizados pelo IBGE, nos anos de 1970, 1975, 1980, 1985, 1995/1996 e 2006.

3.3.3. Dados meteorológicos

Em função da disponibilidade de dados para cada localidade, foram utilizados valores médios mensais de precipitação pluvial e temperatura do ar de 17 municípios para o período de 1950 - 2013. Na área de estudo, somente as localidades de São João do Cariri e Monteiro dispõem de estação climática, sendo esta última monitorada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para estas localidades foram utilizadas séries temporais de dados de precipitação pluvial, temperatura do ar (máxima, média e mínima), umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar, para o período de 2008-2014. Para as demais localidades, os dados de precipitação pluvial foram coletados na rede de postos pluviométricos e disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs). O município de Zabelê foi excluído da análise climática porque a série de dados é muito pequena e com falhas. O percentual total de dados faltosos de precipitação pluvial foi de 2,4%, variando de 0,0% a 6,5% entre as localidades.

3.3.4. Dados de campo

Os dados de campo (material fotográfico e georreferenciamento de pontos) foram obtidos durante as observações técnicas de campo, com o auxílio de câmera fotográfica e GPS (*Global Positioning System*).

3.4. Preenchimento de falhas

As falhas nas séries de dados de precipitação pluvial foram preenchidas pelo método de ponderação regional, com base nos registros de chuva de, pelo menos, três estações climaticamente homogêneas, localizadas o mais próximo possível da estação que apresenta falha (Oliveira *et al.*, 2010).

Assim, designado por Y a estação que apresenta falha e por A, B e C as estações circunvizinhas, determinou-se a precipitação da estação Y pela média ponderada do registro das três estações circunvizinhas:

$$P_Y = \frac{1}{3} \left(\frac{N_Y}{N_A} P_A + \frac{N_Y}{N_B} P_B + \frac{N_Y}{N_C} P_C \right) \quad (3.1)$$

Em que: P_Y é a precipitação mensal a ser obtida; N_Y a precipitação normal anual da estação com falha, $N_{(A, B e C)}$ a precipitação anual das estações circunvizinhas e $P_{(A, B e C)}$ a precipitação mensal das estações circunvizinhas.

3.5. Modelo de estimativa da temperatura do ar

Quando não disponíveis, os dados de temperatura do ar (máxima, média e mínima), para as localidades estudadas foram estimados pelo modelo de regressão linear múltipla (*Estima T*), desenvolvido por Cavalcanti *et al.* (2006), em função das coordenadas geográficas locais (latitude, longitude e altitude) e das anomalias de temperaturas da superfície do mar - ATSM.

$$T_{ij} = a_0 + a_1\lambda + a_2\phi + a_3h + a_4\lambda^2 + a_5\phi^2 + a_6h^2 + a_7\lambda\phi + a_8\lambda h + a_9\phi h + ATSM_{ij} \quad (3.2)$$

Em que: a_0, \dots, a_9 são os coeficientes de regressão; λ é a longitude; ϕ é a latitude e h a elevação em metros. Os índices i e j indicam, respectivamente, o mês e o ano para o qual se está calculando a temperatura do ar (T_{ij}). Assim, o sinal das anomalias de temperatura da superfície do mar - $ATSM_{ij}$ assume valores positivos e negativos de acordo com o padrão de comportamento da TSM do oceano. As temperaturas médias, máximas e mínimas do nordeste do Brasil são melhores correlacionadas com as ATSM's do Oceano Atlântico Sul.

3.6. Balanço hídrico climatológico

Para estimar os fluxos de entrada e saída de água da superfície para a atmosfera foi utilizada a equação geral simplificada do balanço hídrico climatológico, aplicada aos dados de cada localidade integrante do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba:

$$Pr - ETo = \Delta R \quad (3.3)$$

Em que: Pr é a precipitação pluvial média, em mm; ETo a Evapotranspiração potencial (referência), em mm, estimada pelo método de Thornthwaite (1948); ΔR = variação de armazenamento, em mm.

3.6.1. Estimativa da evapotranspiração potencial (ETo)

Para as localidades com dados de estação climática (Monteiro e São João do Cariri), a evapotranspiração potencial (referência) diária foi obtida pelo método de Penman-Monteith – FAO (Allen *et al.*, 1998) como:

$$ETo(PM) = \frac{0,408\Delta(S_r - G) + \gamma \left(\frac{900U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34U_2)} \quad (3.4)$$

Onde: ETo (PM) é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); S_r o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G a densidade de fluxo de calor do solo (MJ m⁻² dia⁻¹); T a temperatura média diária do ar a 2 m de altura (° C); u₂ a velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹); e_s a pressão de saturação do vapor de água (kPa); e_a a pressão real do vapor de água (kPa); e_s - e_a o déficit de pressão de vapor de saturação (kPa); Δ a curva de pressão de vapor (kPa ° C⁻¹); γ a constante psicométrica (kPa ° C⁻¹). Os valores diários de ETo (PM) foram acumulados para obter os valores mensais.

Para as demais localidades com dados de postos pluviométricos, a evapotranspiração potencial (referência) mensal foi calculada em função da temperatura média do ar e da duração efetiva do dia (insolação máxima teoricamente possível). O método estabelece um índice mensal de calor obtido pela expressão:

$$i_j = \left(\frac{\overline{T_j}}{5} \right)^{1.514} \quad (3.5)$$

Em que i_j e T_j são, respectivamente, o índice térmico e a temperatura média mensal do mês j em °C. O índice térmico anual é dado pelo somatório de i_j (j = 1,2,...,12) ou seja:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (3.6)$$

A evapotranspiração potencial em mm/mês foi obtida pelo método de Thornthwaite, segundo Pereira (2005):

$$ETo(T)_j = 0,533 * F_j \left(\frac{10 * \overline{T_j}}{I} \right)^a \quad (3.7)$$

Em que: ETo (T)_j é a evapotranspiração de referência (mm mês⁻¹) do mês j; F_j é um fator de correção (Anexo 1) que varia com a latitude, dado por:

$$F_j = D_j N_j / 12 \quad (3.8)$$

Em que: D_j é o número de dias do mês j e N_j = 2arc.Cos(-tgφ tgδ)/15 é a duração efetiva do dia 15 do mês j. φ é a latitude local e δ = 23,45° sen [360(284+d)/365], onde d é o número de ordem, no ano do dia considerado. O expoente a da equação 3.7 é uma função cúbica do índice anual de calor, dado por:

$$a = 6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,79 * 10^{-2} * I + 0,49 \quad (3.9)$$

Em que I é o índice térmico anual.

Para as localidades de Monteiro e São João do Cariri, os valores médios mensais da evapotranspiração de referência, obtidos pelo método de Penman-Monteith ET_o (PM), superaram aqueles obtidos pelo método de Thornthwaite ET_o (T) para o período de 2008 a 2014. A relação ET_o (PM)/ ET_o (T) variou mensalmente da seguinte forma: jan = 1,36; fev = 1,41; mar = 1,47; abr = 1,27; mai = 1,17; jun = 1,14; jul = 1,25; ago = 1,38; set = 1,53; out = 1,50; nov = 1,55; dez = 1,34. Estes coeficientes foram utilizados para corrigir a evapotranspiração de referência mensal estimada pelo método de Thornthwaite para as demais localidades.

3.7. Índice de aridez

O índice de aridez foi utilizado como base para a obtenção do grau de susceptibilidade à degradação das terras (desertificação) - Tabela 3.2. Para uma profundidade de armazenamento máximo de água do solo ($ARM = 50$ mm), o índice de aridez (I_a) foi obtido como (Pereira, 2005):

$$I_a = 100 \left(\frac{D_A}{ET_{oA}} \right) \quad (3.10)$$

Onde: D_A é o déficit anual de água (mm) e ET_{oA} a evapotranspiração de referência anual (mm).

Tabela 3.2: Níveis de susceptibilidade à degradação das terras (desertificação), em função do índice de aridez para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Índices de aridez (I_a)	Estado da aridez	Susceptibilidade das terras
$I_a > 0,85$	Hiper árido	Muito alta
$0,61 < I_a \leq 0,85$	Árido	Alta
$0,31 < I_a \leq 0,60$	Semiárido	Moderada
$0,07 \leq I_a \leq 0,30$	Subúmido e seco	Baixa
$I_a < 0,07$	Úmido	Muito baixa

Fonte: Adaptado de Almeida & Marinho (2014).

3.8. Avaliação da tendência

3.8.1. Teste de Mann-Kendall (MK)

O teste de Mann-Kendall é muito utilizado para análises de séries temporais de variáveis climáticas (Back, 2001; Peneneiro & Ferreira, 2011; Croitoru *et al.*, 2012; Tabari *et al.*, 2012, Ahani *et al.*, 2013; Croitoru *et al.*, 2013a; Some'e *et al.*, 2013; Zarch *et al.*, 2015). Além disso, oferece informações sobre a direção e o significado das tendências e testa a hipótese nula de "aleatoriedade" ou "ausência de tendência" e não exige conhecimento prévio da distribuição dos dados. Deste modo foi o mais recomendável para analisar as variáveis do presente estudo.

A presença de uma tendência estatisticamente significativa na série temporal foi avaliada usando o valor da estatística Z para testar a hipótese nula de que não há nenhuma tendência. Os valores positivos de Z indicam tendência crescente enquanto os negativos indicam tendência decrescente. A hipótese do teste de Mann-Kendall é dada por H_0 : não há tendência na série e H_1 : existe tendência na série.

O teste de Mann-Kendall consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes, sempre em ordem sequencial. É contado o número de vezes que os termos restantes são maiores do que o valor analisado. A estatística S é obtida pela soma de todas as contagens, como segue:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sin al}(x_i - x_j) \quad (3.11)$$

Em que o $\text{sin al}(x_i - x_j)$ é obtido da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & -1, \text{ para } x_i - x_j < 0, \\ & 0, \text{ para } x_i - x_j = 0, \\ & 1, \text{ para } x_i - x_j > 0. \end{aligned} \quad (3.12)$$

A estatística S tende a normalidade para n grande, com média e variância definidas como se segue:

$$E[S] = 0, \quad (3.13)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (3.14)$$

Em que: n é o tamanho da série temporal; t_p é o número de ligações para o valor do ponto; p e q são os números de valores iguais. O teste estatístico Z é dado por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0, \\ 0 & \text{se } S = 0, \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0. \end{cases} \quad (3.15)$$

A presença de uma tendência estatisticamente significativa na série temporal foi avaliada usando-se o valor de Z . Essa estatística é usada para testar a hipótese nula de que nenhuma tendência existe na série. O valor positivo de Z indica uma tendência crescente, enquanto que o negativo indica tendência decrescente. Para testar qualquer tendência constante crescente ou decrescente para um nível significativo de α , é rejeitada a hipótese nula se o valor absoluto de Z é maior que $Z_{1-\alpha/2}$, o qual é obtido na tabela da distribuição normal.

Neste trabalho foi aplicado o nível de significância de $\alpha = 0,05$. Assim, se o valor absoluto de Z for maior que 1,96, rejeita-se a hipótese nula ao nível de 5% e as médias são estatisticamente diferentes. Para se compreender melhor o valor do teste é apresentada uma legenda para os valores (Tabela 3.3). Um resultado positivo da estatística Z , maior do que 1,96 indica uma tendência significativa de acréscimo (Tsa), menor que 1,96 a tendência é não significativa de acréscimo (Tnsa), enquanto um valor negativo de Z , menor do que -1,96 indica uma tendência significativa de decréscimo (Tsd) e um valor maior que -1,96 indica tendência não significativa de decréscimo (Tnsd). Se o Z for 0 não existe tendência na série.

Tabela 3.3: Descrição da legenda correspondente à significância da estatística Z do teste Mann-Kendall

Significância	Legenda	Z
Sem tendência	St	0
Tendência significativa de acréscimo	Tsa	$> + 1,96$
Tendência significativa de decréscimo	Tsd	$< - 1,96$
Tendência não significativa de acréscimo	Tnsa	$< + 1,96$
Tendência não significativa de decréscimo	Tnsd	$> - 1,96$

3.8.2. Método de Sen

O método de Sen estima o valor e intervalo de confiança das tendências de inclinação (Q) e foi utilizado para obtenção da inclinação nas séries temporais, como a variação na medição devido à variação de tempo (Croitoru *et al.*, 2013b; Tabari *et al.*, 2012; Some'e *et al.*, 2013) como:

$$Q = \frac{x_{i'} - x_i}{i' - i} \quad (3.16)$$

Em que: Q = inclinação entre pontos de dados $x_{i'}$ e x_i ; $x_{i'}$ = medição de dados em tempo i' ; x_i = medição de dados em tempo i ; i' = tempo após o tempo i . O detalhamento pode ser observado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Manipulação de dados para o método de Sen, com uma medição de dados por séries temporais.

Tempo	1	2	3	...	5	T
Dados	X_1	X_1	X_1		X_1	X_T
0	—	$(X_2 - X_1)/(2-1)$	$(X_3 - X_1)/(3-1)$ $(X_3 - X_2)/(3-2)$		$(X_{T-1} - X_1)/(T-2)$ $(X_{T-1} - X_2)/(T-3)$. . . $(X_{T-1} - X_{T-2})/1$	$(X_T - X_1)/(T-1)$ $(X_T - X_2)/(T-2)$ $(X_T - X_3)/(T-3)$. . . $(X_T - X_{T-2})/2$ $(X_T - X_{T-1})/1$

Se várias medições de dados são coletadas em um determinado momento, existem duas opções para várias medições gravadas num determinado intervalo de tempo. A primeira

opção é simplesmente combinar as medições para um dado intervalo de tempo para uma única medição da tendência central (por exemplo, média, mediana), e proceder conforme Tabela 3.4. A segunda opção é para calcular a inclinação de cada medição individual (Tabela 3.5). Note-se que a inclinação entre as medições recolhidas ao mesmo tempo, não é calculada.

Tabela 3.5: Manipulação de dados para o método Sen com várias medições de dados por séries temporais.

Tempo Dados	1 $X_{1,1}$	1 $X_{1,1}$	2 $X_{2,1}$	2 $X_{2,2}$	2 $X_{2,3}$	3 $X_{3,1}$...	T $X_{T,j-1}$
	—	NC	$(X_{2,1}-X_{1,1})/(2-1)$ $(X_{2,1}-X_{1,2})/(2-1)$	$(X_{2,2}-X_{1,1})/(2-1)$ $(X_{2,2}-X_{1,2})/(2-1)$ NC	$(X_{2,3}-X_{1,1})/(2-1)$ $(X_{2,3}-X_{1,2})/(2-1)$ NC NC	$(X_{3,1}-X_{1,1})/(3-1)$ $(X_{3,1}-X_{1,2})/(3-1)$ $(X_{3,1}-X_{2,1})/(3-2)$ $(X_{3,1}-X_{2,2})/(3-2)$ $(X_{3,1}-X_{2,3})/(3-2)$		$(X_{T,j}-X_{1,1})/(T-1)$ $(X_{T,j}-X_{1,2})/(T-1)$. . $(X_{T,j}-X_{T-1,j-1})/1$ NC . NC

Depois de calcular o declive da tendência, um estimador foi obtido pela inclinação mediana (Q'), dado por:

$$Q' = Q[(N'+1)/2], \text{ se } N' \text{ é ímpar e,}$$

$$Q' = [Q(N'/2) + Q((N'+2)/2)]/2, \text{ se } N' \text{ é par} \quad (3.17)$$

Onde: N' é o número de inclinações calculadas.

Para a análise do intervalo de confiança da inclinação mediana, primeiro determinou-se o $Z_{\text{crítico}}$ para um teste de distribuição normal de duas caudas. Por exemplo, sendo o intervalo de confiança 95% desejado, é obtido o $Z(1-0,05/2) = Z_{0,475} = 1,96$. Em seguida, estima-se o desvio da estatística (variância) de Mann-Kendall VAR (S).

O intervalo de confiança específico (C_α) foi determinado como:

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} * \sqrt{\text{VAR}(S)} \quad (3.18)$$

Enquanto os limites de confiança inferior (M_1) e superior (M_2) foram obtidos como:

$$M_1 = \frac{N' - C_\alpha}{2} \text{ e } M_2 = \frac{N' + C_\alpha}{2} \quad (3.19)$$

3.9. Imagens orbitais

As imagens MODIS foram obtidas gratuitamente no portal da National Aeronautics and Space Administration – NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Devido à oferta de um produto melhorado a cada oito dias, optou-se pelo produto MOD09A1, considerado mais adequado para o monitoramento dos parâmetros estudados. Este produto é oriundo da reflectância da superfície, disponível no MODLAND para o continente sul-americano.

As imagens MODIS foram obtidas originalmente na projeção *integerized sinusoidal* e no formato *hierarchical data format* (HDF), sendo convertidos para o sistema de coordenadas

geográficas, projeção WGS, e formato IMG através do ERDAS Imagine 8.5. Além disso, todas as rotinas computacionais necessárias à geração do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e do albedo da superfície foram executadas no módulo *Model Maker* deste programa. A área de estudo está inserida no tile v9_h14. Foi analisado um dia juliano de cada mês, selecionado devido à ausência de nuvens e por representar sequencialmente os meses da série temporal 2000-2013. As informações espectrais foram obtidas para cada município, através da delimitação dos mesmos, em formato .aoi.

A Tabela 3.6 descreve o produto MODIS utilizado e o fator de correção multiplicativo que é empregado para converter os valores originais em dados de refletância (adimensional):

Tabela 3.6: Descrição do produto MODIS utilizado.

Produto	Descrição	Fator multiplicativo	Resolução espacial e temporal	Unidades
MOD09A1	Refletância da superfície	0,0001	500m diária/composição de 8 dias	Adimensional

Fonte: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

3.9.1. Índice de vegetação

O índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS), o qual varia de -1 a +1, sendo positivo para superfícies com alguma vegetação e negativo para superfícies livres de água (espelhos de água), foi obtido como (PONZONI *et al.*, 2012):

$$IVAS = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)(1 + L)}{(\rho_{IVP} + \rho_V + L)} \quad (3.20)$$

Em que: ρ_{IVP} é a refletância medida na banda espectral do infravermelho próximo (0,725 - 1,00 μm) e ρ_V a refletância medida na banda espectral do visível (vermelho) (0,625 - 0,725 μm) e L é a constante que minimiza o efeito do solo e pode variar de 0 a 1. Para baixa, média e alta densidade de vegetação, recomendam-se os fatores $L = 1$, $L = 0,5$ e $L = 0,25$, respectivamente. Neste estudo foi utilizado o valor 0,5, conforme recomendado em outros estudos (ACCIOLY *et al.*, 2002; BRINKMANN *et al.*, 2011; PONZONI *et al.*, 2012). O uso do IVAS permitiu comparar a cobertura vegetal atual com a anterior, em uma análise de evolução temporal, considerando-se as características específicas da sazonalidade na área de estudo.

3.9.2. Albedo da superfície

O albedo da superfície (α_S) foi determinado como Tasumi *et al.* (2008):

$$\alpha_S = \sum_{b=1}^n [\rho_{s,b} w_b] \quad (3.21)$$

Em que os pesos w_b são os coeficientes de ponderação que representam a fração da radiação solar que ocorre no intervalo espectral das bandas específicas, constantes na Tabela 3.7; n é o

número de bandas correspondente e $\rho_{s,b}$ é a refletância espectral de cada banda à superfície, obtida do produto MOD09A1.

Tabela 3.7: Coeficientes de ponderação (w_b) da equação (3.18), para uso em imagens MODIS.

Coeficiente	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
w_b	0,215	0,215	0,242	0,129	0,101	0,062	0,036

A escolha pelo método proposto por Tasumi *et al.* (2008) deve-se a duas razões: ter sido calibrado e aplicado na região de Idaho – USA, área de risco moderado ao processo de desertificação e por ser uma metodologia mais recente.

3.10. Observações técnicas de campo

As características da vegetação bem como o uso e ocupação do solo foram investigados por meio de visitas técnicas ao campo, para seleção e georreferenciamento de pontos controle do ambiente estudado. Este procedimento orientou a análise das imagens orbitais. Tais visitas foram realizadas em:

- Junho e setembro de 2012: foram visitadas áreas nos municípios de Caraúbas, Congo, São Domingos do Cariri, Sumé, Camalaú e Monteiro.
- Dezembro de 2014: trabalho de campo realizado em todos os municípios, com o reconhecimento de aspectos da vegetação e georreferenciamento de áreas em processo de degradação das terras (desertificação).

3.11. Caracterização da vegetação

Vários parâmetros estatísticos foram utilizados para analisar os padrões espaciais e temporais da heterogeneidade da vegetação e do albedo na superfície da área de estudo. As análises foram realizadas temporalmente, obtendo-se o valor mínimo, médio, máximo e o coeficiente de variação (CV) dos valores mensais de IVAS obtidos durante o período (2000-2013). Foram traçadas curvas temporais estatísticas ao longo dos 12 meses para capturar respostas do ecossistema e da paisagem as grandes variações (eventos chuvosos, secas extremas, etc..) (KOGAN, 2000).

O sistema de classificação dos tipos de Caatinga utilizado foi o de Andrade – Lima (1981), o qual ecologicamente estabelece as seguintes categorizações (Quadro 3.1):

Quadro 3.1: Tipos de Caatinga.

Unidade	Tipo de vegetação	Fisionomia e localidade	Substrato
I Floresta de caatinga alta	<i>Tabebuia-Anadenanthera-Myracrodruon-Cavanillesia-Schinopsis</i>	Floresta de caatinga alta; Norte de Minas Gerais & Centro-sul da Bahia	Pedras calcárias do Bambuí ou rochas cristalinas do Pré-Cambriano
II Floresta de caatinga média	<i>Myracrodruon-Schinopsis-Caesalpinia</i>	Floresta de caatinga média; maior parte do centro da província	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
	<i>Caesalpinia-Spondias-Commiphora-Aspidosperma</i>	Floresta de caatinga média; área mais seca que a anterior	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
	<i>Mimosa-Syagrus-Spondias-Cereus</i>	Floresta de caatinga baixa; Centronorte da Bahia	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
	<i>Cnidocolus-CommiphoraCaesalpinia</i>	Caatinga arbórea aberta; Sudoeste do Ceará e áreas secas médias com solos soltos e ácidos	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
	<i>Auxemma-MimosaLuetzelburgia-Thiloa</i>	Floresta de caatinga média; oeste do Rio Grande do Norte & Ceará central	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
III Floresta de caatinga baixa	<i>Pilosocereus-PoeppigiaDalbergia-Piptadenia</i>	Floresta de caatinga baixa; solos arenosos da série do Cipó	Arenitos das séries do Cipó
IV Caatinga arbustiva densa ou aberta	<i>Caesalpinia-AspidospermaJatropha</i>	Caatinga arbustiva; áreas mais secas do vale do rio São Francisco	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
	<i>Caesalpinia-Aspidosperma</i>	Caatinga arbustiva aberta; Cariris Velhos, Paraíba	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
	<i>Mimosa-Caesalpinia-Aristida</i>	Caatinga arbustiva aberta; Rio Grande do Norte & Paraíba (seridó)	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
	<i>Aspidosperma-Pilosocereus</i>	Caatinga arbustiva aberta; Cabaceiras, Paraíba	Principalmente rochas cristalinas do Pré-Cambriano
V Caatinga arbustiva aberta baixa	<i>Calliandra-Pilosocereus</i>	Caatinga arbustiva aberta; pequenas áreas restritas e espalhadas com solos ricos em cascalhos	Principalmente rochas metamórficas do Pré-Cambriano
VI Floresta ciliar / Floresta de caatinga de galeria	<i>Copernicia-Geoffroea-Licania</i>	Floresta de caatinga de galeria; vales dos rios do Ceará, Piauí & Rio Grande do Norte	Principalmente solos aluviais

O trabalho de Alves (2009) apresenta uma classificação da vegetação (Quadro 3.2) realizada para as microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental e que também foi observada na

realização dos trabalhos de campo:

Quadro 3.2: Comunidades-Tipos da Caatinga do Cariri paraibano

Tipo de Caatinga	Altura Média (m)	Comunidade-Tipo
Caatinga arbórea alta	> 15	<i>Tabebuia-Aspidosperma-Astronium-Cavanillesia</i>
Caatinga arbórea média	7 > 15	<i>Astronium-Schinopsis-Caesalpinia</i>
Caatinga arbórea Média ou baixa Densa e/ou aberta	7 > 15	<i>Caesalpinia-Bursera-Spondias-Aspidosperma</i>
Caatinga arbustiva	5 > 7	<i>Pilocereus-Poepiggia-Dalbergia-Piptadenia</i>
Caatinga arbustiva Alta	5 > 7	<i>Cnidosculus-Bursera-Caesalpinia</i>
Caatinga arbustiva Média	1 > 3	<i>Caesalpinia-Aspidosperma-Jatropha</i>
Caatinga arbustiva Baixa	1 > 3	<i>Caesalpinia-Aspidosperma</i>
Caatinga arbustiva Baixa ou alta	1 > 3	<i>Mimosa-Caesalpinia-Aristid</i>
Caatinga arbustiva Aberta baixa	1 > 3	<i>Aspidosperma-Pilocereus</i>
Caatinga arbustiva Aberta baixa	0,30 > 0,70 0,50 > 1,0	<i>Calliandra-Pilocereus</i>
Florestas ripárias	> 3	<i>Copernicia-Geoffrea-Licania/ Licania-Tabebuia-Bumelia</i>

Adaptado de Alves (2009).

3.12. Geoprocessamento

Sistemas de informações geográficas (SIGs) foram utilizados para a modelagem espacial dos valores médios de precipitação, índice de aridez, índice de vegetação, albedo da superfície e estatísticas Mann-Kendall (MK), cujo método de interpolação utilizado foi o de krigagem geoestatística. O método é baseado em modelos estatísticos utilizando a auto-correlação, a fim de explicar a variação espacial. Este procedimento foi utilizado para calcular o valor das variáveis em um determinado ponto, levando em consideração os valores de estações vizinhas a partir de um modelo de variograma para a variável considerada. Krigagem ordinária foi usada, e pesos baseados no arranjo espacial geral de pontos medidos (Croitoru *et al.*, 2013a; Hrnjak *et al.*, 2013; Yamamoto & Landim, 2013).

3.13. Indicadores socioeconômicos do processo de degradação das terras (desertificação)

Os indicadores socioeconômicos foram selecionados com base em três critérios:

- disponibilidade de dados para a unidade política de análise (município);
- melhor caracterização do processo de degradação das terras/desertificação;
- recorrência na literatura específica.

Foram utilizados os seguintes indicadores, pressupostos e parâmetros de análise:

- 1 - Densidade demográfica (Dd) - mais pessoas, maior pressão/degradação das terras - (habitante/km²);
- 2 - Produto interno bruto (PIB) - áreas mais degradadas, menor desenvolvimento econômico para a população - (PIB/município);

- 3 - Índice de desenvolvimento humano (IDH) - menor IDH, áreas mais degradadas - (ordem dos municípios);
- 4 - Taxa de analfabetismo (Ta) – menor escolaridade, maior degradação das terras - (Ta/município);
- 5 - Uso do solo agrícola (Usa) – maior área cultivada, maior risco de degradação das terras - (Usa no município);
- 6 - Pecuária (Pa) – quanto mais intensa, maior degradação das terras - (animais/município);
- 7 - Estrutura fundiária (Ef) - maior número de pequenas propriedades, mais degradação das terras - (número de pequenas propriedades rurais/município);
- 8 - Extrativismo vegetal (Ev) – maior extração vegetal, maior degradação das terras - (m³ de lenha/município).

Para os indicadores: densidade demográfica (hab/km²), PIB (valores equivalentes a mil reais no ano 2000), índice de desenvolvimento humano e taxa de analfabetismo (%) foram utilizados dados municipais dos censos demográficos realizados pelo IBGE nos anos de: 1970, 1980, 1991 e 2000 (IBGE, 2014a). Somente os dados de PIB foram obtidos também para todos os anos dos censos agropecuários. Para os indicadores: Usa, Pa, Ev e Ef foram utilizadas informações extraídas dos censos agropecuários, também realizados pelo IBGE, nos anos de 1970, 1975, 1980, 1985, 1995/1996 e 2006 (IBGE, 2014b). Para o indicador (Usa), utilizou-se a soma de hectares referentes às lavouras permanentes, temporárias, pastagens plantadas e matas/florestas plantadas; Pa, o quantitativo dos rebanhos bovino, ovino e caprino; Ev, extração de lenha (m³) e Ef, a quantidade de pequenas propriedades, inferiores a 20 hectares.

3.13.1 Relação positiva e negativa dos indicadores

Como as variáveis apresentam diferentes unidades de medida, tomou-se como base a proposta metodológica desenvolvida pelo Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura - IICA (Sepúlveda, 2008), que transforma os valores dos indicadores em índices, com valor mínimo 0 e máximo 1. Para este procedimento foram definidos os seguintes tipos de relação: positiva para os indicadores PIB e IDH e negativa para os demais indicadores.

Assim, considerou-se uma relação positiva quando um aumento no valor do indicador resulta em melhoria do sistema ou situação; em contrapartida, a relação foi considerada negativa se um aumento no valor do indicador resulta em piora do sistema, no caso desse estudo, acentuação da degradação das terras.

3.13.2. Cálculo do índice socioeconômico

Após identificar a relação positiva ou negativa do indicador com o processo de degradação das terras (desertificação), o índice socioeconômico de cada indicador (Ise_i) foi calculado como:

a) quando a relação é positiva:

$$Ise_i = (X - X_m) / (X_x - X_m) \quad (3.22)$$

b) quando a relação é negativa:

$$Ise_i = (X_x - X) / (X_x - X_m) \quad (3.23)$$

Onde: X é o valor de cada indicador; X_m e X_x são os valores mínimo e máximo, respectivamente. Os valores mínimo e máximo de cada indicador foram definidos a nível estadual e, quando não disponíveis, utilizou-se o valor máximo do grupo de municípios em análise, mas sempre considerando um parâmetro de referência.

Para os indicadores Dd, PIB e Ta foram utilizados os valores máximos e mínimos para o Estado da Paraíba, o IDH já é um indicador que varia de 0 a 1, igualmente ao índice socioeconômico. Para o indicador (Usa) foi utilizado como parâmetro a recomendação do Código Florestal Brasileiro, que prevê a utilização de, no máximo, 80% das terras nas propriedades rurais, sendo os 20% restantes destinados a Reserva Legal, utilizando essa recomendação em nível municipal. O indicador Pa foi analisado considerando-se o estabelecimento de limites recomendados para criação de caprinos/ovinos - 8 cabeças/12 hectares e bovinos - 1 cabeça/12 hectares (Souza *et al.*, 2010). As propriedades menores que 20 hectares foram contabilizadas para cada ano da série dos censos agropecuários e a Ev, considerando-se o estabelecido por Sampaio *et al.* (2008), o qual determina que em corte raso, ou seja, cortando toda a vegetação e deixando tocos pouco acima do solo, 1 hectare fornece 30 m³ de lenha.

Após a transformação dos indicadores em índices, foi calculado o índice socioeconômico geral para cada município (Ise_m) como:

$$Ise_m = \sum Ise_i / n \quad (3.24)$$

Onde: n é o número de indicadores analisados. O índice socioeconômico para todo o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba (Ise_b) foi então obtido como:

$$Ise_b = \sum Ise_m / N \quad (3.25)$$

Onde: N é o número de municípios analisados.

3.13.3. Representação do índice socioeconômico

Com a obtenção do índice socioeconômico referente a cada indicador, foram utilizadas as seguintes situações: Crítica, Acentuada, Moderada, Baixa, Muito baixa e Sem degradação e cores representativas, caracterizando os níveis de degradação das terras para cada localidade, da situação mais crítica à situação ideal, ou seja, sem degradação, conforme observado na Tabela 3.8:

Tabela 3.8: Classificação e representação do índice socioeconômico e a situação dos municípios em relação à degradação das terras.

Índice (0-1)	Situação
0,00-0,19	Crítica
0,20-0,39	Acentuada
0,40-0,59	Moderada
0,60-0,79	Baixa
0,80-0,99	Muito baixa
1,00	Sem degradação

Adaptado de Macêdo & Candido (2011).

As situações estabelecidas estão relacionadas aos indicadores utilizados. Níveis diferenciados de degradação das terras (desertificação) podem ser encontrados com outras propostas metodológicas.

3.14. Mitigação do processo de degradação das terras

Com base na bibliografia específica e na legislação disponível foi estabelecido um conjunto ordenado de procedimentos para análise crítica do material bibliográfico, visando relacionar e sugerir algumas medidas de mitigação do processo de degradação das terras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Evapotranspiração de referência (ET_o)

Os resultados da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), componente essencial para obtenção do índice de aridez, são apresentados na Tabela 4.1. A comparação entre a ET_o estimada pelo método de Penman-Monteith (PM) e pelo método de Thornthwaite (T) indica, em termos anuais, que a ET_o (PM) anual sobrestima aquela obtida pelo método de Thornthwaite (T) em 37%. Essa sobrestimativa é menor no período de maio e junho (17 e 14%) e maior nos meses de setembro e novembro (53 e 55%).

Tabela 4.1: Valores mensais e anuais da evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelo método de Thornthwaite – ET_o (T) e Penman-Monteith (FAO-56) – ET_o (PM) para as localidades de Monteiro – PB e São João do Cariri - PB.

Meses	ET _o (T)	ET _o (PM)	ET _o (PM)/ET _o (T)
Janeiro	123,2	167,0	1,36
Fevereiro	101,9	143,0	1,40
Março	106,6	156,3	1,47
Abril	99,5	126,1	1,27
Maio	92,3	108,3	1,17
Junho	79,1	90,1	1,14
Julho	77,6	96,7	1,25
Agosto	84,4	115,9	1,37
Setembro	96,9	148,1	1,53
Outubro	115,9	174,2	1,50
Novembro	120,8	186,7	1,55
Dezembro	127,5	170,8	1,34
Anual	1225,7	1683,2	1,37*

(*) valor médio

Estudo realizado por Borges & Mendiondo (2007) sobre comparação de equações empíricas para estimativa da ET_o na bacia hidrográfica do Rio Jacupiranga - SP também evidenciou que o método de Thornthwaite subestima os valores quando comparados aqueles obtidos pelo método de Penman-Monteith. Na Austrália, valores médios anuais de ET_o obtidos pelo método de Thornthwaite foram subestimados em 30% quando comparados aos valores obtidos com Penman-Monteith (Schrier *et al.*, 2011).

Em relação ao índice de aridez, observou-se que para a série analisada (1950 – 2013), o índice de aridez médio estimado pela ET_o método de Penman-Monteith - Ia (PM) foi 15% superior àquele estimado pelo método de Thornthwaite – Ia (T) – Tabela 4.2. A mínima diferença entre os métodos (4%) ocorreu em 1953 (ano muito seco – Pr_{anual} = 142,1 mm) enquanto que a máxima diferença (26%) ocorreu em 1974 (ano muito chuvoso – Pr_{anual} = 1.083,1 mm). As séries temporais do índice de aridez (Ia), obtidas com dados de ET_o variaram

em magnitude, porém o comportamento das tendências foi muito semelhante utilizando-se qualquer um dos métodos. Observa-se que o incremento do Ia (PM) é praticamente a metade (15%), em termos percentuais, do incremento observado na ETo (37%). Isso ocorre porque o Ia é um produto anual, resultado da razão entre os valores anuais do déficit de água (D_A) e de ETo_A , uma vez que o D_A é obtido pela subtração dos valores de ETo_A e de evapotranspiração real (ETr), causando uma suavização dos valores.

Tabela 4.2: Valores médios, mínimos e máximos do índice de aridez (Ia) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período de 1950 a 2013.

Ano	Pr (mm)	Parâmetro	Ia (T)	Ia (PM)	Ia (PM)/Ia (T)
Série	599,0	Médio	58,2	66,9	1,15
1953	142,1	Máximo	88,1	91,3	1,04
1974	1.083,1	Mínimo	36,6	46,2	1,26

4.2. Distribuição espacial das variáveis climáticas e biofísicas

A distribuição espacial das variáveis climáticas: precipitação pluvial e índice de aridez Figura 4.1 (A e B), respectivamente, mostra que os valores mínimos de precipitação coincidem com os valores máximos do índice aridez. Os valores máximos de precipitação pluvial são observados na porção noroeste da bacia, região mais elevada (600-700m), onde se localiza a nascente do Rio Paraíba (município de Monteiro). As porções nordeste e sudeste da bacia têm os valores de precipitação mais baixos, cujo núcleo mais forte está localizado no município de Cabaceiras. Este município está a sotavento do Planalto da Borborema, o que ajuda a explicar a ocorrência dos valores mínimos de precipitação pluvial (Figura 4.1A). Hnrjak *et al.* (2013) e Croitoru (2013a) também identificaram o efeito orográfico na distribuição das chuvas e, conseqüentemente, no índice de aridez. Assim, existe uma variação na precipitação aumentando entre um mínimo (320 mm) em Cabaceiras para um máximo (680 mm) nos municípios de Prata e Ouro Velho. Nascimento & Alves (2008) concluíram que as localidades da microrregião do Cariri Oriental são mais secas e mais sensíveis às variações sazonais da precipitação, corroborando com o presente estudo.

O setor leste da bacia hidrográfica tem elevada aridez, ao contrário do setor oeste, mais chuvoso, com valores mínimos de aridez. No entanto, toda a bacia hidrográfica está na faixa considerada árida ($61 < Ia \leq 85$), com alta suscetibilidade a degradação das terras (desertificação) - Figura 4.1B. As áreas com aridez mais acentuada correspondem às localidades de Cabaceiras, Caraúbas e São João do Cariri.

Em relação à distribuição espacial das variáveis biofísicas (albedo da superfície e índice de vegetação) observa-se que os valores médios do IVAS decrescem de leste para oeste (Figura 4.1 C). Os municípios de Congo e Camalaú apresentam os menores índices, o que

pode está relacionado ao uso inadequado do solo, elevado quantitativo de rebanhos, extração vegetal, dentre outros elementos que acentuam o processo de degradação das terras. O município de Congo, por exemplo, tem uma área de 43.347 hectares e em 2011 apresentou 3.200 bovinos, 6.840 caprinos e 6.500 ovinos, além de uma exploração de 6.357 m³ de lenha no ano de 2013 (IBGE, 2014). Em relação ao albedo da superfície (Figura 4.1D), o núcleo com valores mais elevados coincide com as áreas de ocorrência de menor IVAS. A combinação dessas duas variáveis pode indicar que há nessa área um processo mais intenso de degradação das terras, com áreas de solo exposto, identificadas através de imagens orbitais e que foram visualizadas em trabalho de campo. O albedo diminui no sentido sudoeste da bacia, com valores mínimos em São Sebastião do Umbuzeiro.

De acordo com o PAE-PB (2011) cerca de 60% e 71% das áreas das microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental, respectivamente, estão com alto nível de desertificação. Destaca-se os municípios de Caraúbas, Gurjão, Santo André, Barra de São Miguel, São José dos Cordeiros, Taperoá, Parari, Serra Branca, Coxixola, Congo, Camalaú e São João do Tigre como os municípios mais degradados. Nessas microrregiões ocorrem os menores valores de precipitação pluvial, proporcionando, assim, maior vulnerabilidade ao uso mais intenso das terras, seja para agricultura ou pecuária. Quando analisado sazonalmente, o IVAS varia de acordo com o período seco e chuvoso para a região. Essa constatação também foi demonstrada por Bezerra *et al.* (2014) ao identificar, em região semiárida do Rio Grande do Norte, valores de IVDN entre 0,20 e 0,30 no período seco e 0,60 a 0,80 no período chuvoso.

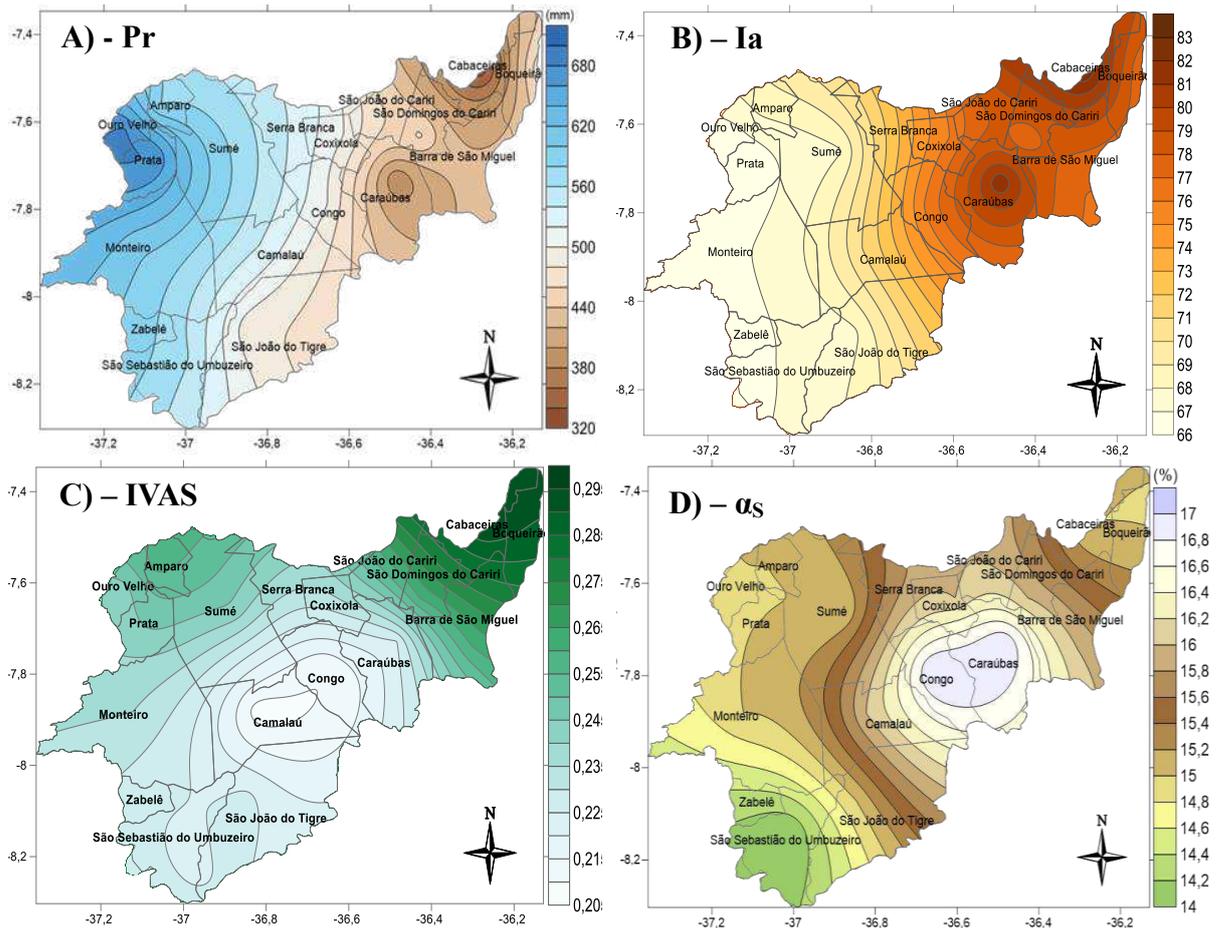


Figura 4.1: Distribuição espacial dos valores médios da precipitação pluvial (A), do índice de aridez (B), período (1950 a 2013), do índice de vegetação ajustado ao solo – IVAS para os meses de agosto (C) e do albedo da superfície (D), período (2000 a 2013), no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

A combinação das variáveis climáticas, precipitação pluvial e índice de aridez, pode indicar que na área mais seca da bacia existe uma maior susceptibilidade ao processo de degradação das terras. Como mencionado também em BRASIL (2004), as áreas das microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental estão em processo de desertificação, onde os municípios de Cabaceiras, São João do Cariri, Serra Branca e Camalaú são os municípios mais degradados. A combinação de fatores como: menores taxas de precipitação, altos níveis de aridez, uso intensivo da terra, seja para agricultura ou pecuária, e remoção da cobertura vegetal potencializam o processo de degradação das terras (Schucknecht *et al.* 2012; Odorico *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2014).

Estudo realizado por Sivakumar (2007) indica que a seca provoca grande impacto sobre os solos e a vegetação. Geralmente, altas temperaturas e baixa taxa de precipitação nas terras áridas levam a uma reduzida produção de matéria orgânica e rápida oxidação. Pouca matéria orgânica leva a baixa estabilidade de agregados, ocasionando um elevado potencial de erosão eólica e hídrica. Colantoni *et al.* (2015) encontraram relação entre indicador de

vulnerabilidade a degradação do solo e aumento da aridez, sugerindo que os solos mais vulneráveis experimentaram um aumento de aridez.

Os efeitos da chuva e de fenômenos climáticos, como o El Niño Oscilação Sul (ENOS), sobre a vegetação foram estudados por Barbosa *et al.*, 2006; Erasmi *et al.*, 2009; Schucknecht *et al.*, 2013 e Erasmi *et al.*, 2014 para a região Nordeste do Brasil e por Schucknecht *et al.* (2012) para o Estado da Paraíba. A vegetação da Caatinga está sujeita à variabilidade do clima, que influencia na sua redução e variabilidade espacial e temporal em condições naturais. No entanto, a degradação do solo causada pela intervenção humana modifica as condições naturais deste bioma. Solo descoberto e exposto à erosão, pecuária, substituição da vegetação nativa por pastagem, uso da madeira como fonte de energia (lenha e carvão) são algumas das atividades antrópicas (Cavalcanti & Coutinho, 2005).

Os valores máximos da precipitação pluvial e do IVAS ocorrem no trimestre mais chuvoso para a região (fevereiro-março-abril) - Figura 4.2 (A e B), respectivamente. No caso do IVAS, os picos encontrados após a estação chuvosa são decorrentes do tempo necessário para a recuperação do porte e densidade da vegetação (MAO *et al.*, 2012). Os anos de 2008 e 2009 apresentaram os maiores valores do IVAS. Os meses de setembro e outubro apresentaram os valores mínimos, com redução da biomassa, devido à ausência de precipitações, que somente vai se recuperar meses depois, com a ocorrência da estação chuvosa. Ao longo dos anos, os valores médios mensais do IVAS variaram entre 0,14 e 0,48. Nos anos de 2012 e 2013 a vegetação foi mais afetada pelas baixas precipitações ocorridas (Figura 4.3), que caracterizaram tais anos como secos. De modo geral, o índice mostrou um comportamento semelhante ao longo dos anos. As condições de maior e menor vigor da vegetação coincidem, respectivamente, com as estações chuvosa e seca na região de estudo. Barbosa *et al.* (2006) em estudo realizado para a região Nordeste do Brasil, analisando vinte anos de dados, encontraram curvas anuais de índice de vegetação com variações mensais semelhantes.

Em relação ao albedo da superfície (Figura 4.2 C), observa-se que os valores mínimos ocorrem nos meses do inverno (junho, julho e agosto), devido à maior cobertura vegetal e umidade do solo mais acentuada. Nos demais meses os valores aumentam, atingindo valores máximos no mês de fevereiro. Ao longo dos anos, os valores médios mensais do albedo variaram de 11 a 21%, concordando com os valores observados para região de Caatinga (Lima *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2009; Cunha *et al.*, 2012 e Bezerra *et al.*, 2014). O albedo da superfície aumenta com a diminuição da precipitação, numa relação indireta, visto que representa uma resposta a redução da vegetação.

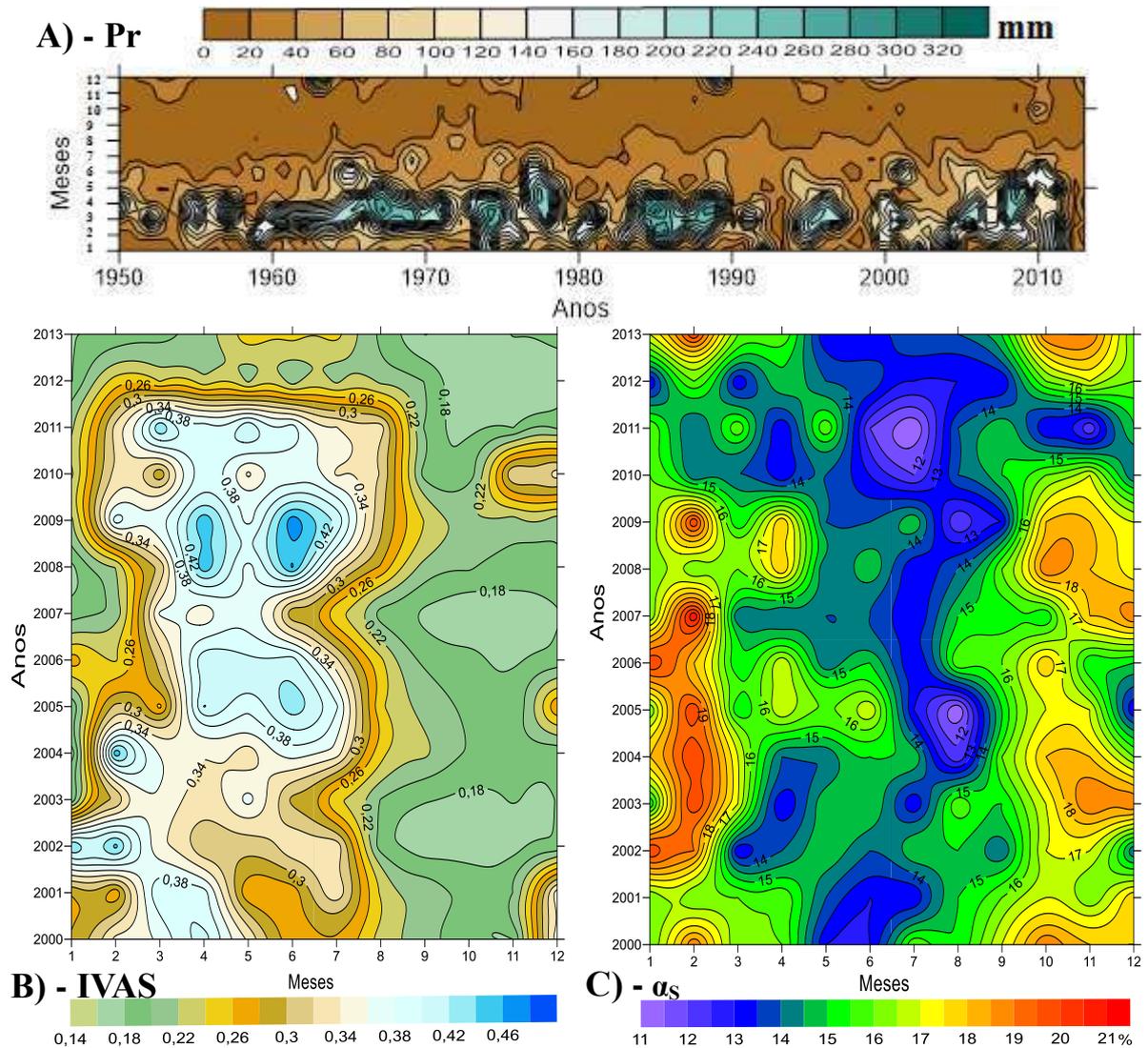


Figura 4.2: Distribuição temporal dos valores médios da precipitação pluvial (A), período de 1950 a 2013, do índice de vegetação ajustado ao solo – IVAS (B) e do albedo da superfície (C), período de 2000 a 2013 para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Na Figura 4.3 observam-se os valores médios da precipitação pluvial para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba no período em que as imagens MODIS foram obtidas (2000 a 2013). Os anos apresentaram precipitação pluvial variando em torno da média (463 mm), com exceção de 2012 e 2013, considerados anos secos, com precipitação média anual de 150 e 323 mm, respectivamente.

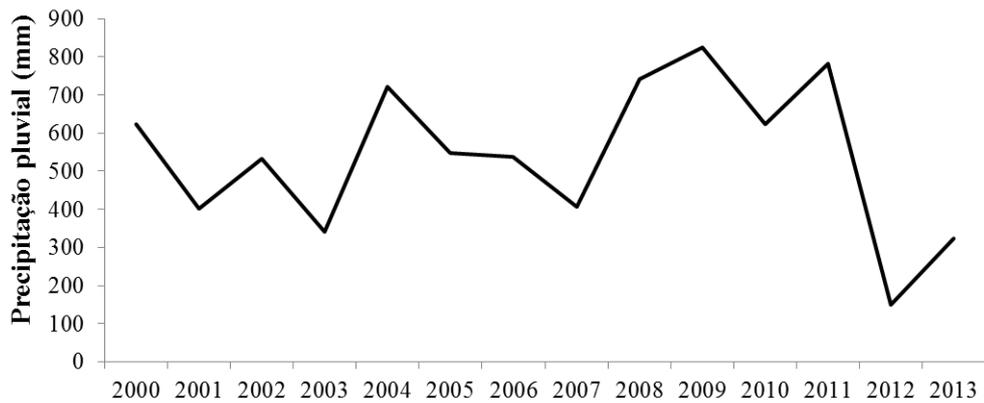


Figura 4.3: Precipitação pluvial média do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período 2000-2013.

Os valores médios mensais do IVAS e do albedo da superfície e sua relação com a ocorrência da precipitação pluvial podem ser observados na Figura 4.4 (A e B). A vegetação representa uma resposta direta à ocorrência da precipitação pluvial, que por sua vez é bastante variável no tempo e no espaço na área de estudo, enquanto que o albedo da superfície tem comportamento inverso à distribuição da precipitação pluvial.

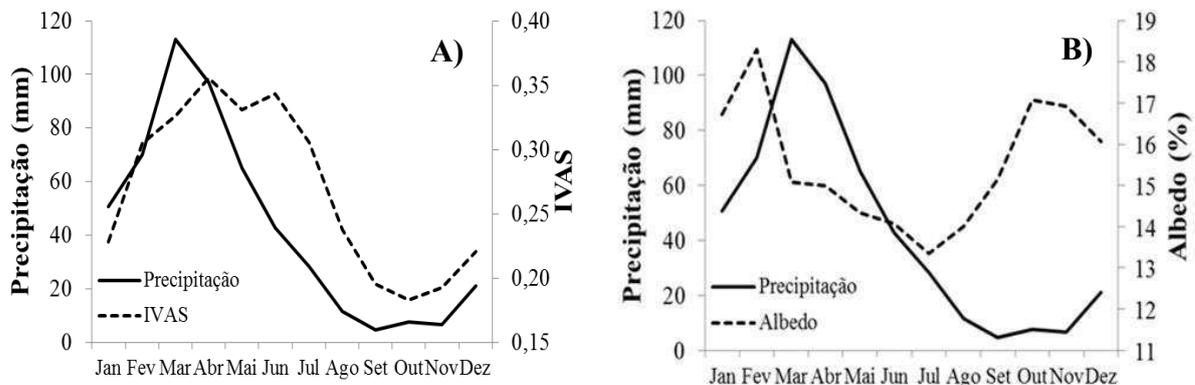


Figura 4.4: Média mensal da precipitação pluvial e sua relação com o índice de vegetação ajustado ao solo - IVAS (A) e albedo da superfície (B) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

As curvas do albedo da superfície *versus* IVAS são apresentadas na Figura 4.5. Sabe-se que quando a vegetação está mais verde e densa reflete menos. À medida que a vegetação diminui ou perde sua folhagem (senescência), em decorrência do estresse hídrico da estação seca, a refletividade aumenta, pois o solo fica mais descoberto e as áreas superficiais mais claras. Por outro lado, quando a vegetação se desenvolve, nos meses da estação chuvosa, o albedo diminui consideravelmente. Assim, o monitoramento temporal e espacial desses parâmetros contribui para o entendimento e mensuração do processo de degradação das terras (desertificação), principalmente quando as causas da redução da vegetação são antrópicas.

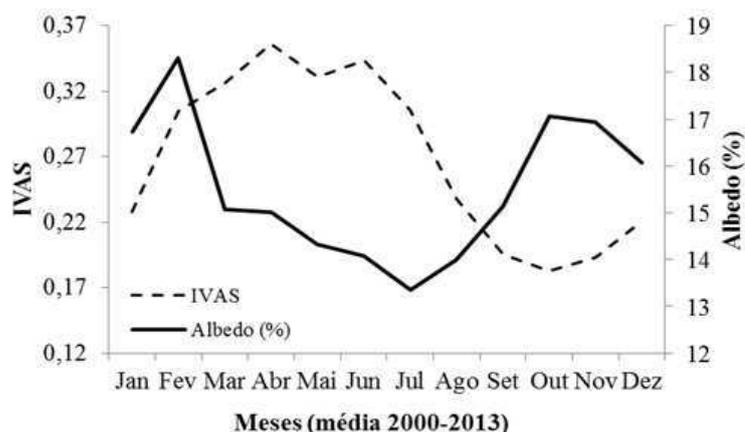


Figura 4.5: Comportamento mensal do índice de vegetação ajustado ao solo - IVAS em comparação ao albedo da superfície para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Esse comportamento inverso entre o albedo da superfície e o índice de vegetação também foi observado por Govaerts & Lattanzio (2008) para a região do Sahel, durante o ano seco de 1984 e o ano chuvoso de 2003. A precipitação no Sahel ocorre de junho a outubro e determina a diminuição do albedo da superfície observada de agosto a outubro. Assim, variações sazonais do albedo da superfície são influenciadas pela precipitação. A estação seca, ocorrendo aproximadamente de outubro a abril, é caracterizada por um aumento lento do albedo na superfície resultante da senescência da vegetação, e os valores mínimos de albedo são atingidos no final da estação chuvosa, ou seja, aproximadamente em outubro. Santos *et al.* (2014) explicam que esta relação inversa entre índice de vegetação e albedo da superfície é devido à elevada taxa de radiação que é absorvida pela vegetação, para utilização em seus processos bio-físico-químicos como a respiração e transpiração. Quando a vegetação é removida e/ou perde suas folhas no período de estiagem, e o solo é assim exposto, a taxa de absorção da radiação solar é baixa. Como resultado, altos níveis de energia são perdidos pela refletividade da superfície.

Na Figura 4.6 apresenta-se a análise dos valores mínimos, médios e máximos para o IVAS (A) e para o albedo da superfície (B), correspondendo à média dos 14 anos analisados. As três curvas do IVAS acompanham as variações temporais semelhantes, no entanto, a amplitude é bastante elevada. As curvas máxima e média de IVAS são elevadas de março a julho e baixa nos meses de outubro a dezembro. A curva de coeficiente de variação (CV) médio apresenta a oscilação de aproximadamente 10 a 40%, indicando a variação sazonal média do índice de vegetação durante o período do estudo. Os maiores valores de CV são observados nos meses de dezembro e janeiro, pois ocorre elevada variabilidade em relação ao início da estação chuvosa, enquanto os menores valores ocorrem nos meses mais secos (setembro e outubro), período do ano em que invariavelmente a vegetação está mais

seca e perde suas folhas. Os valores médios mensais de IVAS variam de 0,20 a 0,35, com valores médios de 0,27. O coeficiente de variação (CV) do índice de vegetação foi sempre mais elevado do que o albedo (Figura 4.6B), evidenciando que a variabilidade destes valores, é também uma resposta à irregularidade espaço-temporal da precipitação pluvial.

Os valores de albedo apresentam amplitude bem menor que o IVAS (Figura 4.5B) e os coeficientes de variação mais elevados também ocorreram nos meses de janeiro e fevereiro, em resposta a variação do índice de vegetação. Resultados semelhantes foram encontrados por Machado *et al.* (2011) para a região semiárida paraibana, com valores médios variando de 0,15 a 0,27. Barbosa *et al.* (2006) relatam que, em análise de 20 anos de dados de IVDN para o Nordeste Brasileiro (NEB), foram identificadas fortes oscilações temporais e espaciais. A análise temporal mostrou que a forma geral de oscilações do IVDN é sazonal, sendo largamente influenciada pelos períodos secos e chuvosos. Barbosa (2013) confirma uma variação média do IVDN de 0,30 a 0,70 para o NEB, determinando desde áreas desnudas-degradadas a áreas com cobertura vegetal densa. Ressalta-se que, mesmo sendo utilizado outro índice de vegetação, que não considera a refletividade do solo e, portanto, apresenta valores mais elevados que o IVAS, a comparação é válida devido à observação da variação sazonal.

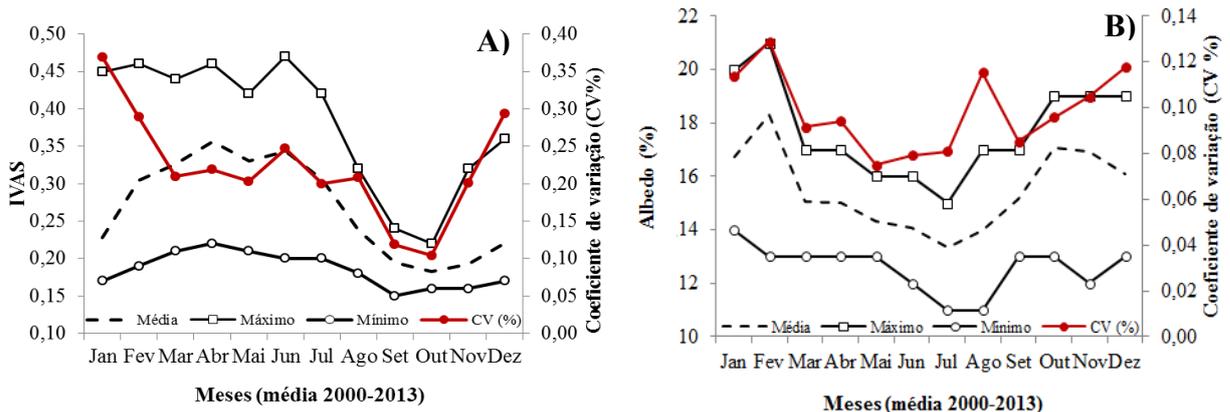


Figura 4.6: Curvas dos valores mínimos, médios, máximos e do CV do índice de vegetação ajustado ao solo – IVAS (A) e do albedo da superfície (B) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período 2000-2013.

O comportamento das variáveis (precipitação pluvial, albedo da superfície e índice de vegetação) para os municípios que apresentaram valores extremos (Congo e São Sebastião do Umbuzeiro) é apresentado na Figura 4.7. As causas dessa diferença devem-se: ao uso da vegetação mais intensivo no município de Congo; aos valores médios precipitados em cada município, pois, enquanto Congo tem 504 mm, São Sebastião do Umbuzeiro tem 568 mm de precipitação média anual e a diferença média de 200 m de altitude, São Sebastião do Umbuzeiro (> 700 m) e o município de Congo (500 m). A altitude mais elevada favorece uma

menor temperatura do ar.

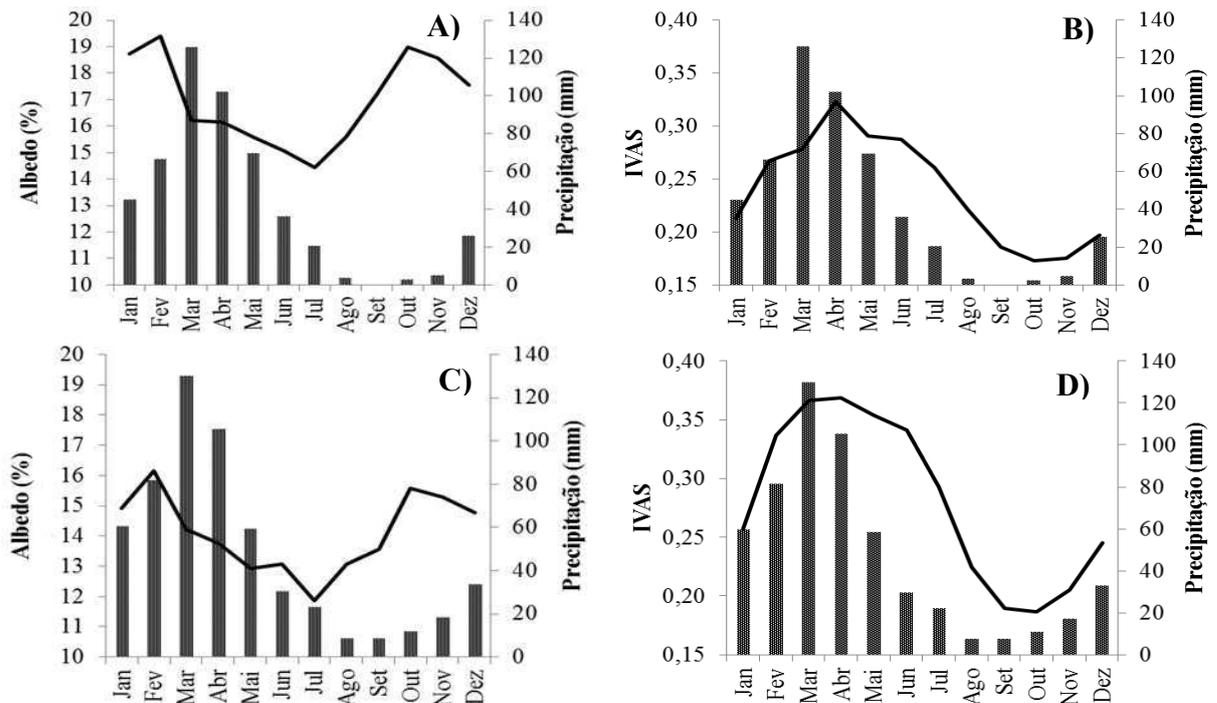


Figura 4.7: Comportamento do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e do albedo da superfície em relação à precipitação pluvial (representada em barras) para os municípios de Congo (A e B) e São Sebastião do Umbuzeiro (C e D).

Observou-se que, em termos médios, o valor mínimo de albedo da superfície foi identificado no município de São Sebastião do Umbuzeiro (12%) no ano de 2011; o valor máximo (19%) foi observado no município de Congo. O município com menor valor de albedo da superfície apresentou maior índice de vegetação (São Sebastião do Umbuzeiro) e vice-versa (Congo). Santos *et al.* (2014) encontraram, para a região de Gilbués (PI), valores de albedo variando entre 19 e 42% para o dia 19 de agosto de 1994 e entre 26 e 50% em 15 de agosto de 2010.

Na Tabela 4.3 verificam-se os valores da análise estatística utilizada para avaliar os parâmetros biofísicos (albedo da superfície e IVAS) estimados na área de estudo. O CV do índice de vegetação foi sempre mais elevado que o do albedo, evidenciando a heterogeneidade destes valores. Os valores de albedo apresentam amplitude bem menor que os índices de vegetação e o CV mais elevado também ocorreu nos meses de janeiro e fevereiro, em resposta a variação do índice de vegetação.

Tabela 4.3: Estatística descritiva dos parâmetros biofísicos estimados mensalmente para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Meses	PBio	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	DP	CV (%)
Janeiro	Albedo (%)	17	16	14	20	0,02	11
	IVAS	0,23	0,19	0,17	0,45	0,08	37
Fevereiro	Albedo (%)	18	19	13	21	0,02	13
	IVAS	0,30	0,30	0,19	0,46	0,09	29
Março	Albedo (%)	15	15	13	17	0,01	9
	IVAS	0,33	0,34	0,21	0,44	0,07	21
Abril	Albedo (%)	15	15	13	17	0,02	9
	IVAS	0,36	0,37	0,22	0,46	0,08	22
Maio	Albedo (%)	14	14	13	16	0,01	7
	IVAS	0,33	0,33	0,21	0,42	0,07	20
Junho	Albedo (%)	14	14	12	16	0,01	8
	IVAS	0,34	0,36	0,20	0,47	0,08	25
Julho	Albedo (%)	13	13	11	15	0,01	8
	IVAS	0,31	0,33	0,20	0,42	0,06	20
Agosto	Albedo (%)	14	14	11	17	0,01	12
	IVAS	0,24	0,23	0,18	0,32	0,05	21
Setembro	Albedo (%)	15	16	13	17	0,01	9
	IVAS	0,20	0,20	0,15	0,24	0,02	12
Outubro	Albedo (%)	17	17	13	19	0,02	10
	IVAS	0,18	0,19	0,16	0,22	0,02	10
Novembro	Albedo (%)	17	18	12	19	0,02	10
	IVAS	0,19	0,18	0,16	0,32	0,04	20
Dezembro	Albedo (%)	16	16	13	19	0,02	12
	IVAS	0,22	0,19	0,17	0,36	0,06	29

PBio - parâmetro biofísico; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Na figura 4.8 observam-se as correlações do IVAS com as variáveis climáticas: precipitação pluvial e temperatura do ar. Há uma correlação decrescente com a temperatura do ar e crescente ($R^2 = 0,66$) com a precipitação pluvial.

Com a elevação da temperatura aumenta a intensidade de transpiração vegetal, e diminuindo a precipitação há redução na umidade disponível para as plantas (Mao *et al.*, 2012). A correlação negativa resulta das elevadas temperaturas na região, em torno de 24 °C, potencializando o processo de evapotranspiração, fazendo com que a vegetação típica de Caatinga perca suas folhas como estratégia de adaptação ao ambiente. A correlação positiva e mais significativa pode ser explicada pelo fornecimento de umidade necessária para o crescimento da vegetação. Resultados semelhantes são encontrados em Hermann *et al.*, 2005 e Brinkmann *et al.*, 2011.

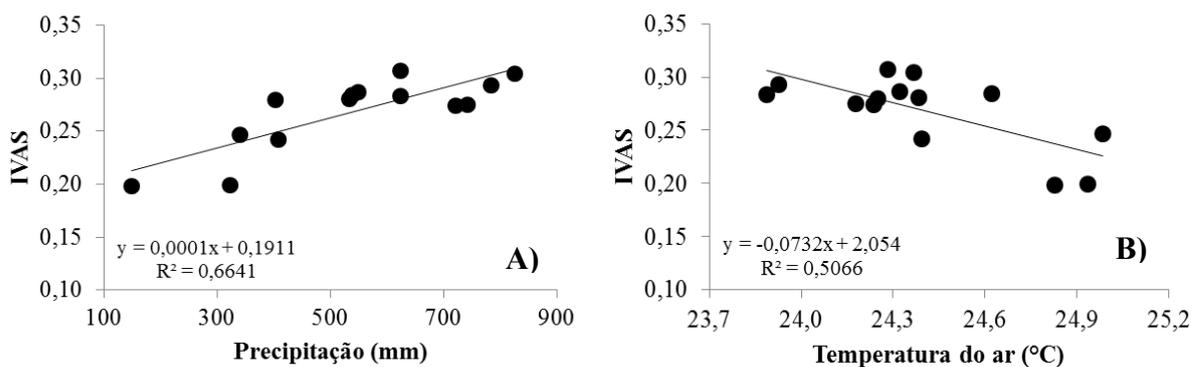


Figura 4.8: Correlação entre o índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e a precipitação pluvial média (A) e com a temperatura média do ar (B) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

4.3. Análise da evolução temporal das variáveis climáticas e biofísicas

O comportamento temporal da precipitação pluvial (Figura 4.9 A) e do índice de aridez (Figura 4.9 B) mostra um aumento na precipitação pluvial (129 mm) e diminuição no índice de aridez (- 4,9%) ao longo do período estudado. No entanto, as tendências não são significativas ao nível de significância $\alpha = 0,05$, com ($Z = 1,91$) para a precipitação e ($Z = -1,57$) para o índice de aridez. Resultados semelhantes foram encontrados para a região norte da China (Liu *et al.*, 2013 e Xu *et al.*, 2014) e para a região central do Nordeste do Brasil (Barbosa *et al.* 2015). Zarch *et al.* (2015) identificaram decréscimo não significativo do índice de aridez na região semiárida brasileira. Silva (2004) também identificou aumento da precipitação e diminuição do índice de aridez em área semiárida semelhante a este estudo no nordeste brasileiro. Liu *et al.* (2013) constataram que o aumento das chuvas é o fator dominante para a diminuição do índice de aridez no noroeste da China no período 1960-2010, enquanto Ahani *et al.* (2013) concluíram que o índice de aridez é mais sensível às tendências da precipitação pluvial do que da evapotranspiração de referência.

É possível observar que os aspectos climáticos da região (aumento da precipitação e diminuição da aridez) não estão sendo diretamente afetados pela degradação das terras. Não há evidências de que a degradação das terras (desertificação) existente na região esteja modificando o regime de chuvas localmente. Oyama & Nobre (2004) em estudo de modelagem realizado para a região nordeste do Brasil, identificaram a redução da precipitação, evapotranspiração e do saldo de radiação a superfície, a nível regional, como consequências de um deserto na referida região, enquanto Millán *et al.* (2004) observaram mudanças no regime de tempestades de verão no Mediterrâneo ocidental no contexto da desertificação. Assim, a degradação das terras (desertificação) observada na região de estudo é decorrente muito mais da ação humana do que da ação do clima, corroborando com os

resultados de Brinkmann *et al.* (2011) e Xu *et al.* (2014) para a Península Arábica e região norte da China, respectivamente.

Variações de regimes de chuva e da temperatura do ar, entre outros, podem aumentar a degradação das terras, na medida em que influenciam o crescimento da planta, tal como explicado por Mao *et al.* (2012) e He (2014). No entanto, não há informações relevantes sobre aspectos climáticos naturais de regiões áridas e semiáridas que pode desencadear o processo de degradação das terras. Alguns estudos têm mostrado como as condições climáticas podem ser afetadas indiretamente por atividades humanas, como a remoção de vegetação e uso inadequado do solo (Marland *et al.* 2003; Millán *et al.* 2004; Sivakumar, 2007). Estudo realizado por Berrecil-Piña (2015) utilizando vários indicadores de desertificação no México, dentre eles o índice de aridez, observaram um acréscimo da aridez, aumentando a vulnerabilidade a esse fenômeno.

Analisando a tendência geral dos valores médios anuais do índice de vegetação e albedo da superfície (Figura 4.9 C e D), constatou-se, com base na estatística Z, que há uma tendência não significativa de decréscimo para as duas variáveis. Essas tendências decrescentes são explicadas, em parte, pelos anos secos de 2012 e 2013, nos quais a vegetação foi bastante afetada pela escassez de chuvas. Observa-se que com a precipitação pluvial aumentando e as demais variáveis diminuindo, a degradação das terras nessa região deve-se a ação antrópica, cuja consequência dessas ações identifica-se na diminuição da vegetação.

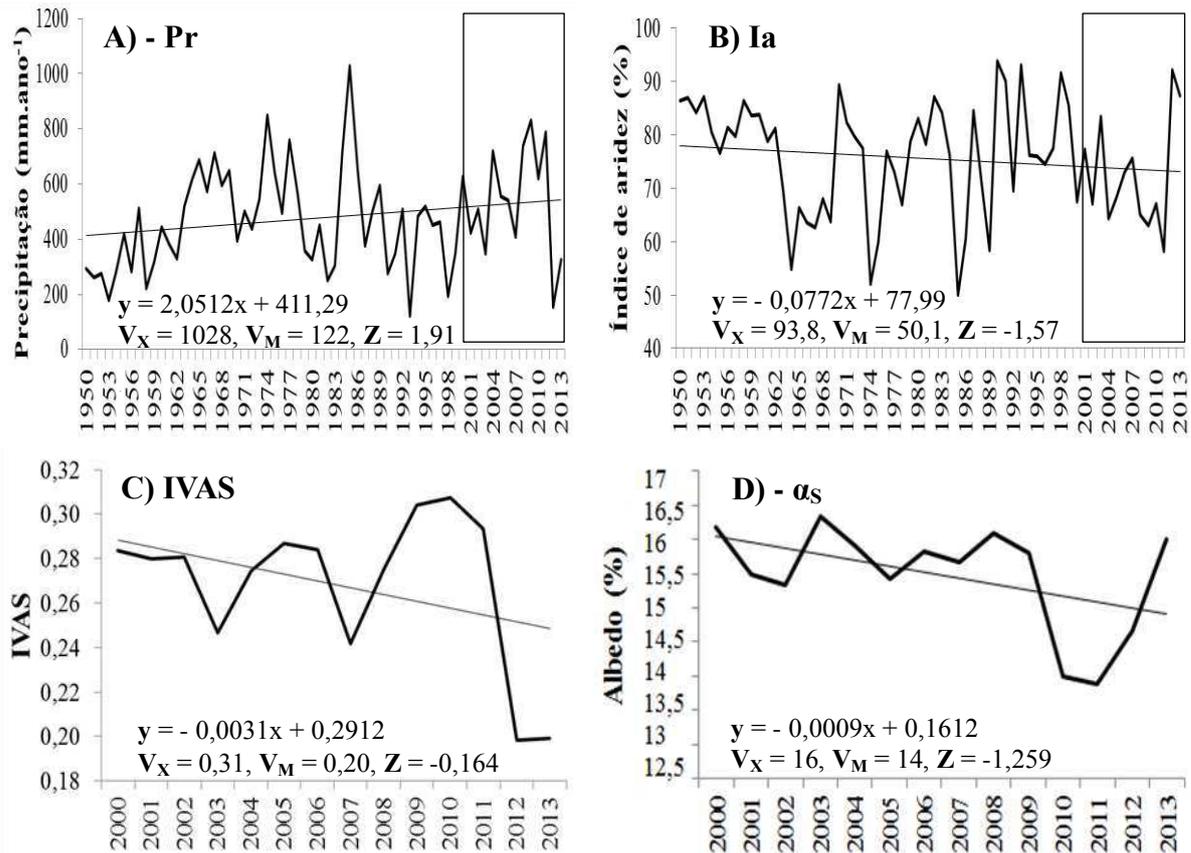


Figura 4.9: Análise temporal da precipitação pluvial (A) e do índice de aridez (B) período (1950 a 2013), do índice de vegetação ajustado ao solo - IVAS (C) e do albedo da superfície (D) período (2000 a 2013), no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Os resultados da distribuição espacial da estatística Z do teste Mann-Kendall (MK) para a precipitação pluvial e índice de aridez são mostrados na Figura 4.10 (A e B), respectivamente. Tendências positivas e negativas foram identificadas para os valores anuais de precipitação e aridez. Observa-se que na parte central da bacia há uma redução (tendência negativa) de precipitação, enquanto nas áreas mais ao norte são observadas tendências crescentes. No entanto, quando se olha para os dados de tendência ao longo do tempo, observa-se que as regiões muito secas apresentam tendências de aumento da precipitação, por exemplo a localidade de Cabaceiras.

No que diz respeito à aridez, há um aumento na porção central, enquanto os setores da bacia com valores absolutos mais elevados do índice de aridez não mostraram elevada tendência de aumento ao longo do tempo. Isso pode indicar que algumas regiões se tornaram menos áridas, todavia, mais pesquisas devem ser desenvolvidas utilizando outros indicadores, que mostrem problemas relacionados ao uso do solo e mudanças climáticas. Some'e *et al.* (2013) mencionaram que a aridez ocorre principalmente em locais onde as condições anti-ciclônicas são persistentes e acrescenta que qualquer aumento de aridez tem efeitos graves sobre o rendimento e o desempenho da agricultura de sequeiro. De acordo com Ahani *et al.*

(2013), em geral, o Irã tem tendência de Ia anual crescente no norte, diminuindo a intensidade na parte sul do país. Almeida & Silva (2008) constataram que a distribuição das chuvas na região do Cariri paraibano é extremamente irregular, em escalas temporais e espaciais. Na maioria dos anos, há uma predominância da estação chuvosa compreendendo apenas dois a três meses, em outros há uma persistência de até nove meses sem chuvas ou chuvas torrenciais em um lugar e quase nada em sua circunvizinhança. Em regiões com acentuada variabilidade na distribuição das chuvas, pode se identificar as áreas com aridez mais elevada.

Na Figura 4.10 (C e D) está espacializada a estatística Z para o IVAS e albedo da superfície, respectivamente. Observa-se a tendência negativa do índice de vegetação nas regiões que correspondem aos municípios de Monteiro e Cabaceiras. O núcleo com tendência crescente está localizado na região dos municípios de Coxixola e Serra Branca. Em relação ao albedo da superfície (Figura 4.10 D) a tendência é decrescente para todos os municípios, com destaque para a região do município de Cabaceiras. Esse decréscimo do albedo justifica-se, em partes, pela quase inexistência de anos secos no período estudado (2000-2013), havendo assim maior cobertura do solo.

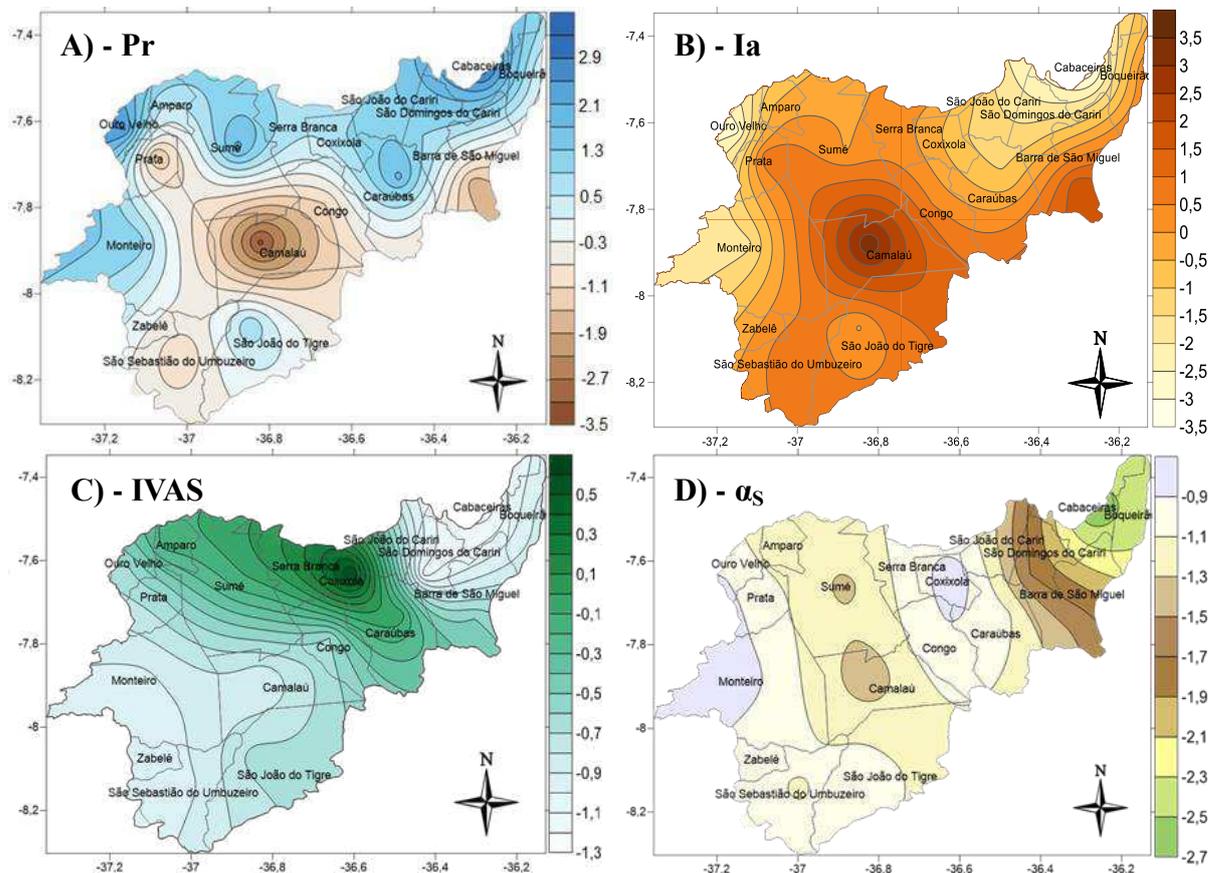


Figura 4.10: Distribuição espacial da estatística Z do teste de Mann Kendall (MK) para a precipitação pluvial (A), índice de aridez (B), período (1950 a 2013), índice de vegetação ajustado ao solo – IVAS (C) e albedo da superfície (D), período (2000 a 2013) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

A Tabela 4.4 mostra os resultados da estatística Z (MK) e do estimador de inclinação do Sen (Q) para a precipitação pluvial anual de cada localidade. Nesta tabela, (*) indica uma tendência significativa (positiva ou negativa) para $\alpha = 0,05$ nível de significância. Observou-se que houve um aumento significativo na precipitação em Cabaceiras ($Z = 3,11$) de cerca de $2,1 \text{ mm ano}^{-1}$. Ouro Velho também apresentou tendência crescente ($Z = 2,52$), com um aumento de $36,7 \text{ mm ano}^{-1}$. No entanto, a localidade de Camalaú apresentou diminuição significativa na precipitação ($Z = -3,21$) com uma redução de $6,6 \text{ mm ano}^{-1}$. As localidades de Sumé e Caraúbas, com p-valor de 0,06 e 0,07, respectivamente, apresentaram aumentos consideráveis de precipitação. Os outros locais tiveram tendências positivas ou negativas na precipitação, mas sem significância estatística.

Tabela 4.4: Tendência da precipitação pluvial anual pelo teste de Mann-Kendall (MK) com base na estatística (Z) e na inclinação de Sen (Q) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período (1950-2013).

Localidades	Z	p-valor	Q
São João do Cariri	1,17	0,24	0,71
Serra Branca	0,02	0,97	0,23
Boqueirão	-0,11	0,90	-0,28
Prata	-1,54	0,12	-4,31
Monteiro	1,16	0,24	1,11
Sumé	1,82	0,06	2,26
Coxixola	0,95	0,33	1,71
Caraúbas	1,80	0,07	1,61
Congo	-1,03	0,30	-2,20
Camalaú	-3,21*	0,00	-6,70
Cabaceiras	3,11*	0,00	2,08
Barra de São Miguel	-1,68	0,09	-2,89
São Sebastião do Umbuzeiro	-1,06	0,28	-2,68
São João do Tigre	0,85	0,39	0,89
São Domingos do Cariri	0,90	0,36	11,98
Ouro Velho	2,52*	0,01	36,77
Amparo	0,54	0,58	6,92

*Z superior a 1,96 ou inferior a -1,96 indica tendência significativa crescente ou decrescente, respectivamente.

Em relação a Cabaceiras, há duas tendências distintas na série completa. Até a década de 60 os dados apontam um decréscimo e posteriormente um acréscimo da precipitação pluvial. Nesse período de acréscimo da precipitação os valores também ficaram mais constantes (Figura 4.11). Uma possível justificativa para esse comportamento deve-se a construção da barragem de Epitácio Pessoa, no município de Boqueirão, no final da década de 60. Como Cabaceiras está localizada a montante da barragem, pode estar havendo transporte de umidade pelo vento.

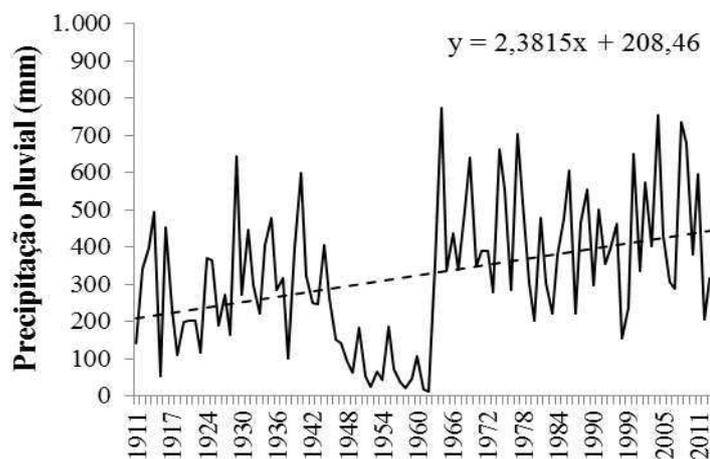


Figura 4.11: Comportamento da precipitação pluviométrica no município de Cabaceiras – PB. Período 1911-2013.

A Tabela 4.5 mostra os resultados da estatística Z do teste de Mann Kendall (MK) para a precipitação mensal de cada localidade. Os valores sublinhados indicam tendência significativa. Estes valores de Z mostram que as tendências mais significativas ocorreram em apenas 13 localidades, 22% dessas tendências ocorreram em setembro e 19% em agosto. A maioria dos meses apresentaram tendência crescente e os meses de maio e dezembro não mostram nenhuma tendência significativa. A localidade do Congo apresentou tendência de aumento da precipitação em quatro meses consecutivos: agosto, setembro, outubro e novembro. A localidade de Camalaú mostrou uma diminuição significativa em abril, julho e setembro e a localidade de Cabaceiras apresentou aumento significativo em janeiro, junho, agosto e setembro. Como não houve padronização das tendências, não foi possível indicar qualquer mudança relativa ao início ou mesmo deslocamento da estação chuvosa.

Tabela 4.5: Resultados da estatística Z do teste de Mann-Kendall (MK) para a precipitação mensal das localidades no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba para o período (1950-2013).

(MK)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São João do Cariri												
Z	1,34	0,01	0,54	0,10	-0,55	1,61	1,42	<u>3,22</u>	<u>2,63</u>	<u>2,53</u>	1,27	-0,16
p-valor	0,17	0,98	0,58	0,91	0,57	0,10	0,15	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,01</u>	0,20	0,86
Serra Branca												
Z	0,48	0,15	-0,27	<u>-2,18</u>	0,21	0,50	0,39	1,79	-0,23	-0,26	-0,21	-1,55
p-valor	0,62	0,87	0,78	<u>0,02</u>	0,82	0,61	0,68	0,07	0,81	0,79	0,83	0,11
Boqueirão												
Z	0,07	-0,14	-1,77	-1,62	-0,23	0,73	-0,07	1,39	0,06	1,21	1,20	-0,24
p-valor	0,93	0,88	0,07	0,10	0,81	0,46	0,93	0,16	0,94	0,22	0,22	0,80
Prata												
Z	1,297	-0,652	<u>-2,063</u>	-1,898	0,165	-0,516	-0,787	-0,249	-2,138	-0,436	-0,286	0,486
p-valor	0,194	0,513	<u>0,039</u>	0,057	0,868	0,605	0,430	0,803	0,032	0,662	0,774	0,626
Monteiro												
Z	2,928	0,468	-1,234	-0,756	0,202	0,189	1,498	<u>3,023</u>	<u>3,236</u>	1,622	1,555	0,590
p-valor	0,003	0,639	0,216	0,449	0,839	0,849	0,134	<u>0,002</u>	<u>0,001</u>	0,104	0,119	0,554
Sumé												
Z	<u>2,529</u>	1,321	0,326	-0,194	0,944	1,201	1,572	1,848	-1,323	-1,626	-1,475	-0,564
p-valor	<u>0,011</u>	0,186	0,744	0,845	0,344	0,229	0,115	0,064	0,185	0,103	0,140	0,572
Coxixola												
Z	0,009	0,849	-0,471	<u>-2,127</u>	1,168	<u>2,028</u>	-0,080	<u>2,236</u>	0,353	-0,101	0,709	0,874
p-valor	0,992	0,395	0,637	<u>0,033</u>	0,090	<u>0,042</u>	0,935	<u>0,025</u>	0,724	0,919	0,478	0,381
Caraúbas												
Z	2,009	0,640	0,868	0,338	0,216	1,090	-0,038	1,596	-1,207	-1,175	<u>-2,345</u>	0,113
p-valor	0,044	0,521	0,384	0,734	0,828	0,275	0,969	0,110	0,227	0,239	<u>0,019</u>	0,909
Congo												
Z	0,00	-0,086	-1,007	-1,024	-0,970	0,855	0,259	<u>3,922</u>	<u>2,532</u>	<u>2,006</u>	<u>2,117</u>	0,344
p-valor	1,000	0,931	0,313	0,305	0,331	0,392	0,795	<u>0,000</u>	<u>0,011</u>	<u>0,044</u>	<u>0,034</u>	0,730
Camalaú												
Z	-0,788	-1,239	-1,147	<u>-2,292</u>	-1,560	-1,125	<u>-2,092</u>	-1,255	<u>-3,412</u>	-1,194	-0,374	-0,239
p-valor	0,430	0,215	0,251	<u>0,003</u>	0,118	0,260	<u>0,036</u>	0,209	<u>0,006</u>	0,232	0,708	0,810
Cabaceiras												
Z	<u>2,375</u>	1,230	1,713	1,932	1,672	<u>2,993</u>	1,883	<u>2,946</u>	<u>2,731</u>	1,011	0,735	1,193
p-valor	<u>0,017</u>	0,218	0,086	0,053	0,094	<u>0,002</u>	0,059	<u>0,003</u>	<u>0,006</u>	0,311	0,461	0,232
Barra de São Miguel												
Z	-1,202	-1,098	-1,071	-0,766	-0,391	0,999	-0,456	-0,116	<u>-2,360</u>	-1,047	1,257	-0,647
p-valor	0,229	0,272	0,284	0,443	0,695	0,317	0,648	0,906	<u>0,018</u>	0,294	0,208	0,517
São Sebastião do Umbuzeiro												
Z	-0,090	0,231	-2,498	-1,235	0,872	-1,353	-0,756	0,186	-1,693	-0,102	-0,353	1,003
p-valor	0,364	0,817	0,012	0,216	0,382	0,175	0,449	0,851	0,090	0,918	0,723	0,315
São João do Tigre												
Z	1,036	-1,190	-0,350	-0,639	0,941	-0,387	0,781	0,154	-0,959	0,846	0,333	1,387
p-valor	0,300	0,233	0,726	0,522	0,346	0,698	0,434	0,876	0,337	0,397	0,739	0,165
São Domingos do Cariri												
Z	-0,135	0,501	0,090	1,080	0,720	-0,360	0,720	1,282	0,346	1,369	<u>2,385</u>	0,346
p-valor	0,892	0,615	0,927	0,279	0,471	0,718	0,471	0,199	0,728	0,170	<u>0,017</u>	0,728
Ouro Velho												
Z	1,039	<u>2,161</u>	0,900	0,720	0,768	<u>2,431</u>	0,360	0,940	0,645	0,512	1,610	-0,184
p-valor	0,298	<u>0,030</u>	0,367	0,471	0,442	<u>0,015</u>	0,718	0,346	0,518	0,608	0,107	0,853
Amparo												
Z	-0,720	0,768	-0,810	0,000	0,450	-0,180	0,316	0,406	-0,672	-0,550	0,061	0,144
p-valor	0,471	0,442	0,417	1,000	0,652	0,857	0,751	0,684	0,501	0,581	0,951	0,885

Como resultado do aumento das chuvas e baixa variabilidade da temperatura do ar, o índice de aridez mostrou uma tendência de decréscimo na maioria das localidades, sendo

estatisticamente significativa em alguns casos, como em Cabaceiras e Ouro Velho (Tabela 4.6), com taxa anual de redução (- 0,27%) e (-1,54%), respectivamente. A localidade de Camalaú mostrou tendência de aumento do índice de aridez, a uma taxa anual de 0,52%. Os outros locais mostraram tendência crescente ou decrescente de aridez, mas sem significância estatística.

Tabela 4.6: Tendência anual do índice de aridez pelo teste de Mann-Kendall (MK) com base na estatística (Z) e inclinação de Sen (Q) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba para o período (1950-2013).

Localidades	Z	p-valor	Q
São João do Cariri	-1,82	0,06	-0,18
Serra Branca	0,50	0,61	0,09
Boqueirão	0,64	0,51	0,08
Prata	0,85	0,39	0,10
Monteiro	-1,63	0,10	-0,11
Sumé	-0,03	0,97	-0,004
Coxixola	-0,87	0,38	-0,09
Caraúbas	-0,93	0,34	-0,09
Congo	0,44	0,65	0,06
Camalaú	3,43*	0,00	0,52
Cabaceiras	-3,40*	0,00	-0,27
Barra de São Miguel	1,77	0,07	0,25
São Sebastião do Umbuzeiro	0,99	0,31	0,15
São João do Tigre	-0,05	0,95	-0,01
São Domingos do Cariri	-1,26	0,20	-0,86
Ouro Velho	-2,66*	0,00	-1,54
Amparo	-0,54	0,58	-0,23

*Z superior a 1,96 ou inferior a -1,96 indica significativa tendência crescente ou decrescente, respectivamente.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados da estatística Z do teste de MK para cada localidade referente ao IVAS e albedo da superfície. Observa-se que, somente os municípios de Serra Branca e Coxixola não apresentaram tendência negativa para o IVAS. Porém, nenhuma das tendências foi significativa. Em relação ao albedo da superfície, há uma tendência geral de diminuição desta variável ao longo do período estudado, porém com significância apenas para o município de Boqueirão e Cabaceiras. Para esses dois municípios, principalmente para o município de Boqueirão, isso é consequência da existência de cultivos permanentes irrigados nas margens do reservatório Epitácio Pessoa.

Tabela 4.7: Tendência anual do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e do albedo da superfície pelo teste de Mann-Kendall (MK) com base na estatística (Z) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, para o período (2000-2013).

Localidades	IVAS		Albedo	
	Z	p-valor	Z	p-valor
São João do Cariri	-0,93	0,35	-1,10	0,27
Serra Branca	0,05	0,95	-0,99	0,32
Boqueirão	-0,82	0,41	-2,35*	0,01
Prata	-0,60	0,54	-0,99	0,32
Monteiro	-0,93	0,35	-0,83	0,40
Sumé	-0,16	0,86	-1,33	0,18
Coxixola	0,60	0,54	-0,82	0,41
Caraúbas	-0,05	0,95	-1,05	0,29
Congo	-0,60	0,54	-0,93	0,35
Camalaú	-0,88	0,37	-1,43	0,15
Cabaceiras	-1,25	0,20	-2,64*	0,00
Barra de São Miguel	-0,49	0,62	-1,58	0,11
São Sebastião do Umbuzeiro	-0,93	0,35	-1,11	0,26
São João do Tigre	-0,66	0,50	-1,04	0,29
São Domingos do Cariri	-1,14	0,25	-1,69	0,08
Ouro Velho	-0,60	0,54	-0,93	0,35
Amparo	-0,16	0,86	-1,25	0,20

*Z superior a 1,96 ou inferior a -1,96 indica significativa tendência crescente ou decrescente, respectivamente.

4.4. Comparação do IVAS e albedo da superfície para anos: seco e chuvoso

As Figuras 4.12 e 4.13 referem-se à distribuição mensal do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) para o ano seco (2013) e chuvoso (2008), respectivamente. Em relação à imagem do dia 30/09 (Figura 4.12) observa-se que mais de 50% da área apresenta IVAS entre 0,08 e 0,16. Tal evidência relaciona-se a época de imageamento da região, que corresponde ao período de precipitações pluviais mínimas, e também devido à própria vegetação da área, formada por Caatinga caducifólia arbustiva, que se caracteriza pela queda das folhas no período seco (agosto a dezembro).

É importante destacar que nos meses de maio, junho e julho, a presença de vegetação está mais concentrada nas proximidades do reservatório hídrico “Epitácio Pessoa” e na Área de Proteção Ambiental (APA) das Onças, município de São João do Tigre. No primeiro caso a explicação está relacionada à existência de áreas irrigadas com desenvolvimento permanente de culturas no entorno do reservatório, não correspondendo à existência de vegetação nativa. No segundo caso a razão é o relevo, pois coincide com as áreas mais elevadas e de declividades acentuadas, dificultando o acesso e a utilização dessas áreas para fins agropecuários. Quando avaliado temporalmente, o IVAS pode ser importante indicador de degradação das terras (desertificação) e de redução de fitomassa da Caatinga (Sampaio *et al.* 2003; Rodrigues *et al.* 2009). Os municípios que apresentaram menores índices de vegetação

foram Congo, Caraúbas e Camalaú. Nestes, as ações antrópicas relacionadas à degradação das terras são mais acentuadas e ocorrem as maiores áreas de solo exposto (IVAS entre 0,0 e 0,16) e vegetação arbustiva aberta baixa (IVAS entre 0,16 e 0,24).

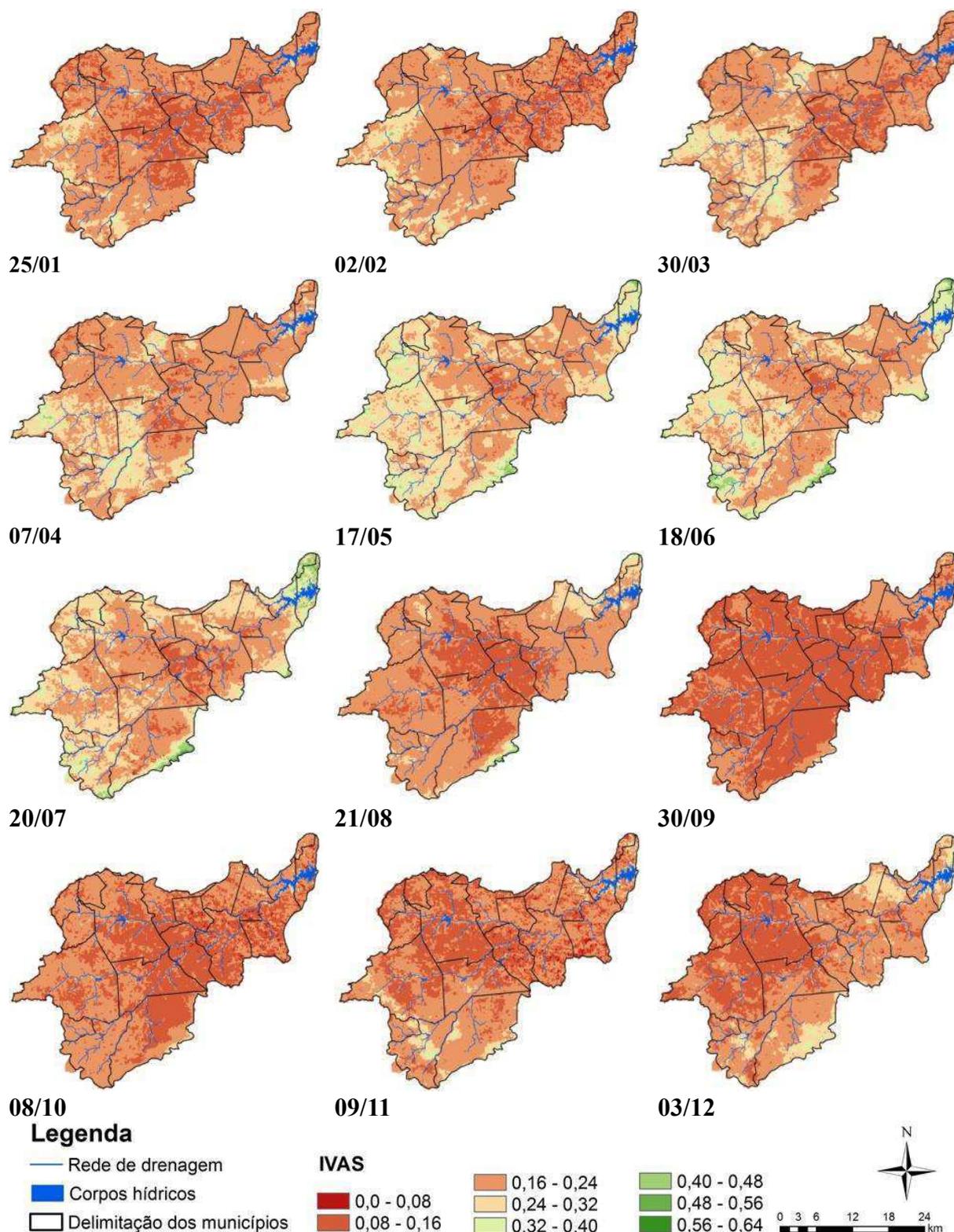
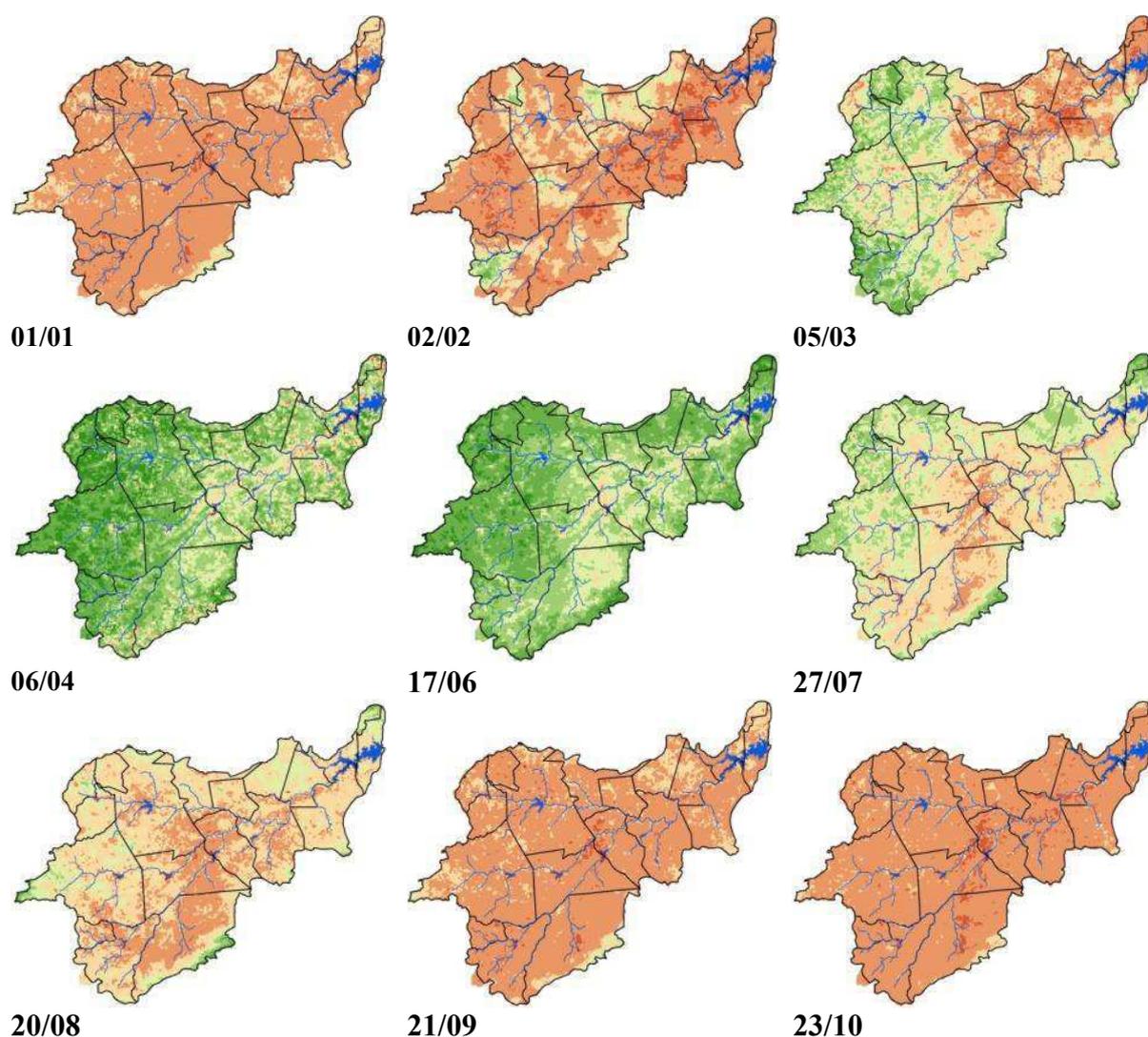


Figura 4.12: Comportamento sazonal do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, durante o ano de 2013.

Na Figura 4.13 observa-se a caracterização da vegetação no ano chuvoso de 2008. Na imagem do dia 06/04 verifica-se que 38% da área apresentou valores de IVAS entre 0,48 e 0,56 e 36% valores entre 0,40 e 0,48, demonstrando uma vegetação de porte mais arbóreo e principalmente em condições mais favoráveis de suprimento hídrico, portanto com maior vigor, uma vez que a imagem foi obtida no período da estação chuvosa. Esse comportamento normalmente permanece até os meses de maio e junho. Convém ressaltar que as imagens referentes ao mês de maio deste ano estavam comprometidas pela presença de nuvens. Govaerts & Lattanzio (2008) explicam que na região do Sahel a relação entre vegetação e precipitação pluvial apresenta um atraso de cerca de um mês na resposta da vegetação a variação da umidade do solo resultante da acumulação de água no sistema radicular da planta. Para a Caatinga brasileira esse período deve ser melhor estudado, pois algumas espécies, como a Catingueira, respondem de forma muito rápida a menor ocorrência de chuvas. Ressalta-se a importância de demonstrar o comportamento sazonal do índice de vegetação devido à predominância de meses secos influenciarem o valor médio apresentado.



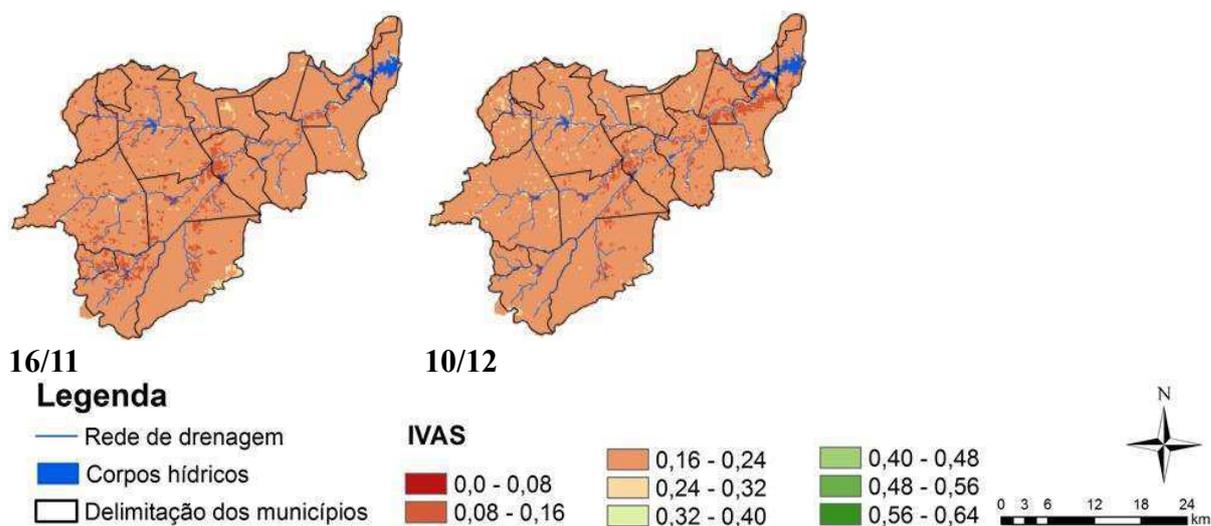
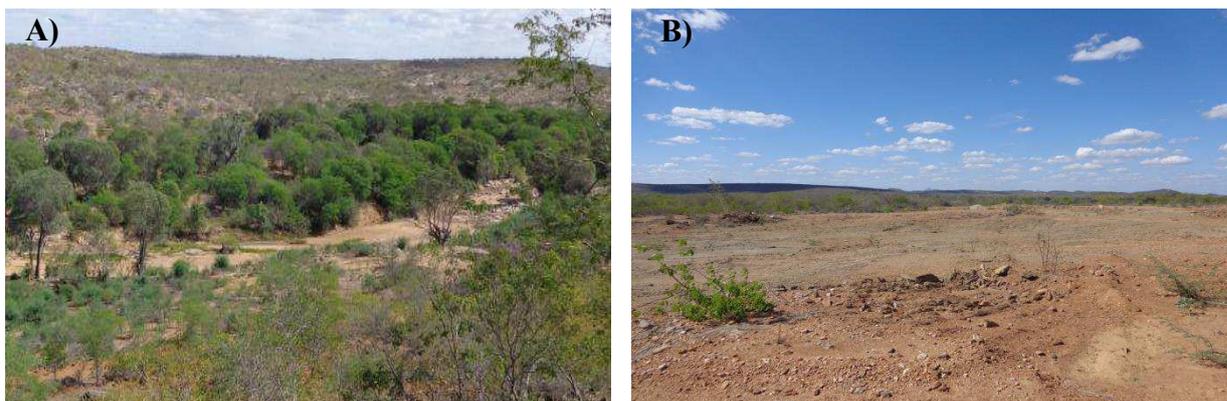


Figura 4.13: Comportamento sazonal do índice de vegetação ajustado ao solo - IVAS no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, durante o ano de 2008.

É importante mencionar que em alguns casos onde o índice de vegetação é elevado corresponde a campos de *Prosopis Juliflora* (Sw) (algaroba), uma vez que o IVAS não envolve detecção de mudanças de composição de espécies. A algaroba (Fotografia 4.1A) é uma espécie exótica, introduzida no bioma Caatinga e que apresentou elevada adaptabilidade à região, devido a um sistema radicular que se aprofunda no solo por vários metros e que é especializado em absorver a água armazenada nessa região. Essa espécie tem competido com o desenvolvimento de espécies nativas, especialmente em regiões de planícies aluviais. Em estudo realizado no semiárido, foram constatados pontos isolados que apresentaram IVDN próximos a 0,80 e que representam espécies nativas e exóticas, como o *Zizyphus joazeiro* Mart (Juazeiro) e a *Prosopis juliflora*, respectivamente, que apresentam alta densidade foliar (Rodrigues *et al.* 2009).

As espécies reconhecidas como predominantes em áreas em processo de desertificação (catingueira, jurema preta, etc.) foram identificadas em grande quantidade em praticamente todos os municípios da área de estudo, além de muitas áreas com presença de solo exposto (Fotografia 4.1B).



Fotografia 4.1: Presença de algaroba nas margens do Rio Paraíba, município de Caraúbas - PB (A) e áreas de solo exposto no município de Congo (B). Trabalho de campo realizado em dezembro de 2014.

Gallaher & Merlin (2010), em estudo realizado no Havaí, relatam tanto impactos negativos quanto positivos da algaroba sobre o ambiente. Particularmente sobre áreas degradadas, destacam a importância por facilitar o processo de sucessão vegetal, sendo seu uso indicado em esforços de reflorestamento. Nota-se, contudo, que os algarobais se concentram em solos aluviais, que correspondem na maioria dos casos, a áreas agrícolas que foram abandonadas e rapidamente ocupadas por esta espécie, e que deveriam ter a vegetação preservada ou reflorestada com espécies nativas.

Da mesma forma que o índice de vegetação, o albedo da superfície, quando avaliado de forma sazonal e em longo prazo, pode ser importante indicador de desertificação e de redução da biomassa na Caatinga (Bezerra *et al.* 2014). As Figuras 4.14 e 4.15 detalham a variação sazonal da distribuição espacial do albedo da superfície em ano seco e chuvoso, respectivamente.

Os valores máximos foram detectados nos meses de fevereiro, outubro e novembro (Figura 4.14) nas áreas de solo exposto (24 a 40%), correspondentes aos municípios de Caraúbas, Congo, Coxixola, Barra de São Miguel, São Domingos do Cariri e São João do Cariri. A explicação para esses valores é a perda da parte aérea do dossel foliar durante a estação seca e/ou retirada da vegetação natural para usos antrópicos. Ressalta-se, contudo, que os valores máximos ocorrem em determinadas épocas do ano, portanto, não é uma condição permanente na área de estudo. Em termos médios, esses valores são suavizados.

O albedo da superfície apresenta mudanças distintas diretamente resultantes das variações de biomassa e de umidade da superfície. Valores equivalentes foram identificados por outros autores: Silva *et al.* (2005) observaram, em duas imagens TM Landsat 5 envolvendo áreas de vegetação nativa nos municípios de Petrolina - PE e Juazeiro - BA, albedo da superfície de 31% e 33%; Rodrigues *et al.* (2009) utilizando imagem Landsat 7

ETM+ estimaram que aproximadamente 14% da área total apresentou albedo da superfície variando de 26 a 36% e Bezerra *et al.* (2014) detectaram os maiores valores nas áreas de solo exposto (30 a 35%).

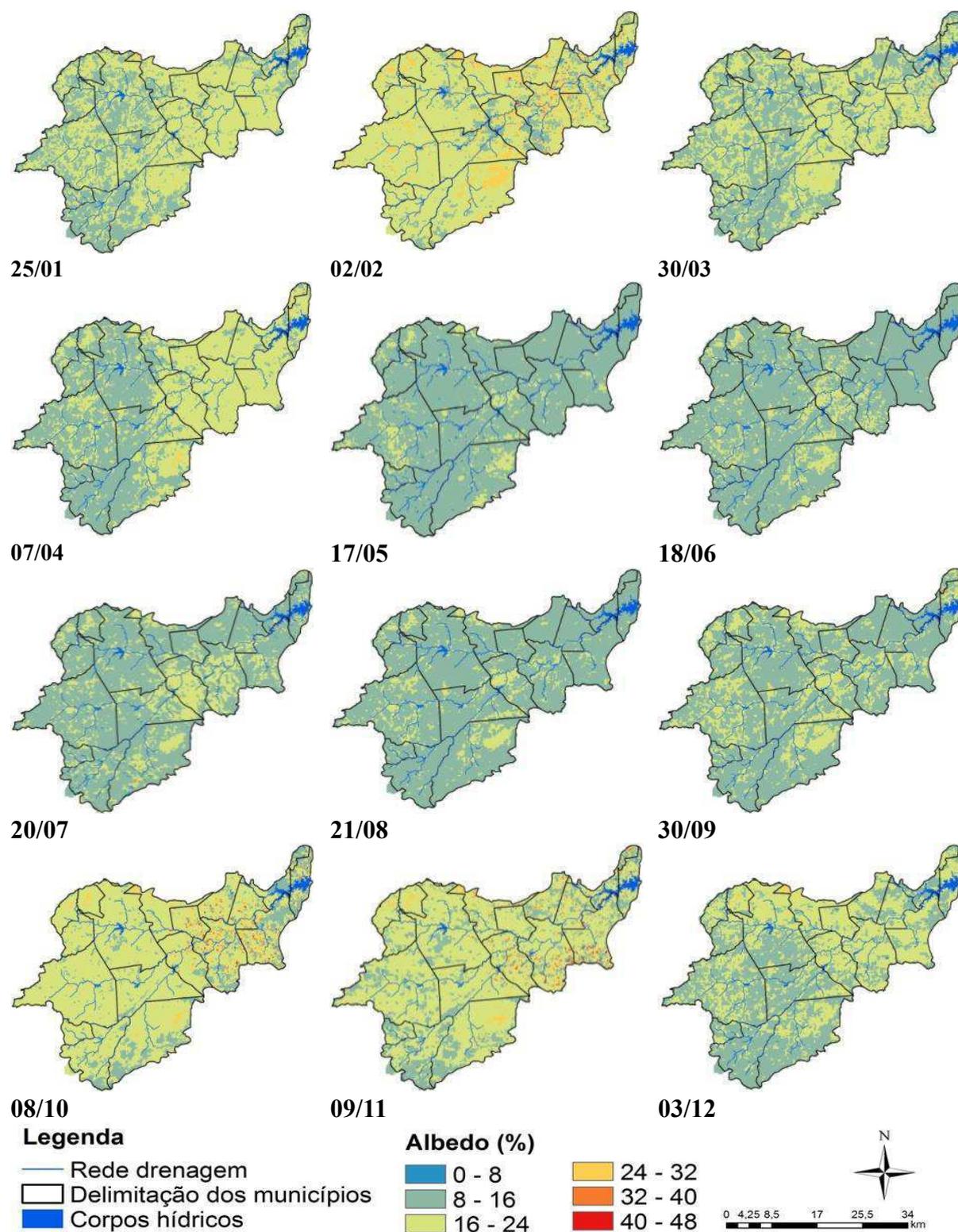


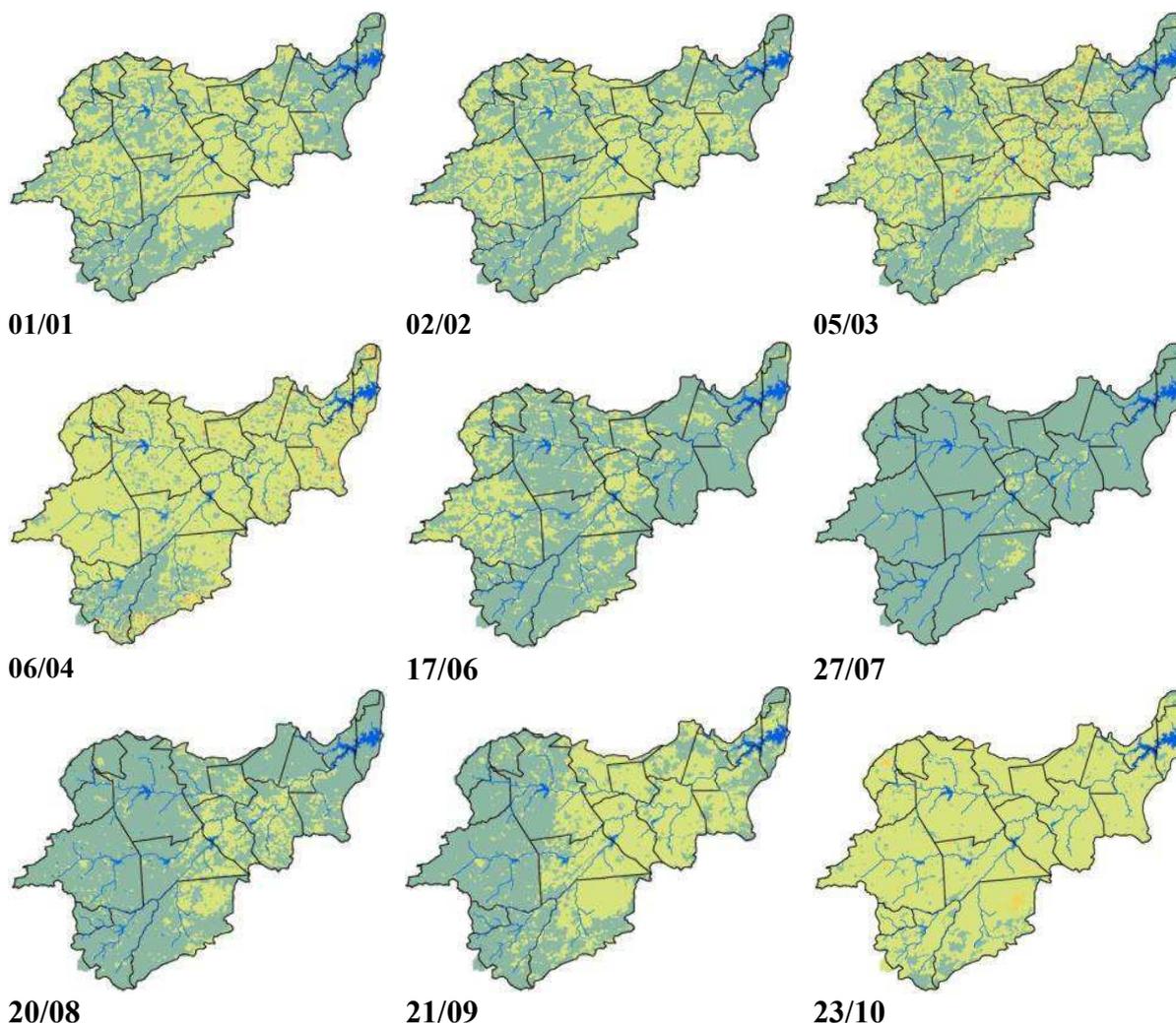
Figura 4.14: Comportamento sazonal do albedo da superfície no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, durante o ano de 2013.

Os baixos valores de albedo (0 a 8%) identificados nas figuras indicam a presença de

corpos hídricos na região, tais como os açudes: Epitácio Pessoa, localizado no município de Boqueirão, Campos, localizado no município de Caraúbas, Cordeiro, município do Congo, Camalaú, município de Camalaú, Sumé, município de Sumé, Poções em Monteiro e Santo Antônio, município de São Sebastião do Umbuzeiro.

Para áreas com cobertura vegetal de Caatinga o albedo variou de 8 a 16% (Figura 4.15), corroborando com os valores de 10 a 15% obtidos por Bezerra *et al.* (2014), 12 e 21% por Cunha *et al.* (2012) e Lima *et al.* (2009) para regiões de Caatinga.

Wang & Davidson (2007) afirmam que as condições hídricas do solo e da planta influenciam diretamente nos padrões sazonais do albedo. O solo mais úmido absorve mais radiação eletromagnética e, por estar mais úmido (escuro), reduz a refletância, diminuindo os valores do albedo. Govaerts & Latanzio (2008) demonstraram que o déficit de precipitação nos meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro que ocorreu entre as latitudes 12 ° N e 18 ° N (região do Sahel africano) traduziu-se num aumento de albedo da superfície de cerca de 6%. Nas imagens de 23/10 e 16/11 (estação seca), observou-se também um aumento nos valores de albedo da superfície de cerca de 4%.



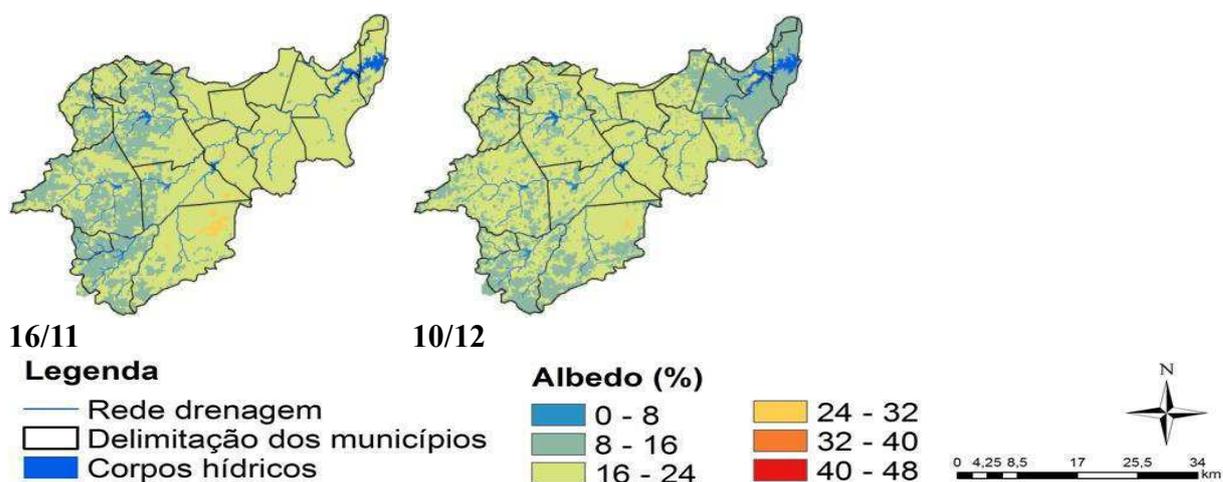


Figura 4.15: Comportamento sazonal do albedo da superfície no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, durante o ano de 2008.

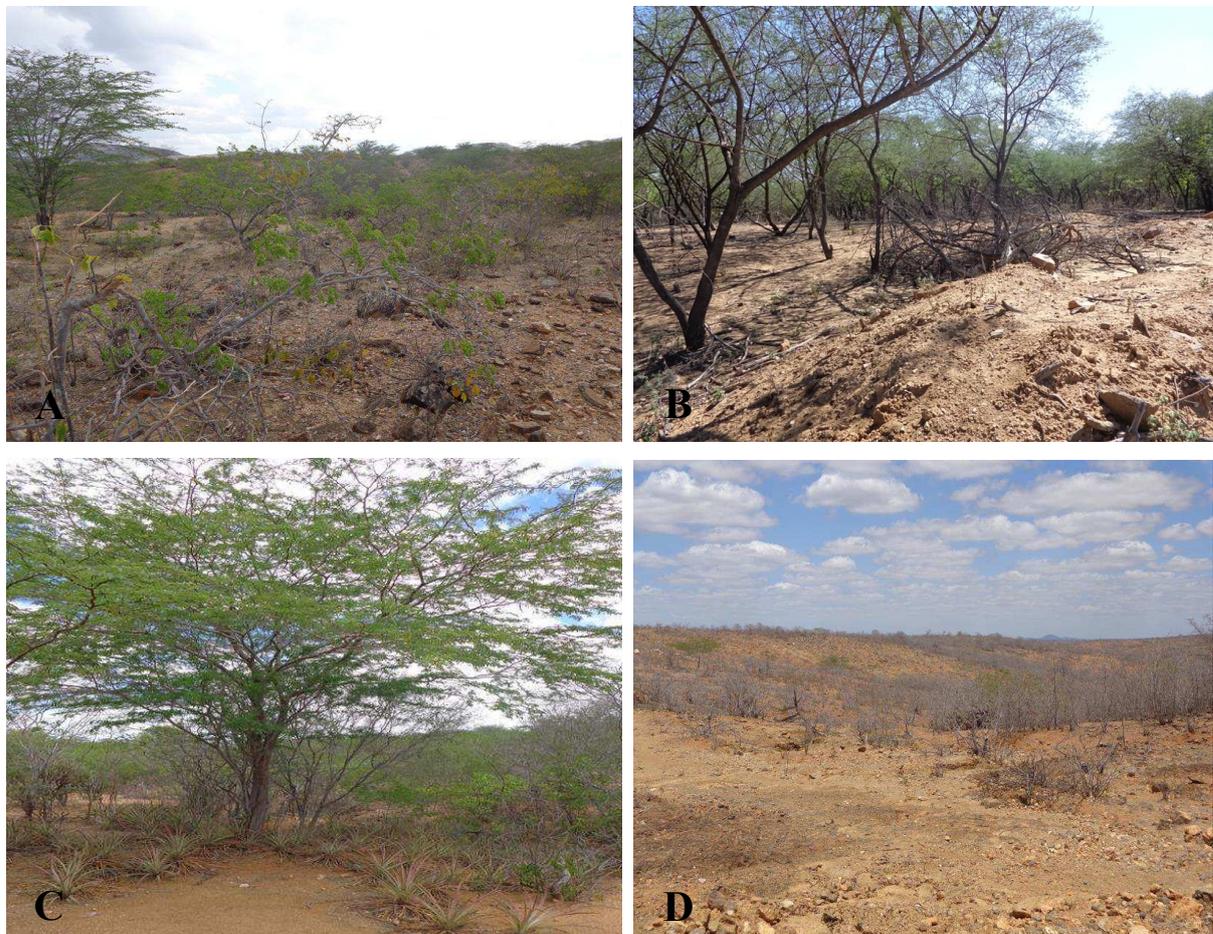
Li *et al.* (2000) mostraram que o albedo da superfície é um fator importante para os mecanismos da desertificação. Em estudo realizado na região semiárida da China, por meio de experimento conduzido em parcelas de pastagem sem pastoreio, com pastoreio leve, moderado e intensivo de ovelhas, a remoção ou redução da cobertura vegetal causada pelo pastoreio aumentou o albedo da superfície. A experiência demonstrou que, com o aumento da intensidade de pastoreio, os valores de albedo tendem a aumentar e os saldos de radiação líquida disponível tendem a diminuir. Além disso, informam que pode existir um valor crítico de albedo da superfície, acima do qual a desertificação é provável de acontecer. Este valor é cerca de 30% para as pastagens arenosas estudadas pelos autores.

A região do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba é caracterizada por acentuado pastoreio de rebanhos caprinos, ovinos e bovinos, manejados de forma extensiva, o que contribui para a remoção da cobertura vegetal durante todo o ano. Além disso, boa parte da vegetação lenhosa, predominantemente algarobais, é retirada para suprimento energético (lenha e carvão) e consequente comercialização, principalmente com o estado vizinho (Pernambuco), responsável por alta demanda.

4.5. Aspectos da vegetação observados nos trabalhos de campo

As espécies reconhecidas como predominantes em áreas desertificadas por Galindo *et al.* (2008) foram identificadas em grande quantidade em praticamente todos os municípios da área de estudo, por meio dos levantamentos de campo. São elas: *Caesalpinia pyramidalis* (catingueira), *Mimosa hostilis* (jurema preta), dentre outras, além de muitas áreas com presença de solo exposto (Fotografias 4.2). Um fator limitante para o aumento de espécies arbóreas da Caatinga, como o umbuzeiro, é a caprinocultura desenvolvida fortemente na região, pois o caprino se alimenta das plantas em sua fase inicial de desenvolvimento,

evidência disso é a existência predominante de umbuzeiros centenários. A macambira, por sua vez, abriga sementes de espécies nativas que seriam dispersas pelo vento ou pela água, e suas folhas com espinhos duros protegem essas sementes, facilitando a germinação e crescimento da plântula. São os processos de resiliência criados no ambiente para estabelecer um reequilíbrio.



Fotografias 4.2: Aspectos da vegetação e do solo no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. A) Área com predominância de catingueira, no município de Coxixola ($-7^{\circ}37'87''$; $-36^{\circ}35'75''$); B) Espécies de jurema preta no município de Zabelê ($-8^{\circ}05'22''$; $-37^{\circ}05'27''$). C) Espécie arbórea entre macambiras, município de Barra de São Miguel ($-7^{\circ}45'84''$; $-36^{\circ}22'40''$) e D) Área em processo de degradação das terras, município de São Domingos do Cariri ($-7^{\circ}38'87''$; $36^{\circ}23'62''$). Pesquisa de campo (dezembro/2014).

Em estudo realizado por Ferraz *et al.* (2014) comparando a vegetação de áreas em recuperação (22 anos após corte total) e conservadas da Caatinga, foi observado que na área em recuperação a espécie *Poincianella bracteosa*, conhecida localmente como catingueira, apresentou maior densidade relativa, seguida por *Jatropha molíssima* (pinhão brabo), *Croton blanchetianus* (marmeleiro), *Pityrocarpa moniliformis* (quipembe), *Mimosa ophthalmocentra* (jurema de embira), *Thiloa glaucocarpa* (Sipaúba) e *Cnidocolus bahianus* (faveleira-braba). Os autores ainda estabeleceram que a vegetação secundária da Caatinga após severa perturbação atingiria o estoque original em cerca de 40 anos após o desmatamento.

4.6. Análise dos indicadores socioeconômicos do processo de degradação das terras (desertificação)

4.6.1. Caracterização dos indicadores socioeconômicos

Os indicadores socioeconômicos utilizados neste estudo (densidade demográfica - Dd, produto interno bruto - PIB, índice de desenvolvimento humano - IDH, taxa de analfabetismo - Ta, uso do solo agrícola - Usa, pecuária - Pa, estrutura fundiária - Ef e extração vegetal - Ev) e os respectivos índices obtidos para cada indicador são observados na Figura 4.16. Os indicadores PIB e IDH apresentaram os menores índices ao longo do período estudado, evidenciando que, de modo geral, a população dessa região apresenta baixo desenvolvimento econômico e social. Os indicadores Dd e Usa apresentaram os valores mais elevados, indicando que a pressão antrópica decorrente da quantidade de pessoas residentes na região é baixa, bem como o impacto da utilização das terras para fins agrícolas, isso considerando a relação negativa desses indicadores com o processo de degradação das terras.

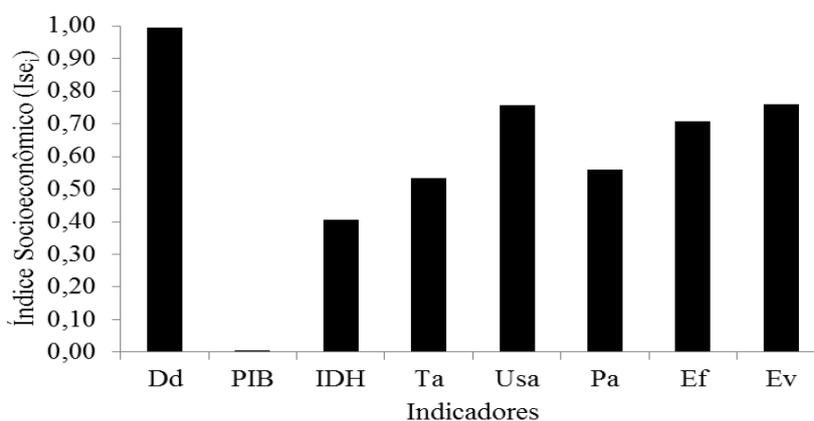


Figura 4.16: Valores médios do índice socioeconômico por indicador para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período de 1970 a 2006.

Em relação à densidade demográfica, observa-se que as áreas dos municípios são pouco habitadas, e que os municípios de Boqueirão e Cabaceiras apresentam aumento significativo ao longo do período estudado. Porém, é importante ressaltar que, mesmo com uma Dd baixa, a exploração dos recursos naturais foi estabelecida ao longo de sucessivas décadas, e os seus efeitos são cumulativos, caracterizando assim os aspectos atuais de degradação das terras, além disso, as práticas insustentáveis realizadas por estes poucos habitantes podem ser muito danosas. A população dos dezoito municípios que estão vulneráveis a desertificação aproxima-se de 128.865 pessoas (IBGE, 2010). Estudo realizado por Becerril – Piña *et al.* (2015), utilizando um índice de impacto humano (IIH), baseado na distribuição da densidade populacional, mostrou que o IIH não influencia as categorias (alta e extrema) da desertificação, sendo as forças motrizes nessas categorias relacionadas com o impacto dos seres humanos no ambiente, através do desmatamento e das mudanças no uso da

terra.

Com base nos valores médios, o PIB está aumentando em todos os municípios, sendo mais elevado nos municípios de Monteiro, Boqueirão, Serra Branca e Sumé, que experimentaram um crescimento econômico maior (Figura 4.17). Monteiro e Sumé foram contemplados com campus de Universidades e Institutos Federais, a partir do ano de 2006, marco do despontamento econômico desses municípios, que engloba, inclusive, municípios vizinhos, como é o caso de Serra Branca. Já o município de Boqueirão, devido à existência do reservatório hídrico “Epitácio Pessoa” apresenta um desenvolvimento agrícola relevante, sustentado pela prática da irrigação.

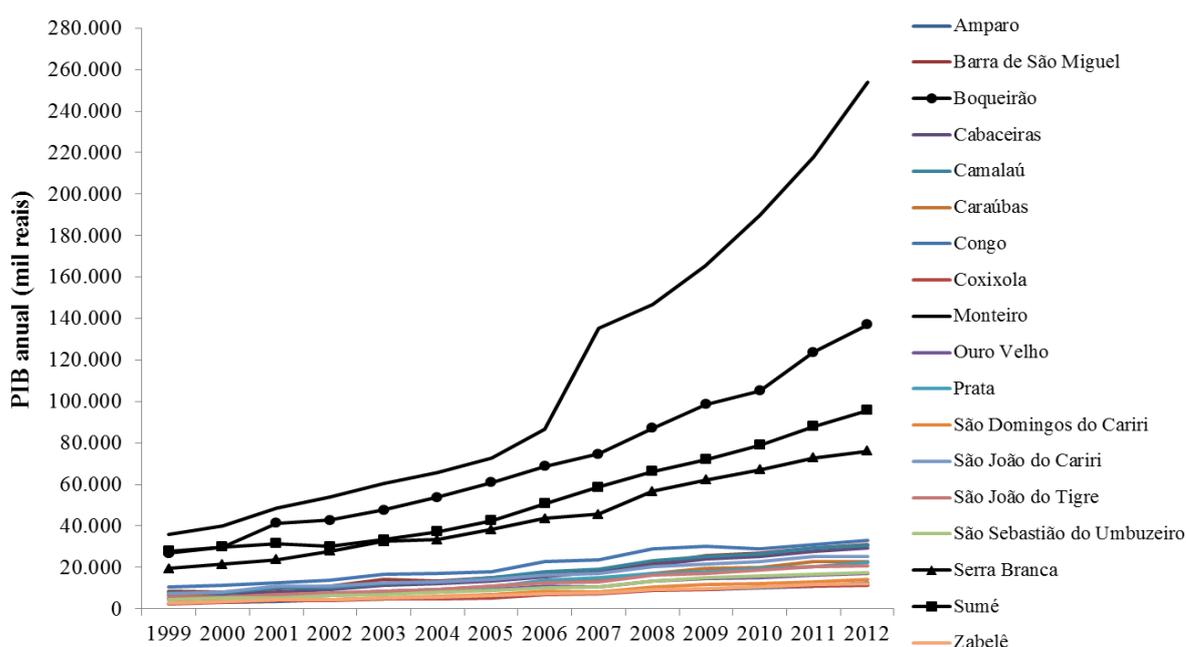


Figura 4.17: Evolução do produto interno bruto (PIB) anual dos municípios que compõem o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

O índice de desenvolvimento humano - IDH também tem apresentado evolução no período estudado, indicando melhorias nas condições de vida da população, pois agrega informações de renda, expectativa de vida e níveis de escolarização. A taxa de analfabetismo – Ta, que corresponde ao percentual de pessoas de 15 anos ou mais de idade que não sabem ler ou escrever tem diminuído. Devido aos investimentos para erradicação do analfabetismo, a população está com mais acesso à escolarização e a informação, o que pode contribuir para a conservação dos recursos naturais e conhecimento de problemas ambientais existentes, como a degradação das terras (desertificação).

Os indicadores PIB, IDH e Ta apresentam valores que mostram a evolução do desenvolvimento social e econômico na região, apesar de que, quando comparados aos

valores estaduais e nacionais, percebe-se que estes valores são muito baixos. Nesse contexto de avanço socioeconômico, a degradação das terras (desertificação) persiste. Dois fatores contribuem para explicar essa relação de melhoria dos indicadores sociais e existência e/ou permanência da degradação das terras, são eles: 1) as causas da degradação das terras são cumulativas ao longo do tempo, portanto o ambiente natural foi degradado em décadas passadas e sua recuperação é demorada; 2) nos últimos anos há um aumento de transferência direta de renda por parte do governo federal, sendo assim o incremento na economia muitas vezes não é decorrente de setores produtivos na região.

A Tabela 4.8 apresenta dados que confirmam uma redução da população rural nos municípios estudados. Observa-se que no período entre 1970 e 1980 ocorreu diminuição da população rural, certamente devido à emigração inter e intraregional, mas foi amenizada pelas altas taxas de natalidades existentes.

Segundo Costa (2006) a variação ocorrida entre 1980 e 1991 foi bem significativa e retrata o “abandono” da vida rural, que ocorreu em todo o Brasil, mas significativamente no semiárido e, particularmente na Paraíba. Três aspectos ajudam na compreensão desse fenômeno: 1) declínio da produção de algodão que ocupava mão-de-obra significativa na região, provocando ociosidade do homem do campo; 2) a crise econômica nacional iniciada em 1980, que foi considerada “a década perdida” por ter apresentado acentuada estagnação econômica e 3) as secas que assolaram a região em alguns períodos e que inviabilizaram a agricultura de subsistência.

Tabela 4.8: Evolução da população rural dos municípios que compõem o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

	1970	1980	Variação 1970-1980	1991	Variação 1980-1991	2000	Variação 1991-2000	2010	Variação 2000-2010
Amparo	-	-		-		1.267		1.026	-19,0%
Barra de São Miguel	3.923	3.863	-1,5%	3.607	-6,63%	3.082	-14,6%	3.247	5,4%
Boqueirão	21.831	21.670	-0,7%	20.157	-6,98%	4.726	-76,6%	4.882	3,3%
Cabaceiras	5.278	4.659	-11,7%	4.187	-10,13%	2.530	-39,6%	2.818	11,4%
Camalaú	4.174	4.149	-0,6%	3.559	-14,22%	3.159	-11,2%	2.862	-9,4%
Caraúbas	-	-		-		2.327		2.382	2,4%
Congo	3.117	4.452	42,8%	2.949	-33,76%	2.426	-17,7%	1.745	-28,1%
Coxixola	-	-		-		833		989	18,7%
Monteiro	16.718	15.822	-5,4%	12.397	-21,65%	11.003	-11,2%	10.591	-3,7%
Ouro Velho	1.868	1.679	-10,1%	1.231	-26,68%	918	-25,4%	881	-4,0%
Prata	3.019	2.357	-21,9%	1.377	-41,58%	1.207	-12,3%	1.410	16,8%
São D. do Cariri	-	-		-		1.409		1.386	-1,6%
São João do Cariri	6.497	5.930	-8,7%	5.320	-10,29%	2.707	-49,1%	1.997	-26,2%

São João do Tigre	3.628	4.100	13,0%	3.211	-21,68%	3.245	1,1%	2.867	-11,6%
S. S. do Umbuzeiro	4628	3096	-33,1	2070	-33,14	1085	-47,6	1138	4,9
Serra Branca	7528	9621	27,8	5947	-38,19	4326	-27,3	4555	5,3
Sumé	10278	9185	-10,6	6908	-24,79	4158	-39,8	3824	-8,0
Zabelê	-	-		-		667		603	-9,6

Em relação ao uso do solo agrícola - Usa, observa-se na Figura 4.18 um decréscimo das lavouras permanentes em torno de 51%, que são caracterizadas pelas culturas do algodão e agave. O uso do solo para lavouras temporárias também decresceu aproximadamente 43% ao longo dos anos analisados, evidenciando relativo abandono da atividade agrícola. Destaca-se que os anos de 1980-1985 apresentaram as áreas cultivadas mais elevadas, provavelmente em decorrência de anos com precipitação pluvial acima da média, como os anos de 1984 e 1985. Em 2006 a área cultivada com lavouras temporárias diminuiu para 24.389 ha, valor mais baixo da série.

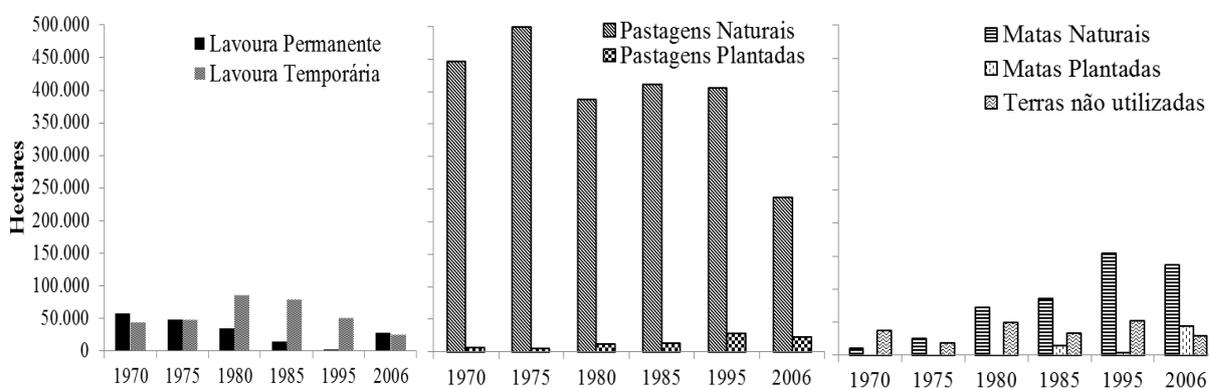


Figura 4.18: Uso do solo agrícola ao longo dos anos de 1970 a 2006 no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Costa (2006) analisando os dados do período de 1970-1995 para o Estado da Paraíba, também identificou decréscimo de 142,3% nas áreas cultivadas com lavouras permanentes e explica que este processo se deve ao declínio da atividade algodoeira, praticada na década de 1970, como lavoura permanente, pois ainda cultivava-se significativamente o algodão arbóreo.

Os dados referentes às pastagens naturais apresentaram decréscimo aproximadamente de 47% nos 36 anos da série, exceto os anos de 1985 e 1995 que apresentaram acréscimos devido às excepcionalidades climáticas favoráveis (1984/85). Em contrapartida, as áreas com pastagens plantadas aumentaram cerca de 350%. As políticas públicas destinadas ao uso do solo na região contemplaram o incremento de pastagens plantadas destinadas a pecuária, como a palma forrageira (*Opuntia sp*), lavoura xerófila exótica e indicada para as condições da região, suprimindo assim a cobertura vegetal natural.

Em relação às matas naturais observa-se que houve um aumento, decorrente das áreas que deixaram de ser cultivadas com lavouras permanentes e temporárias e que não foram utilizadas como pastagens.

Já o aumento das áreas com matas plantadas variou de 237 ha em 1970 a 44.585 ha em 2006. Foi nesse período que ocorreu a introdução da algaroba (*prosopis juliflora* sp), essência florestal exótica, que invadiu as áreas de várzeas e as margens dos cursos d'água e reservatórios, não permitindo, devido ao seu efeito alelopático, que espécies nativas típicas desses ecossistemas pudessem ocupar as áreas antes dominadas pela agricultura e/ou pecuária. No início dos anos 80, graças ao financiamento por recursos oficiais da Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), sob a égide de um “reflorestamento”, os fazendeiros desmataram áreas eliminando árvores valiosas, próprias da região, como aroeira, baraúna, angico, juazeiro, mororó, catingueira, umburana, mulungu, pau d'arco, jurema, etc., para plantação dos algarobais. Embora suas vagens sejam úteis para a alimentação animal, os algarobais absorvem muito a umidade presente no solo (Pereira, 2006; Duque, 2006).

Finalmente, sobre as terras não utilizadas, ocorreu um decréscimo de 33% no período analisado. Os anos de 1975, 1985 e 2006 tiveram menos hectares de terras em descanso/não utilizadas, certamente devido à precipitação pluvial favorável nestes anos. Conforme cita Silva *et al.* (2002) a produtividade de culturas em sistema de sequeiro é altamente dependente das interações entre suas fases fenológicas e as variações interanuais do tempo e clima. Toda cultura plantada nesse sistema depende, inevitavelmente, da quantidade, da distribuição e da intensidade das chuvas que influencia no rendimento das culturas de subsistência.

Pela Figura 4.19, observa-se que o auge da produção de algodão ocorreu nos anos de 1970 e 1975, neste último ano ultrapassou a produção de agave, declinando nos anos 80 quando surgiu uma praga danosa (bicudo - *Anthonomus grandis*), porém, a lavoura algodoeira já se encontrava em dificuldades, com baixas na produtividade e nos preços. O decréscimo da produção de algodão na região no período de 1970 a 2006 foi de quase 100%. A produção passou, nesse período, de 3.900 toneladas para 3 toneladas. O algodão desempenhou um papel relevante no processo de desenvolvimento na região do Sertão e Cariri paraibano. No semiárido paraibano as políticas modernizantes foram no sentido de estimular a pecuária em detrimento da agricultura de subsistência (Nascimento et al., 2014; Costa, 2006).

Segundo Pereira & Pereira (2012) a partir da década de 40 do século XX passava a ser explorado na Caatinga o sisal ou agave, planta de origem exótica e que praticamente extinguiu a atividade caroezeira. É que o sisal se apresentou como uma lavoura muito mais produtiva e

de melhor fibra. No entanto, para seu cultivo também foram desflorestados milhares de hectares. Por ocasião do advento, popularização e barateamento das fibras sintéticas, a exploração do sisal entrou em decadência e milhares de hectares foram abandonados.

A produção de sisal (Figura 4.19) superou significativamente a de algodão nos anos de 1970, 1980 e 1985. Ressalta-se que houve um decréscimo na produção do sisal em torno de 97% no período de 1970 a 2006, que pode ser atribuído às limitações de mercados internacionais bem como a crescente concentração dessa produção no Estado da Bahia.

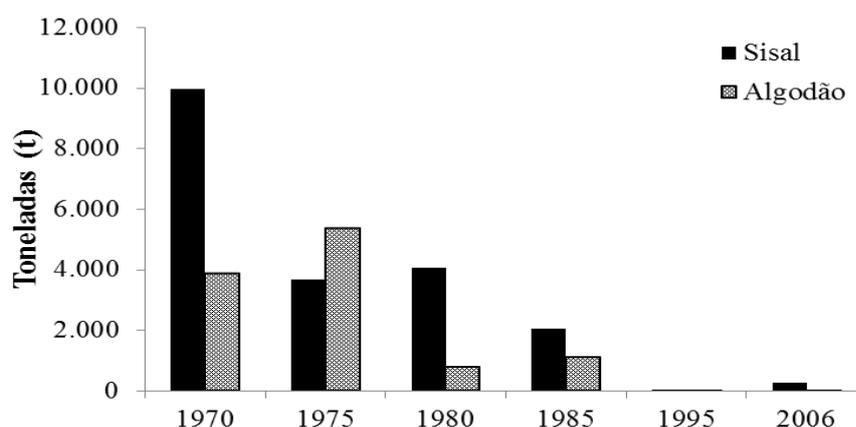


Figura 4.19: Produção de cultivos comerciais (algodão - herbáceo e arbóreo e sisal - fibra e folha) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Em relação à produção das principais lavouras de subsistência, observa-se na Figura 4.20 que houve um aumento na produção de aproximadamente 286% para a cultura do feijão, 235% para a mandioca e 313% para o milho. É interessante observar que, mesmo com a redução das áreas destinadas às lavouras temporárias ao longo desse período, a produção aumentou. Isto se explica, em partes, pelo fato do ano de 1970, início da série, ter sido um ano seco, com precipitações médias em torno dos 250 mm e o ano de 2006 um ano chuvoso, com precipitações acima da média para a região. Além disso, na última década, houve um incremento em termos de modernização agrícola na região, por meio da utilização mais intensiva de tratores, adubos e defensivos químicos, distribuição de sementes, presença de assistência técnica, através da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER), dentre outras medidas.

Os anos de 1970 e 1980 foram considerados anos secos, com baixas precipitações pluviais, isso explica a baixa produção das lavouras temporárias nesses períodos. Registros indicam que a seca de 1979 se estendeu até 1983 em alguns municípios do semiárido paraibano, prejudicando consideravelmente o rendimento agrícola. Estas secas aconteceram após a criação da SUDENE, ocorrida em 1959, cujas medidas tomadas para conter os seus efeitos foram: criação de frentes de emergência, redução de cota de exportação de torta para

gado, reescalonamento de dívidas dos fazendeiros com os bancos e liberação de crédito especial para melhorar a infraestrutura das propriedades e reter a mão-de-obra nas fazendas (TARGINO & MOREIRA, 2006).

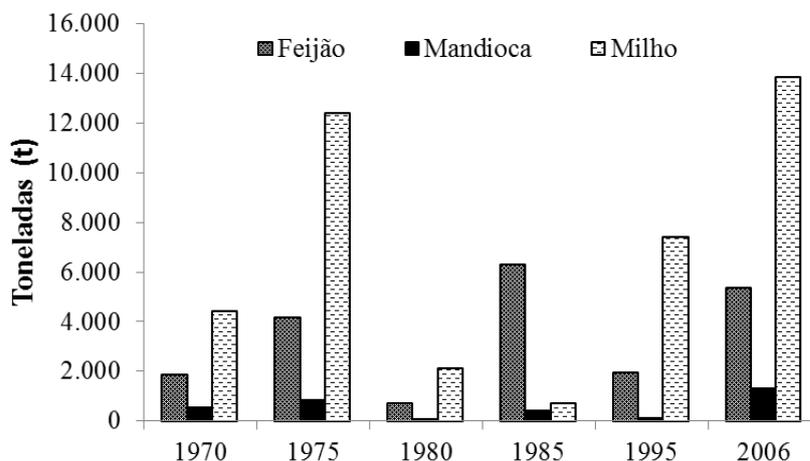


Figura 4.20: Produção das principais culturas de subsistência no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

A pecuária – Pa, praticada na modalidade extensiva, historicamente adotada na região em estudo, tem sido apontada como desencadeadora e intensificadora da desertificação, pois os rebanhos, com destaque para o caprino, se alimentam da vegetação nativa durante todo o ano. Além disso, o pisoteio dos animais, principalmente de gado bovino, tem compactado o solo, dificultando a infiltração de água e o desenvolvimento das raízes das plantas. A Figura 4.21 evidencia a evolução dos rebanhos na região. De modo geral, observa-se um declínio dos rebanhos ovinos e bovinos a partir do ano de 1998. Em contrapartida, o rebanho caprino cresceu ao longo de quase todo o período. Nos anos de 1983, 1993, 1998 e 2012 são identificadas reduções dos rebanhos bovino, ovino e caprino, exatamente nesses anos houve secas na região. Isso ocorre porque a forma de alimentação prioritária dos rebanhos é a vegetação natural, que por sua vez está condicionada a ocorrência de chuvas. A palma e as vagens das algarobas obtidas nas propriedades são estrategicamente utilizadas no período não chuvoso, porém, com o prolongamento da estiagem, outras rações têm que ser compradas para alimentar os rebanhos (cama de galinha, bagaço de cana-de-açúcar, farelo de trigo/milho, etc.).

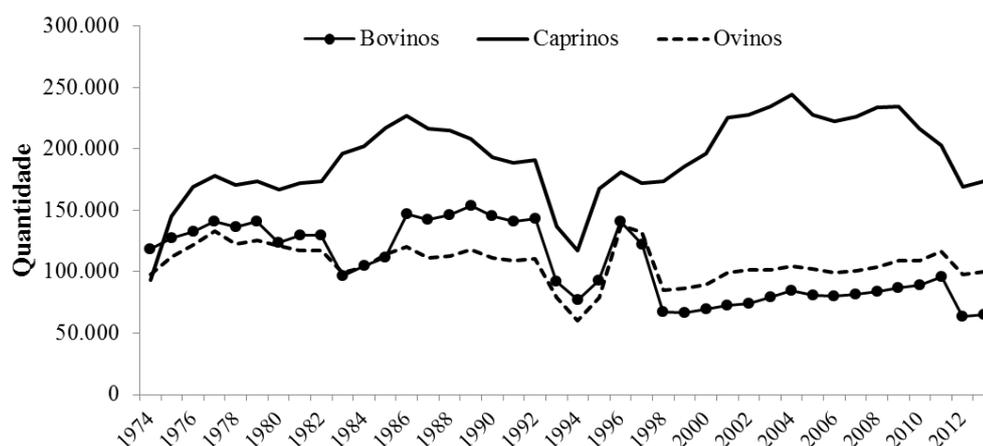


Figura 4.21: Evolução da pecuária no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, período de 1974 a 2014.

A expansão da atividade criatória a partir da década de 70 contou com o crédito subsidiado, com juros baixos e longo período de carência. O Banco do Brasil, o Banco do Nordeste e o antigo Banco da Paraíba (Paraiban), foram os principais agentes da política de crédito e de financiamento no Estado, através de recursos oriundos de bancos estrangeiros. Assim, os rebanhos cresceram em todo o Estado, e a região do Cariri afirmou sua especialização na produção de caprinos e ovinos, onde o aumento do efetivo animal foi da ordem de 50% na maioria dos municípios que a compõem. A melhoria no desempenho da atividade pecuarista ocorreu devido às mudanças no padrão alimentar, com aumento de pastagens plantadas, aumento da palma forrageira, introdução da algaroba e uso de rações adquiridas fora das propriedades. Além disso, o cercamento das terras que propiciou o rodízio das pastagens, a menor sujeição às irregularidades climáticas e o menor coeficiente de mão de obra, são também outros fatores que impulsionaram a atividade e são detalhados por Moreira & Targino (1997). É preciso ressaltar que a diversificação nas pastagens dos rebanhos provocou elevado desmatamento da vegetação nativa.

Costa (2006) afirma que a inviabilidade econômica da policultura de subsistência favoreceu a pecuária, que requer mais e mais terras para o pastoreio do rebanho, realizado de forma extensiva. O manejo orientado pelos órgãos financiadores desta prática não considerou a vegetação nativa.

Em 1999 teve início o Pacto Novo Cariri, compromisso formulado pela sociedade civil, iniciativa privada e poder público, para promover o desenvolvimento sustentável da região via formação de parcerias e gestão compartilhada de ações e atividades (COSTA & FERREIRA, 2010). Este pacto elegeu a caprinocultura como prioridade regional e por meio do Programa de Desenvolvimento Integrado e Sustentável do Cariri – PROCARIRI houve o

fortalecimento da cadeia produtiva da caprinocultura, com o beneficiamento do leite (fabricação de produtos lácteos), da pele e da carne.

Souza *et al.* (2010) afirmam que a capacidade de suporte das caatingas para a criação de caprinos ainda é pouco estudada e, tanto a taxa de lotação média aconselhada como a existente nessa região, fazem parte de uma estimativa generalista para um tipo de vegetação que apresenta grande diversificação, particularmente na densidade e no porte das espécies, e que encontra-se com níveis de degradação muito elevados.

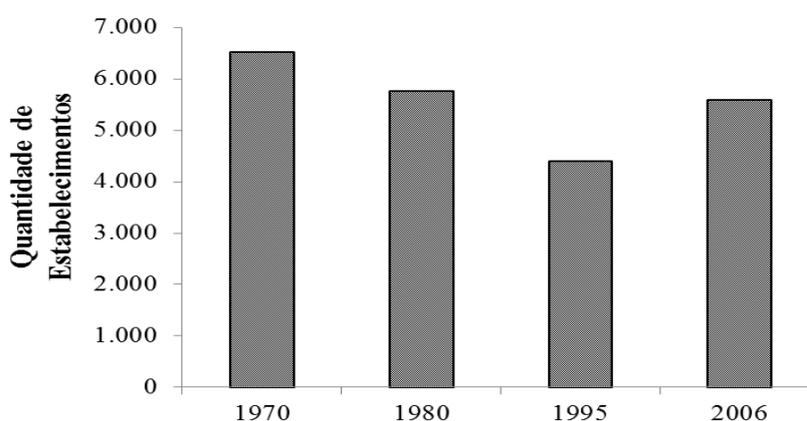
Outra variável importante na caracterização do processo de degradação das terras (desertificação) é a estrutura fundiária. As pequenas propriedades rurais, decorrentes de projetos de assentamentos de reforma agrária (PA's) mal planejados e muitas vezes em áreas que apresentam degradação das terras, não permitem ao produtor rural estratégias de conservação dos recursos naturais, contribuindo assim para a acentuação desse processo, conforme detalha Pereira (2008). Com isso, não se faz uma defesa das grandes propriedades ou uma alusão positiva ao latifúndio, mas, destacam-se as dificuldades de manejar com racionalidade uma propriedade muito pequena, por exemplo, de um módulo fiscal (55 hectares), medida de referência para a maioria dos municípios do Cariri paraibano. Observa-se na Tabela 4.9, que aproximadamente 4.675 hectares do município de Monteiro foram desapropriados para fins de projetos de assentamento, 3.085 hectares do município de Camalaú, e 6.749 hectares do município de Sumé. Além dos PA's, outro motivo que tem contribuído para o processo de "minifundização" na região é a hereditariedade da titularidade das terras, que antes pertenciam a um patriarca e que, por motivos de herança, a propriedade é desmembrada em terrenos menores, que passam a ser utilizados de forma mais intensiva.

Tabela 4.9: Demonstrativo dos projetos de assentamento (PA) nos municípios que compõem o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

PA	Município	Data de criação	Área		
			desapropriada em hectares	Nº de famílias	hectares/família
Santa Catarina	Monteiro	1993	3.600	320	11,3
Estrela D'Alva	S. S. do Umbuzeiro	1997	5.271	53*	99,5
Novo Mundo	Camalaú	1997	2.081	87	23,9
Mandacaru	Sumé	1999	4.392	160	27,5
Beira Rio	Camalaú	1999	483	35	13,8
Dos 10	S. S. do Umbuzeiro/Monteiro	1999	2.154	120	18,0
Renascer	Prata	1993	900	45	20,0
Eldorado dos Carajás	Camalaú	2000	521	20	26,1
Serrote Agudo	Sumé	2001	2.357	86	27,4
Serra do Monte	Cabaceiras	1999	5.831	170**	34,3
Boa Vista I	Coxixola	1999	1.730	40	43,3
Pinheiros	Coxixola	1999	1.444	30	48,1
Asa Branca	Coxixola	1999	1.905	50	38,1
Total	7		32.669	1216	

Fonte: Pereira (2003). * Nos dados do INCRA-PB constam 70 famílias. **A realidade é de 101 famílias.

Ademais, os assentamentos, em sua maioria, ocorreram após o ano de 1995, razão pela qual houve um aumento de 22% na quantidade dos estabelecimentos com menos de 10 hectares no ano de 2006, conforme Figura 4.22. Em 1970 e 1980 havia uma quantidade considerável de pequenas propriedades, pois a terra é historicamente muito concentrada nessa região, de modo que as famílias de baixo poder aquisitivo detinham pequenas propriedades rurais.

**Figura 4.22:** Quantidade de estabelecimentos agropecuários com menos de 10 hectares no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

Os assentamentos descritos na Tabela 4.9 têm área inferior à recomendada (Duarte, 2002) intensificando-se o uso das terras. Moreira & Targino (1997) destacam que o aumento de conflitos agrários e a solução de vários deles, via desapropriação e compra de propriedades efetuadas pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), sobretudo a

partir de 1993, e o assentamento de trabalhadores, contribuiu para o aumento das pequenas propriedades.

O módulo fiscal serve de parâmetro para classificação do imóvel rural quanto ao tamanho, na forma da Lei nº 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, que indica: Minifúndio – com tamanho de até um módulo fiscal; Pequena propriedade - o imóvel rural de área compreendida entre 1 (um) e 4 (quatro) módulos fiscais; Média propriedade - o imóvel rural de área superior a 4 (quatro) e até 15 (quinze) módulos fiscais - acima de 240 e até 900 ha e Grande propriedade – acima de 15 (quinze) módulos fiscais. O módulo fiscal nos municípios do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba é de 55 e 60 hectares (INCRA, 2003; LANDAU *et al.* 2012). Assim, a área de estudo apresentou 10.456 minifúndios em 1970, 14.023 em 1975, 10.008 em 1980, 14.063 em 1985, 7.813 em 1995 e 9.452 em 2006.

Os recursos florestais são, geralmente, os primeiros a ser explorados pelos assentados, assumindo importante papel no contexto econômico e social desses projetos. Seus produtos constituem, além de fonte de energia primária, um importante complemento de renda, conforme Francelino *et al.* (2003). Estes autores ressaltam que as condições de semiáridade devem ser um fator relevante no momento de definir o tamanho dos lotes individuais nos assentamentos.

Considerando a quantidade (QTD) de estabelecimentos agropecuários na região, e com base nos censos agropecuários realizados pelo IBGE e nas estatísticas cadastrais do INCRA, observa-se (Figura 4.23) que os grandes estabelecimentos representam uma pequena proporção do total, mas concentram a maioria das terras. No ano de 1970, por exemplo, 2% dos estabelecimentos acima de 500 hectares concentravam 41% do total das terras, enquanto que 52% dos estabelecimentos com menos de 10 hectares concentravam apenas 5% do total das terras (área) na região. Depreende-se ainda que o quadro de distribuição das terras pouco se alterou ao longo dos anos analisados. O ano de 2006 apresenta a menor concentração de terras do período, em decorrência das desapropriações para realizações de assentamentos rurais.

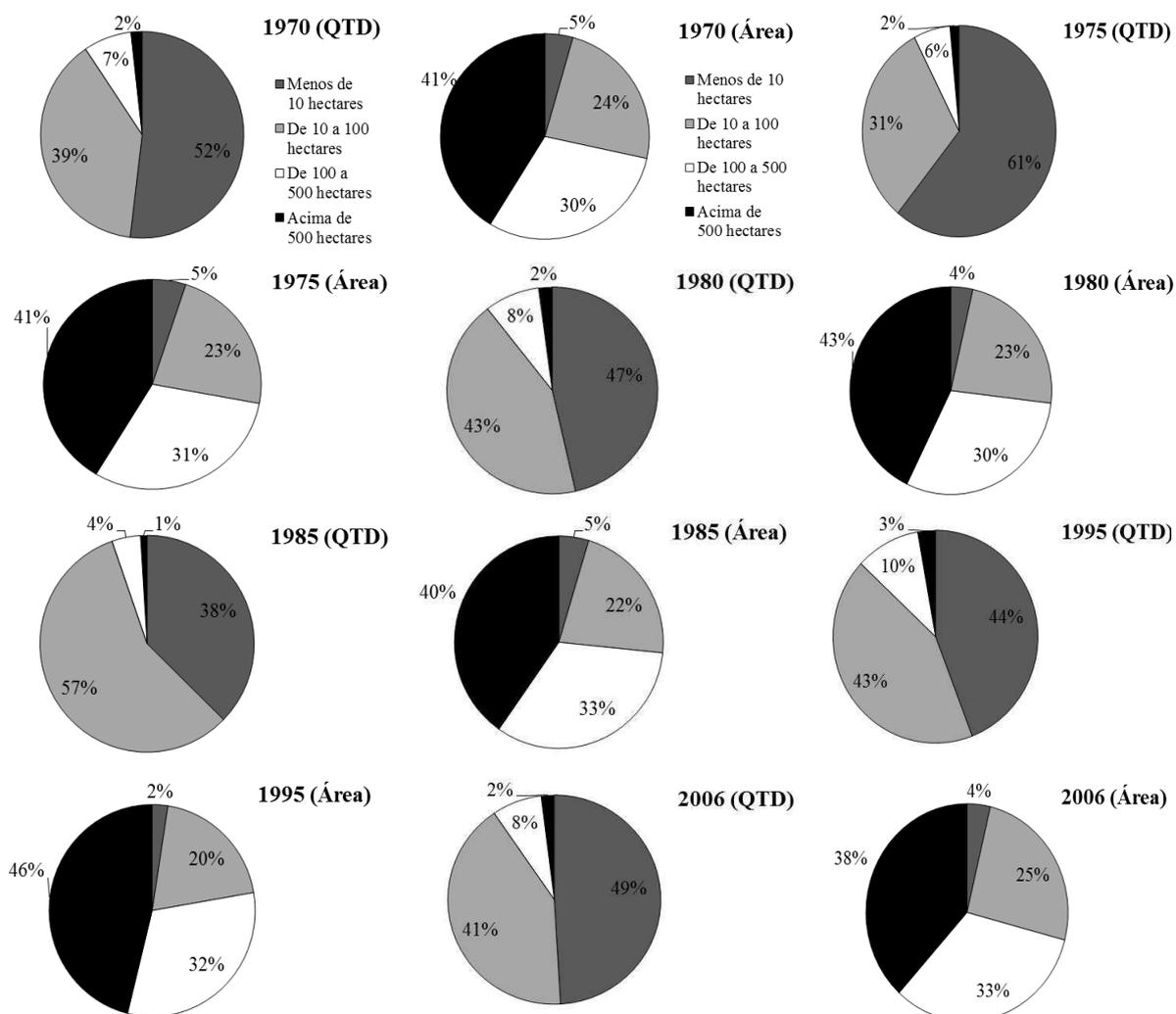


Figura 4.23: Percentual da quantidade (QTD) e da área dos estabelecimentos agropecuários no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba no período de 1970 a 2006.

O termo “estabelecimento agropecuário” foi adotado por ser a terminologia mais recente utilizada pelo IBGE e porque corresponde a todo terreno de área contínua, independentemente do tamanho ou situação (urbana ou rural), formado de uma ou mais parcelas, subordinado a um único produtor, onde se processa uma exploração agropecuária, ou seja: o cultivo do solo com culturas permanentes e temporárias, inclusive hortaliças e flores; a criação, recriação ou engorda de animais de grande e médio porte; a criação de pequenos animais; a silvicultura ou o reflorestamento; e a extração de produtos vegetais (IBGE, 2006).

Na Figura 4.24 constam os valores correspondentes à extração vegetal nas duas últimas décadas. Nota-se que a produção de carvão vegetal decresceu muito na região, de 5.529 toneladas em 1990 para 252 em 2013. Em relação à exploração da lenha houve um pico de exploração no período de 1998 a 2001, cuja média de produção foi 155.688 m³. Este pico coincide com a divulgação da Instrução Normativa n. 01/1998 do Instituto Brasileiro do Meio

Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), que disciplinou a exploração sustentável da vegetação nativa e suas formações sucessoras na região Nordeste. A instrução permitia a supressão de floresta exótica e nativa, contanto que não pertencesse a áreas de preservação permanente (APP's) e de reserva legal (RL). Além disso, a grave seca de 1998 e 1999 pode ter contribuído para um uso mais acentuado dos recursos vegetais.

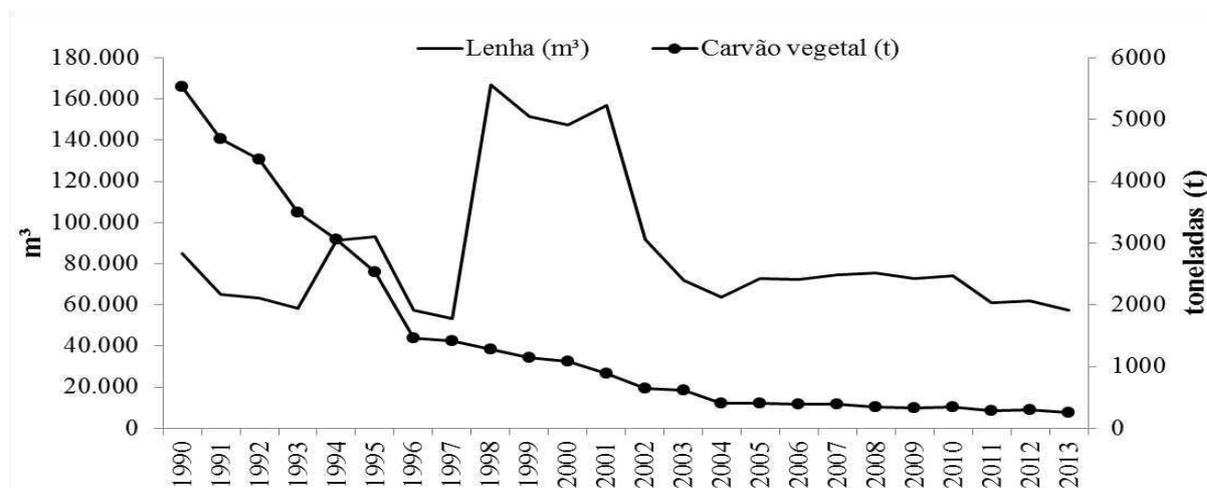
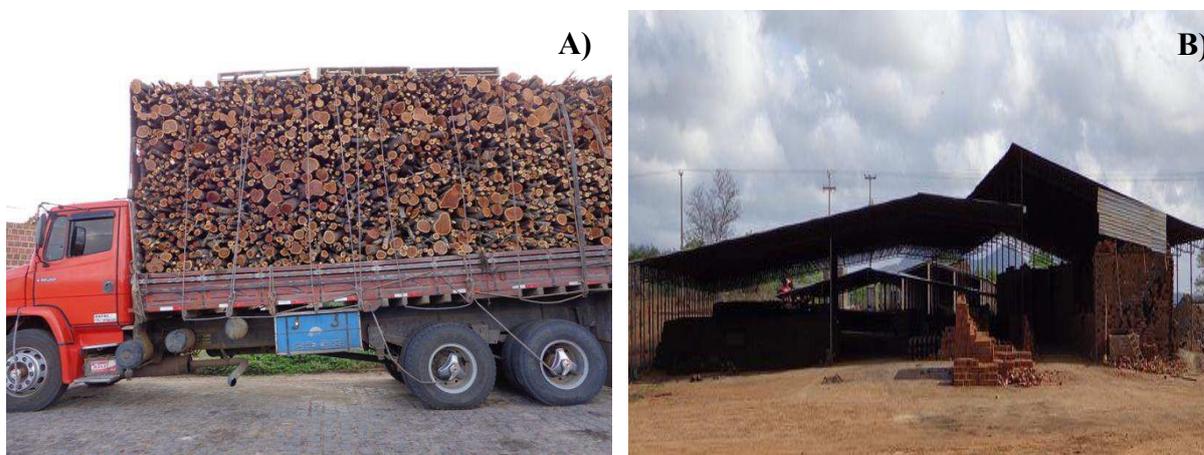


Figura 4.24: Extração de lenha e produção de carvão vegetal na região do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba no período de 1990-2013.

Cunha & Silva (2012) citam que instrução normativa posterior (n. 08/2004) isenta da apresentação de projeto e de vistoria técnica o plantio e a condução de espécies, nativas plantadas e exóticas, com a finalidade de produção e corte, em áreas de cultivo agrícola e pecuária, alteradas, subutilizadas ou abandonadas, localizadas fora das APP's e RL. Mas para a exploração de espécies nativas plantadas, a mesma instrução normativa, nos seus artigos 2º, 3º e 4º, exige alguns procedimentos e requisitos formais, como a prestação de informações ao IBAMA e ao órgão ambiental estadual (dados da propriedade e do proprietário, laudo técnico que ateste a existência prévia de plantio) e a solicitação de autorização de transporte de produtos florestais. O artigo 5º, porém, isenta da apresentação das informações de corte previstas neste ato normativo os detentores de espécies florestais exóticas alóctones plantadas que queiram explorá-las. Cunha & Silva (2012) ainda relatam que técnicos do IBAMA e da Superintendência de Administração do Meio Ambiente da Paraíba (SUDEMA) entrevistados durante a realização da pesquisa afirmaram que, sendo a algaroba uma espécie invasora, representa uma ameaça à Caatinga. E, assim, o corte e transporte da algaroba estariam completamente liberados, dispensando qualquer documentação, guia ou aprovação de plano de manejo.

O uso da vegetação é uma alternativa econômica para a população dessa região. A exploração da madeira, particularmente das algarobas, destina-se a produção de lenha para

fornos de padarias e olarias (Fotografias 4.3), bem como para a produção de carvão vegetal e ainda estacas e mourões para fins diversos. Grande parte dessa produção vegetal é comercializada em centros maiores, como Campina Grande e João Pessoa, e também com estados vizinhos, como Pernambuco, conforme relata Travassos & Souza (2014).



Fotografia 4.3: Aspectos da exploração vegetal no município de Sumé - PB. A) Caminhão transportando lenha; B) Olaria. Trabalho de campo realizado em dezembro de 2014.

Sabe-se que os projetos de disseminação da algaroba tiveram dois objetivos principais: servir de alimentação para os rebanhos, através da vagem, rica em proteínas e nutrientes e promover a cobertura de áreas desnudas. Porém, com a retirada intensa desta espécie, extingue-se uma fonte de alimentação animal e o mais grave, deixa-se o solo exposto às intempéries climáticas, especialmente em áreas de mata ciliar, que deveriam estar cobertas por espécies nativas. Além de extinguir mudas de espécies nativas por ocasião da derrubada e arraste das toras, além da circulação de pessoas e veículos. Por outro lado, não se pode negar os ganhos econômicos com a pequena cadeia produtiva formada nesse tipo de exploração. Existem relatos de proprietários que em áreas de até cinco hectares conseguiram levantar um capital aproximado de 15 mil reais sem custos de produção, no ano de 2009 (CUNHA & SILVA, 2012).

4.6.2. Comportamento do índice socioeconômico geral de cada município

O índice socioeconômico geral por município (Ise_m) e sua relação com a degradação das terras (desertificação) está evidenciado na Figura 4.25. Observa-se que os municípios de Boqueirão e Monteiro apresentaram situação de degradação “Crítica”, “Acentuada” e “Moderada” ao longo do período estudado, enquanto que os municípios de Cabaceiras, Congo e São João do Cariri apresentaram situação de “Baixa” degradação e os demais municípios apresentaram diferentes situações ao longo dos anos. Os anos com Ise_m menos elevados, indicando mais degradação, foram 1980 e 1985, como consequência da ocorrência do período

seco de 1979 a 1984, que prejudicou as atividades agropecuárias, obtenção de lucros, etc. Já os valores mais elevados ocorreram no ano de 2006, quando não houve registros de adversidades climáticas.

Em relação aos valores médios dos indicadores, observa-se que dos dezoito municípios estudados, sete foram classificados com degradação “Moderada”, são eles: Zabelê (0,480), Monteiro (0,453), Prata (0,582), Ouro Velho (0,571), Amparo (0,565), Sumé (0,584), Serra Branca (0,596); dez municípios apresentaram “Baixa” degradação das terras: São Sebastião do Umbuzeiro (0,613), São João do Tigre (0,618), Camalaú (0,622), Congo (0,627), Coxixola (0,643), Caraúbas (0,693), Barra de São Miguel (0,628), São João do Cariri (0,652), São Domingos do Cariri (0,638) e Cabaceiras (0,662), e apenas Boqueirão (0,306) apresentou situação de “Acentuada” degradação das terras. Os valores médios do Ise_m revelam que está havendo degradação das terras em toda a bacia, porém em níveis Moderados e Baixos predominantemente, e na porção noroeste da bacia hidrográfica, bem como no município de Boqueirão, a pressão antrópica é maior.

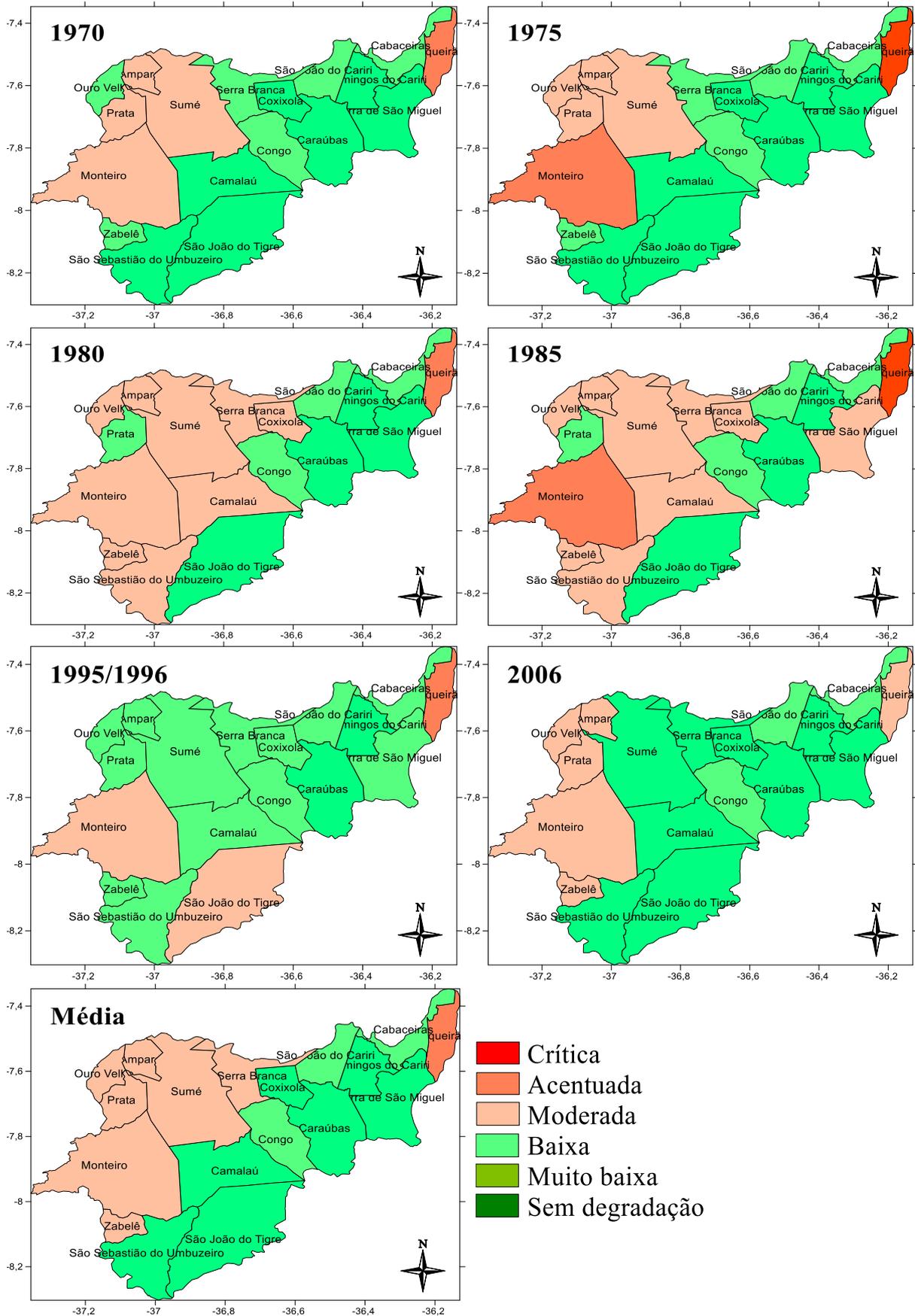


Figura 4.25: Espacialização do índice socioeconômico geral por município (Ise_m) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2006.

4.6.3 Evolução temporal do índice socioeconômico no alto curso da bacia hidrográfica Rio Paraíba

Na Figura 4.26 observa-se a evolução do índice socioeconômico (Ise_b) para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba e sua relação com a degradação das terras (desertificação), no período de 1970 a 2006. Há uma tendência de aumento desse índice, com valor médio que indica uma situação de degradação “Moderada” das terras na bacia, ou seja, o crescimento econômico ocorrido na região ao longo dos anos está promovendo uma degradação Moderada.

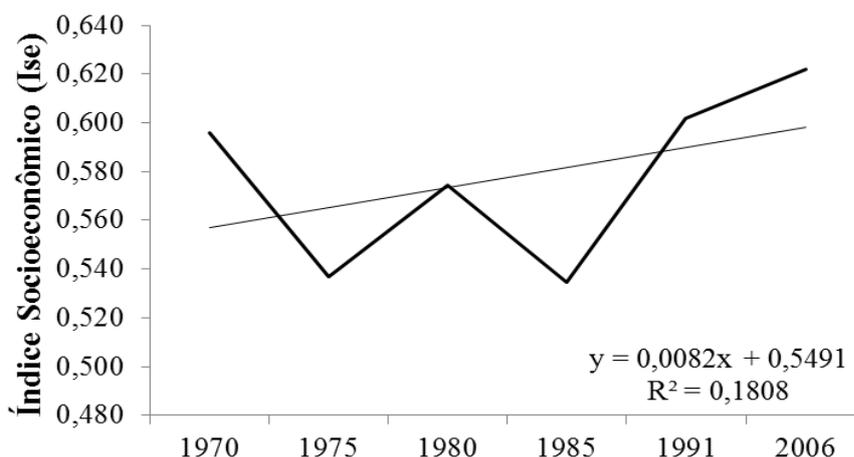


Figura 4.26: Evolução do índice socioeconômico (Ise_b) para todo o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2006.

Nos anos de 1970, 1975, 1980 e 1985 a situação de degradação das terras relacionada à pressão antrópica foi “Moderada”. Em 1995/1996 e 2006 a situação foi de “Baixa” degradação das terras. Tal fato pode estar associado a melhorias nas condições de vida da população, incluindo redução nas taxas de analfabetismo, ampliação na transferência direta de renda promovida pelo governo federal, diminuição da agricultura de subsistência e da população rural, dentre outros.

4.7. Medidas de mitigação do processo de degradação das terras

Discutidas as causas e consequências da degradação das terras (desertificação) que orientam para um diagnóstico de áreas comprometidas com o problema ambiental da degradação das terras (desertificação), é importante relacionar as medidas identificadas na literatura para mitigação dos efeitos, apesar de não haver consenso estabelecido sobre métodos adequados de acompanhamento e avaliação dessas medidas de avaliação.

Mesmo que a desertificação seja muitas vezes considerada como uma transição irreversível (pelo menos no prazo de algumas gerações humanas), podem ser adotadas

algumas medidas para reverter esse processo antes que o sistema atinja o estado "desertificado" (ODORICO *et al.*, 2013).

O Pan – Brasil (2004) apresenta capítulo específico relacionado ao “combate da desertificação”, o qual elenca importantes acontecimentos e contribuições que ampliaram, gradativamente, o grau de consciência e o número de atores institucionais envolvidos na temática do processo de desertificação e na necessidade de promover o seu combate. Faz menção também as ações importantes que estão sendo realizadas em caráter regional, mas com pouca articulação, bem como a necessidade de um programa específico de recuperação de áreas degradadas.

Também o PAE-PB (2011), em seu segundo capítulo, “ações e iniciativas em curso no combate à desertificação e a mitigação dos efeitos da seca no Estado da Paraíba” apresenta iniciativas governamentais. Estas iniciativas estão associadas aos programas sociais, principalmente de distribuição e transferência de renda e aqueles voltados para a agricultura. São programas gerais, que não foram pensados para resolver especificamente o problema da desertificação, voltados em muitos casos para mitigar os efeitos da seca. Mas, todas as iniciativas que elevam a qualidade de vida das populações vulneráveis à desertificação são louváveis.

Com base na definição para “combate a desertificação” apresentada pela Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca, instituída em 30 de junho de 2015, que refere-se a um conjunto de atividades de recuperação ambiental e socioambiental com o uso sustentável dos recursos naturais nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, com vistas ao desenvolvimento equilibrado, observa-se que, na prática, as atividades voltadas para a recuperação ambiental são mínimas, agravando-se cada dia mais a situação dos recursos naturais na região semiárida brasileira.

Odorico *et al.* (2013) analisando vários estudos de caso, divide as soluções para o problema da desertificação em biofísicas e socioeconômicas (Quadro 4.1). As soluções biofísicas envolvem o controle da erosão, remediação da salinidade, manejo do pastoreio, introdução de novas variedades de culturas, melhoria dos sistemas de irrigação existentes, introdução de novas tecnologias de irrigação, dentre outras soluções. As soluções socioeconômicas estão relacionadas às iniciativas políticas de mobilização popular e gestão pública, no sentido de conscientização de pessoas, melhoria da qualidade de vida e atuação preventiva de riscos e desastres.

Quadro 4.1: Soluções biofísicas e socioeconômicas para mitigar o problema da degradação das terras (desertificação).

<p>Soluções biofísicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Restauração da produtividade do solo em áreas agrícolas rurais, com a adição de resíduos de culturas, deixando áreas no campo de pousio, acrescentando esterco animal, restaurando a cobertura de vegetação nativa e controlando a erosão do solo; • Métodos de conservação do solo, controle (muros baixos, vegetação ou barreiras) de pequenas estruturas de erosão hídrica (voçorocas); • Controle da erosão eólica por cobertura morta com resíduos de colheitas e criação de quebra ventos de vegetação tem sido utilizado para aumentar significativamente o rendimento das colheitas; • Coleta de água da chuva e novas tecnologias, como a irrigação por gotejamento e sistemas de bombeamento de água usando energia solar como uma estratégia para aumentar a segurança alimentar e a redução da pobreza, bem como para melhorar as condições hidrológicas (por exemplo, a infiltração e a recarga de água do solo); • Projetos de restauração da vegetação em paisagens desnudas visando à regeneração das pastagens, evitando a erosão do solo; • Gestão do pastoreio e controle da mobilidade do gado; • Remoção de animais em áreas de pastagem por um longo período de tempo para conduzir ao aumento de nutrientes e infiltração do solo; • Alerta precoce de potenciais secas; • Cultivo de árvores tolerantes a salinidade para fornecer bio-drenagem; • Utilização de sistemas de drenagem para reduzir a quantidade de água que se infiltra abaixo da zona de enraizamento, para sistemas afetados pela água subterrânea associada à salinidade; • A lixiviação dos sais acumulados na zona de enraizamento; • Aplicação de gesso e/ou cal para correção de solos sódicos e ácidos; • Fitoremediação como mecanismo eficaz para reduzir a sodicidade do solo.
	<ul style="list-style-type: none"> • Participação dos atores sociais, ou seja, das pessoas diretamente relacionadas com o problema da desertificação;

Soluções socioeconômicas	<ul style="list-style-type: none"> • Melhoria do bem-estar econômico e social das comunidades rurais, de forma sustentável; • Utilização sustentável dos recursos naturais por meio de incentivos econômicos, visando investimentos públicos e privados de longo prazo, promovendo a diversificação de renda e sustento; • Integração do conhecimento local e práticas de conservação dos recursos naturais realizadas por comunidades tradicionais; • Integração do conhecimento local e científico para a adaptação às mudanças e reversão de situações de degradação; • Implementação de medidas preventivas eficazes contra riscos e desastres, e não apenas medidas paliativas.
---------------------------------	---

Fonte: Adaptado de Odorico *et al.* (2013)

Araujo *et al.* (2014) apresentam procedimentos e técnicas para a revegetação em áreas degradadas. A análise do clima, estoques de sementes, preparação do local, e também o conhecimento de obstáculos a esta prática permitem o alcance de um resultado satisfatório. Os autores destacam ainda algumas técnicas de bioengenharia, nas quais plantas e partes de plantas são arranjadas no solo, em padrões e configurações especiais e agem como reforço para o solo, concentrando umidade, formando drenos hidráulicos e dificultando o movimento de terra.

Com linguagem simples e acessível, no sentido das soluções propostas, Nascimento (2013) apresenta os “Dez mandamentos para a proteção da natureza do Padre Cícero Romão Batista”, os quais têm embasamento científico:

1. Não derrube o mato, nem mesmo um só pé de pau;
2. Não toque fogo no roçado nem na caatinga;
3. Não cace mais e deixe os bichos viverem;
4. Não crie o boi nem o bode soltos; faça cercados e deixe o pasto descansar para se refazer;
5. Não plante em serra acima, nem faça roçado em ladeira muito em pé: deixe o mato protegendo a terra para que a água não a arraste e não se perca a sua riqueza;
6. Faça uma cisterna no oitão de sua casa para guardar água da chuva;
7. Represe os riachos de cem em cem metros, ainda que seja com pedra solta;
8. Plante cada dia pelo menos um pé de algaroba, cajú, de sabiá ou outra árvore qualquer, até que o sertão todo seja uma mata só;
9. Aprenda a tirar proveito das plantas da caatinga, como a maniçoba, a favela e a

jurema; elas podem ajudar você a conviver com a seca;

10. Se o sertanejo obedecer a estes preceitos, a seca vai aos poucos se acabando, o gado melhorando e o povo terá sempre o que comer. Mas, se não obedecer, dentro de pouco tempo o sertão todo vai virar um deserto só.

Diante das considerações sobre a degradação das terras (desertificação) considera-se que qualquer programa de combate à desertificação passa pela luta contra a degradação dos recursos naturais e pela ampliação das práticas socioeconômicas sustentáveis.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclusões

A avaliação do nível de degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, por meio de uma análise sistêmica contemplando variáveis climáticas, biofísicas e socioeconômicas, permite concluir que:

- 1) na bacia hidrográfica como um todo, há um aumento na precipitação e redução da aridez durante o período estudado (1950–2013). Pode-se inferir que estas condições não contribuem para desencadear o processo de degradação das terras (desertificação), sugerindo que as causas desse problema ambiental não são climáticas. Assim, entende-se que as manifestações observadas de degradação das terras são decorrentes de outros fatores, tais como as atividades humanas que degradam o solo e a vegetação. Portanto, um dos aspectos mais importantes deste estudo é a análise do componente "variações climáticas", por meio da precipitação pluvial e do índice de aridez sobre o processo de degradação das terras (desertificação) em escala de bacia hidrográfica;
- 2) há uma tendência de acréscimo da aridez e decréscimo das chuvas na porção central da bacia, com núcleo mais forte na localidade de Camalaú. Ao contrário, na porção norte, há um acréscimo na precipitação e decréscimo na aridez. Esses resultados precisam ser confrontados com informações sobre o uso do solo na bacia hidrográfica, para identificar as possíveis causas dessa variação.
- 3) a precipitação média anual aumenta na direção nordeste-noroeste da bacia, com mínimo (320 mm) em Cabaceiras e máximo (680 mm) nas localidades de Ouro Velho e Prata; A bacia hidrográfica é classificada como árida, região de alta susceptibilidade ao processo de degradação das terras. Os núcleos com aridez mais elevada correspondem às localidades de Cabaceiras, Caraúbas e São João do Cariri.
- 4) O albedo da superfície e o índice de vegetação ajustado ao solo têm seus valores influenciados pela sazonalidade climática da região, principalmente da precipitação pluvial, responsável pelo aumento do índice de vegetação e diminuição do albedo da superfície, considerando-se que estas duas variáveis têm comportamento inverso.
- 5) a porção central da bacia hidrográfica (municípios de Congo, Camalaú e Caraúbas) apresenta baixo índice de vegetação e elevado albedo da superfície, caracterizando o núcleo do processo de degradação das terras e que precisa ser mais bem investigado, sobretudo do ponto de vista dos usos antrópicos que se faz dos recursos naturais na região.
- 6) ao longo do período analisado (2000-2013), ambas as variáveis (índice de vegetação e

albedo da superfície) apresentaram tendência decrescente, mas não significativas ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, evidenciando um aumento pouco significativo da degradação das terras.

- 7) em relação ao índice socioeconômico geral de cada município - Ise_m observa-se que dos dezoito municípios estudados, sete apresentam degradação “Moderada”, dez “Baixa” degradação e apenas o município de Boqueirão apresenta situação de “Acentuada” degradação das terras. Os valores médios do Ise_m revelam que está havendo degradação das terras em toda a bacia, porém em níveis Moderados e Baixos, sendo a porção noroeste da bacia a área com maior pressão antrópica.
- 8) há uma tendência de aumento do índice socioeconômico na bacia hidrográfica - Ise_b , com valor médio que indica uma situação de degradação “Moderada” das terras, resultante do crescimento econômico ocorrido na região ao longo dos anos. Esse aumento do Ise_b pode estar associado a melhorias nas condições de vida da população, redução das taxas de analfabetismo, ampliação da transferência direta de renda promovida pelo governo federal, redução no uso das terras para fins agrícolas, dentre outras.

Considerações finais

No alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba as ações antrópicas devem ser bem planejadas para evitar a degradação das terras. Os resultados apresentados neste estudo oferecem subsídios para mitigação dos impactos das intervenções e pressões antrópicas, principalmente nos períodos da estação seca, em que a vegetação perde suas folhas e o solo fica desprotegido, visando à conservação dos recursos naturais. Portanto, a avaliação realizada neste estudo confirma que a hipótese do estudo está em concordância com os dados disponíveis, demonstrando que as condições climáticas não estão causando o processo de degradação das terras. Por outro lado, as ações antrópicas, caracterizadas pelo uso dos recursos naturais ao longo do tempo, tem causado uma redução da cobertura vegetal com consequências bastante diversificadas.

Mesmo considerando que os resultados obtidos nesse estudo são suficientes para permitir que as autoridades, pesquisadores e a população em geral possam implementar medidas de mitigação dos efeitos da degradação das terras na região, pesquisas futuras devem ser realizadas visando a análise das condições biológicas e físico-químicas do solo na região.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. **Problemática da desertificação e da savanização no Brasil intertropical**. São Paulo: Instituto de Geografia da USP, 1977.
- AB'SABER, A. N. **Os domínios de Natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 2. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 158 p.
- 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.
- AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – Resumo Executivo**. SEMARH/AESA. João Pessoa – PB. Disponível em: CD-ROM, 2006, 255 p.
- AHANI, H.; KHERAD, M.; KOUSARI, M. R.; ROOSMALEN, L. V.; ARYANFAR, R. & HOSSEINI, S. M. Non-parametric trend analysis of the aridity index for three large arid and semi-arid basins in Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 112, p. 553–564, 2013.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrig. Drain**. Paper 56, 1998, 300 p.
- ALMEIDA, E. **História de Campina Grande**. 2 ed. João Pessoa: Ed. Universitária da UFPB, 1979. 209 p.
- ALMEIDA H. A. & SILVA, L. Determinação das características hídricas da microbacia de drenagem da barragem Vaca Brava. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p.77-86, 2008.
- ALMEIDA, H. A. & MARINHO, C. F. E. Morfometria do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba e indicadores hídricos de susceptibilidade a erosão e à desertificação. In.: SILVA, B. B. da. **Aplicações ambientais brasileiras com geoprocessamento e sensoriamento remoto**. EDUFPG, 2013. 216 p.
- ALMEIDA-FILHO R.; CARVALHO C. M. Mapping land degradation in the Gilbues region, northeastern Brazil, using Landsat TM images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, p. 1087-1094, 2010.
- ALVES, J. J. A.; SOUZA, E. N.; NASCIMENTO, S. S. Núcleos de desertificação no estado da Paraíba. **Revista RA'E GA**, n. 17, p. 139-152, 2009.

- ALVES, J. J. A. Caatinga do cariri paraibano. **Geonomos**, v. 17, n.1, p.19 - 25, 2009.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: informe 2011**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 10 out. 2011.
- ANDRADE-LIMA, D. The Caatingas dominium. **Revista Brasileira de Botânica**. v. 4, p. 149-163, 1981.
- AQUINO, C. M. S. de; ALMEIDA, J. A. P. de & OLIVEIRA, J. G. B. de. Estudo da cobertura vegetal/uso da terra nos anos de 1987 e 2007 no núcleo de degradação/desertificação de São Raimundo Nonato - Piauí. **RA'E GA**, v. 25, p. 252 - 278, 2012.
- ARAÚJO FILHO, J. A.; CARVALHO, F. C. Desenvolvimento sustentado da caatinga. **Embrapa, Circular Técnica**, Sobral - CE, n. 13, 1997, 19 p.
- ARAUJO, L. E. **Climatologia e Vulnerabilidade Socioeconômica e Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba – Estudo de Caso do Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão)**. 2010. 120 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- ARAUJO, K. D.; ANDRADE, A. P. de; RAPOSO, R. W. C.; ROSA, P. R. de O.; PAZERA J. R. E. Índices de aridez aplicados ao semi-árido paraibano: De Martonne, Lang, Meyer, CCD e Xerotérmico (Gaussen). **GEOAMBIENTE ON-LINE**, n. 10, p. 164-176, 2008.
- ARAUJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão Ambiental de áreas degradadas**. 11 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014.
- AYOADE, J. O. **Introdução a Climatologia para os Trópicos**. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 332 p.
- AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. da; RODRIGUES, M. F. G. Previsão Estatística das Chuvas de Outono no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 1, 19-30, 1998.
- BACK, J. A. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.
- BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A. 20 - years study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, p. 288–307, 2006.

BARBOSA, H. A. Mudança e uso do solo no Bioma Caatinga: Sistema de monitoramento por satélite. In: SILVA, B. B. da. (Org.) **Aplicações ambientais brasileiras de geoprocessamento e sensoriamento remoto**. Campina Grande: EDUFPG, 2013, 220 p.

BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; SILVA, L. R. M. Recent trends in vegetation dynamics in the South America and their relationship to rainfall. **Natural Hazards**, n. 77, p. 883–899, 2015.

BECERRIL-PIÑA, R.; MASTACHI-LOZA, C. A.; GONZALEZ-SOSA, E.; DÍAZ-DELGADO, C.; BÂ, K. M. Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. **Journal of Arid Environments**, n. 120, p. 4-13, 2015.

BERNARDES, N. As Caatingas: **Estudos Avançados**, v. 13, n. 36, p. 69-78, 1999.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. de A.; SILVA, B. B. da; LOPES, P. M. O. & SILVA, E. F. de F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.1, p.73–84, 2014.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.293–300, 2007.

BOTELLHO, R. G. M. & SILVA, A. S. da. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio e Janeiro: Bertrand Brazil, 2004. p. 153 – 188.

BRAUNER, J. S. **Nonparametric Estimation of Slope: Sen's Method in Environmental Pollution**. Disponível em: <<http://www.webapps.cce.vt.edu/ewr/environmental/teach/smprimer/sen/sen.html>>. Acesso em: 10 jun. 2013.

BRASIL. Decreto nº 94.076, de 5 de março de 1987. **Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas**. Disponível em <www.mp.sp.gov.br/decretos/Decreto%20nº%2094076-87.htm>. Acesso em: 28 mar. 2011.

_____. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em: 03 out. 2011.

_____. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca, PAN-BRASIL**. Brasília: MMA, 2004. 225p.

_____. Ministério da Integração Nacional. **Nova Delimitação do Semiárido Brasileiro (2005)**. Disponível em: < <http://www.mi.gov.br/>>. Acesso em: 24 abr. 2013.

_____. Ministério da Integração Nacional. **Projeto São Francisco**. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br/>>. Acesso em: 24 abr. 2013.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação no Brasil**. Brasília: MMA, 2007. 134 p.

BRINKMANN, K.; DICKHOEFER, U.; SCHLECHT, E.; BUERKER, A. Quantification of aboveground rangeland productivity and anthropogenic degradation on the Arabian Peninsula using Landsat imagery and field inventory data. **Remote Sensing of Environment** v. 115, p. 465 – 474, 2011.

CAPRA, F. **A Teia da Vida: uma nova compreensão dos sistemas vivos**. EICHEMBERG, N. R. (Trad.). 9 ed. São Paulo: Editora Cultrix, 2004. 256 p.

CASTANHO, R. B.; CASSOL, R.; BEZZI, M. L. A modernização agrícola e o uso de técnicas de geoprocessamento no uso da terra em dois distritos de Palmeira das Missões - RS. **Geosul**, v. 19, n. 38, p. 159-183, 2004.

CAVALCANTI, E. R.; COUTINHO, S. F. S. Desertification in the Northeast of Brazil: the natural resources use and the land degradation. **Sociedade & Natureza**, v. 1, p. 891–90, 2005.

CAVALCANTI, E. P.; SILVA, V. de P. R.; SOUSA, F. de A. S. de. Programa computacional para a estimativa da temperatura do ar para a região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 140-147, 2006.

CHRISTOFOLETTI, A. **Sistemas Ambientais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 236 p.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

COLANTONI, A.; FERRARA, C.; PERINI, L.; SALVATI, L. Assessing trends in climate aridity and vulnerability to soil degradation in Italy. **Ecological Indicators**, v. 48, p. 599–604, 2015.

CONTI, J. B. A questão climática do nordeste brasileiro e os processos de desertificação. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, p. 7 - 14, 2005.

_____, J. B. A Desertificação como forma de degradação ambiental no Brasil. In: Ribeiro, W. da (Org.). **Patrimônio ambiental do Brasil**. São Paulo: Edusp, 2003. p. 167-190.

_____. **Índices de aridez**. Material Didático, 2013.

_____. **Clima e meio ambiente**. 7 ed. São Paulo: Atual, 2011. 96 p.

CORREA, A. C. de B.; TAVARES, B. de A. C.; MONTEIRO, K. de A.; CAVALCANTI, L. C. S. & LIRA, D. R. de. Mega geomorfologia e morfoestrutura do planalto da Borborema **Revista do Instituto Geológico**, v. 31, p. 35-52, 2010.

COSTA, A. C.; SOARES, A. Local spatiotemporal dynamics of a simple aridity index in a region susceptible to Desertification. **Journal of Arid Environments**, v. 87, p. 8 - 18, 2012.

COSTA, J. J. D. da. Contradições no processo de modernização do semiárido: da agricultura tradicional a pecuária irracional dependente. In: MOREIRA, E. **Agricultura Familiar e Desertificação**. João Pessoa: EDUEPB, 2006. 300p.

COSTA, M. S.; FERREIRA, M. R. L. Desenvolvimento local e participação popular: a experiência do pacto do novo cariri. **Cadernos Gestão Pública e Cidadania**, v. 15, n. 56, p. 29-48, 2010.

CROITORU, A. E.; HOLOBACA, I. H.; LAZAR, C. MOLDOVAN, F.; IMBROANE, A. Air temperature trend and the impact on winter wheat phenology in Romania. **Climate Change**, v. 111, p. 393–410, 2012.

CROITORU, A.; PITICAR, A.; IMBROANE, A. M & BURADA, D. C. Spatiotemporal distribution of aridity indices based on temperature and precipitation in the extra-Carpathian regions of Romania. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 112, p. 597 – 607, 2013a.

CROITORU, A.; PITICAR A.; DRAGOTĂ, C.S.; BURADA, D. C. Recent changes in reference evapotranspiration in Romania. **Global and Planetary Change**, v. 111, p. 127-137, 2013b.

CUNHA, J. E. de B. L.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, B. B. da; CHAVES, I. de B. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 539 – 548, 2012.

CUNHA, L. H.; SILVA, R. A. G. A trajetória da algaroba no semiárido nordestino: dilemas políticos e científicos. **Raízes**, v. 32, n. 1, p. 72-95, 2012.

DUARTE, R. S. **Do desastre natural à calamidade pública: a seca de 1998-1999**. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2002, 144p.

DUQUE, J. G. **Solo e água no polígono das secas**. 4 ed., Fortaleza: DNOCS, Publicação n. 154, série I-A, 1973. 223 p.

DUQUE, G. Agricultura familiar em regiões com risco de desertificação: o caso do Brasil semiárido. In: MOREIRA, E. **Agricultura Familiar e Desertificação**. João Pessoa: EDUEPB, 2006. p. 200-224.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006.

ERASMI, S.; MAURER, F.; PETTA, R. A.; GEROLD, G.; BARBOSA, M. P. Inter-annual variability of the Normalized Difference Vegetation Index over Northeast Brazil and its relation to rainfall and El Niño Southern Oscillation. **Geo-Öko**, v. 30, p. 185-206, 2009.

ERASMI, S.; SCHUCKNECHT, A.; BARBOSA, M. P.; MATSCHULLAT, J. Vegetation Greenness in Northeastern Brazil and Its Relation to ENSO Warm Events. **Remote Sensing**. v. 6, p. 3041-3058, 2014.

FEITOSA, P. H. C.; ANDRADE, K. de S.; BARBOSA, M. P.; RIBEIRO, G. do N. Estudo comparativo das vulnerabilidades no cenário Seca/desertificação em municípios do semiárido brasileiro e norte de Portugal. **Revista Verde**, v. 5, n. 3, p. 1 – 9, 2010.

FERRAZ, J. S. F.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A.; MEUNIER, I. M. J.; SANTOS, M. V. F. Estrutura do componente arbustivo-arbóreo da vegetação em duas áreas de caatinga, no município de Floresta, Pernambuco. **Revista Árvore**. v. 38, n.6, p. 1055-1064, 2014.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n.1, p.15-28, 2005.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de textos, 2008. 158 p.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 101 p.

FRANCELINO, M. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; RESENDE, M.; LEITE, H. G.. Contribuição da caatinga na sustentabilidade de projetos de assentamentos no sertão noroeste-grandense. **Revista Árvore**, v. 27, n.1, p. 79-86. 2003.

GALINDO, I. C. de L.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, M. de F. de A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. de A. e L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n.3, p. 1283-1296, 2008.

GALLAHER, T.; MERLIN, M. Biology and Impacts of Pacific Island Invasive Species. 6. *Prosopis pallida* and *Prosopis juliflora* (Algarroba, Mesquite, Kiawe) (Fabaceae). **Pacific Science**, v. 64, n. 4, p. 489–526, 2000.

GALVÍNCIO, J. D.; SOUSA, F.de A. S. de; SRINIVASAN, V. S. Balanço Hídrico à Superfície da Bacia Hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n.3, p. 135-146, 2006.

GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F., Dynamic causal patterns of desertification. **Bioscience**, v. 54, p. 817 - 829, 2004.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.8, p. 833-838, 2014.

GOVAERTS, Y.; LATTANZIO, A. Estimation of surface albedo increase during the eighties Sahel drought from Meteosat observations. **Global and Planetary Change**, v. 64, n. 3, p. 139–145, 2008.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. dos S. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 192 p.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 392 p.

GUIMARÃES, M. **Educação Ambiental: no consenso um debate?** 4 ed. São Paulo: Papirus, 2007. 94 p.

HE, Y. The effect of precipitation on vegetation cover over three landscape units in a protected semi-arid grassland: Temporal dynamics and suitable climatic index. **Journal of Arid Environments**, v. 109, p. 74 - 82, 2014.

HERRMANN, S. M.; ANYAMBA, A.; TUCKER, C. J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. **Global Environmental Change**, v. 15, p. 394–404, 2005.

HILL, J.; STELLMES, M.; UDELHOVEN, T.; RÖDER, A.; SOMMER, S. Mediterranean desertification and land degradation Mapping related land use change syndromes based on satellite observations. **Global and Planetary Change**, 64, p. 146–157, 2008.

HRNJAK, I.; LUKIÉ, T.; GAVRILOV, M. B.; MARKOVIÉ, S. B.; UNKASEVIÉ, M.; TOSIÉ, I. Aridity in Vojvodina, Serbia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 115, v. 323 – 332, 2013.

HUANG, S.; SIEGERT, F. Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in North China based on SPOT VEGETATION imagery. **Journal of Arid Environments**, v. 67, p. 308–327, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia /**, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censos Demográficos de 1970 a 2000**. 2014a. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 06 de outubro de 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censos Agropecuários de 1970 a 1995/1996**. 2014b. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 08 de setembro de 2014.

INCRA. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Instrução Normativa n° 11**. 2003.

JAFARI, R.; LEWISA, M. M.; OSTENDORF, B. An image-based diversity index for assessing land degradation in an arid environment in South Australia. **Journal of Arid Environments**, v. 72, p. 1282–1293, 2008.

JOLLIVET, M.; PAVÉ, A. O meio ambiente: questões e perspectivas para a pesquisa. In.: VIEIRA, P. F.; WEBER, J. **Gestão de Recursos Naturais Renováveis e Desenvolvimento: Novos desafios para a pesquisa ambiental**. São Paulo: Cortez, 2002. p. 53-112.

- KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. London: Charles Griffin, 1975, 120 p.
- KHIRE, M. V.; AGARWADKAR, Y. Y. Qualitative Analysis of Extent and Severity of Desertification for Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Techniques. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 5, n. 3, p. 1-6, 2014.
- KOGAN, F. N. Global drought detection and impact assessment from space. In: WILHITE, D.A. (Ed.), **Drought: A Global Assessment**, v. 1. Rutledge, London. 2000. 396 p.
- LAMONICA, M. N. **Impactos e reestruturação da gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio São João – RJ**. 2002. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2002.
- LANDAU, E. C. CRUZ, R. K.; HIRSCH, A.; PIMENTA, F. M.; GUIMARÃES, D. P. **Variação Geográfica do Tamanho dos Módulos Fiscais no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 199 p.
- LEAL, A. C. & GUIMARÃES, E. Gestão das Águas e Educação Ambiental. In: SEABRA, Giovanni (Org.). **Educação Ambiental**. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2009. p. 93-106.
- LEFF, H. **Saber Ambiental: Sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder**. Petrópolis: Vozes, 2001. 344 p.
- LI, S. G.; HARAZONO, Y.; OIKAWA, T.; ZHAO, H. L.; HE, Z. Y.; CHANG, X. L. Grass land desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 102, p. 125–137, 2000.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 5 eds. IE-WILEY, 2003, 784 p.
- LIMA, P. C. S.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; AZEVEDO, P. V.; OLIVEIRA, G.M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MOURA, M. S. B.; MENEZES, H. E. A.; PINTO, M. G. C. L. Albedo de pastagem e caatinga. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 16, 2009, Belo Horizonte. SBA/UFV/Embrapa Milho e Sorgo, 2009. **Anais...** CD ROM. 18 Mai. 2009.
- LIMA, V. R. P.; ARTIGAS, R. C. Propuesta de ordenación para la conservación y manejo de los recursos naturales en el bioma de caatinga. **Mercator**, v. 11, n. 29, p. 191-210, 2013.

- LIU, X.; ZHANG, D.; LUO, Y. & LIU, C. Spatial and temporal changes in aridity index in northwest China: 1960 to 2010. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 112, p. 307–316, 2013.
- LOPES, H.; CANDEIAS, A.L.B.; ACCIOLY, L.J.O.; SOBRAL, M. do C.M. & PACHECO, A.P. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.11, p.1210 – 1219, 2010.
- LUIJK, G. V; COWLING, R. M.; RIKSEN, M. J. P. M.; GLENDAY, J. Hydrological implications of desertification: Degradation of South African semi-arid subtropical thicket **Journal of Arid Environments**, v. 91, p. 14 – 21, 2013.
- MACÊDO, N. M. M. N.; CÂNDIDO, G. A. Índice de Desenvolvimento Sustentável Local e suas influências nas políticas públicas: um estudo exploratório no município de Alagoa Grande – PB. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 3, 2011.
- MACHADO, C. C. C.; GALVÍNCIO, J. D.; OLIVEIRA, T. H. de. Análise espacial e temporal do IVAS e do albedo da superfície no município de São José do Sabugi – PB, **GEOGRAFIA, Rio Claro**, v. 36, n. 2, p. 359-369, 2011.
- MAGALHÃES, I. A. L.; XAVIER, A. C. & SANTOS, A. R. Caracterização da dinâmica espectro temporal florestal e da cana-de-açúcar no município de Itapemirim, ES. **Geosul**, v. 20, n.39, p. 65-82, 2013.
- MALTCHIK, L. Ecologia de Rios Intermitentes Tropicais. In: POMPÊO, M. L. M. **Perspectivas na Limnologia do Brasil**. São Luís: Gráfica e Editora União, 1999, 198 p.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v.13, p.245 - 259, 1945.
- MAO, D.; WANG, Z.; LUO, L.; REN, C. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 18, p. 528 – 536, 2012.
- MARLAND, G.; PIELKE RA, A. P. P. S. M.; AVISSAR, R.; BETTS, R. A.; DAVIS, K. J.; FRUMHOFF, P. C.; JACKSON, S. T.; JOYCE, L. A.; KAUPPI, P.; KATZENBERGER, J.; MACDICKEN, K. G.; NEILSON, R. P.; NILES, J. O.; NIYOGI, D. S.; NORBY, R. J.; PENA, N.; SAMPSON, N.; XUE, Y. The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy. **Climate Policy**, v. 3,

p. 149 – 157, 2003.

MARIANO NETO, B. **Ecologia e Imaginário nos Cariris Velhos do Paraíba: memória cultural e natureza no cerimonial da vida**. 1999. 167 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1999.

MARINHO, C. F. C. E. **Caracterização hídrica e morfométrica do alto curso da bacia hidrográfica do rio Paraíba**. 2011. 67 f. Monografia (Especialização em Geografia) Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2011.

MATALLO JÚNIOR, H. **Indicadores de Desertificação: histórico e perspectivas**. – Brasília: UNESCO, 2001. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001298/129871POR.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2013.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J.G.B. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. **RA'EGA**, v. 23, p. 520 - 533, 2011.

MENDONÇA, F. de A. **Geografia Física: Ciência Humana?** 7 ed. São Paulo: Contexto, 2001. 72 p.

MENDONÇA, F. de A. **Geografia e Meio Ambiente**. 6 ed. São Paulo: Contexto, 2002. 79 p.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MENESES, R. A. **Diagnóstico Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água: O Caso de Campina Grande**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2011.

MILLÁN, M. M. M. J.; ESTRELA, M. J. SANZ, E.; MANTILLA, M. Climatic Feedbacks and Desertification: The Mediterranean Model. **Journal of Climate**, v. 18, p. 684 - 701, 2004.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, p. 1 - 10, 2002.

MOREIRA, E.; TARGINO, I. **Capítulos de Geografia Agrária da Paraíba**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 1997. 280 p.

MUELLER, E. N.; WAINWRIGHT, J.; PARSONS, A. J. The stability of vegetation boundaries and the propagation of desertification in the American Southwest: A modelling

approach. **Ecological Modelling**, v. 208, p. 91–101, 2007.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Sobre o MODIS**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>> Acesso em: 20 mai. 2013.

NASCIMENTO, W. M.; VILAÇA, M. G. Bacias Hidrográficas: Planejamento e Gerenciamento. **Revista eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, n. 7, p. 102-121, 2008.

NASCIMENTO, S. S.; ALVES, J. J. A. Ecoclimatologia do Cariri Paraibano. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, p. 28-41, 2008.

NASCIMENTO, S. S.; LIMA, E. R. V. de.; LIMA, P. P. S. de. Uso do NDVI na análise temporal da degradação da caatinga na sub-bacia do alto Paraíba. **Okara: Geografia em debate**, v. 8, n. 1, p. 72-93, 2014.

NASCIMENTO, F. R. **O fenômeno da desertificação**. 1 ed. Goiânia: Editora: UFG, 2013. 240 p.

NASTOS, P. T.; POLITI, N.; KAPSOMENAKIS, J. Spatial and temporal variability of the Aridity Index in Greece. **Atmospheric Research**, v.119, p. 140–152, 2013.

NIMER, E. Desertificação: realidade ou mito? Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 50, n.1, p.7-39, 1988.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, p. 2464 - 2479, 1996.

ODORICO, P.; BHATTACHAN, A.; DAVIS, K. F.; RAVI, S.; RUNYAN, C. W Global desertification: Drivers and feedbacks. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 326–344, 2013.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. Climatic Consequences of a Large-Scale Desertification in Northeast Brazil: A GCM Simulation Study. **Journal of Climate**, v. 18, p. 684-701, 2004.

OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. A. S Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1186 - 1192, 2010.

PÁDUA, J. A. (org.) **Ecologia e Política no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Espaço e Tempo, 1987.

PAE-PARAÍBA - **Programa de Ação Estadual de Combate à desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca no Estado da Paraíba**. João Pessoa: Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos, MMA/MCTI/ SUDEMA, 2011. 144p.

PENEREIRO, J. C.; FERREIRA, D. H. L. Estatística apoiada pela tecnologia: uma proposta para identificar tendências climáticas. **Acta Scientia**, v. 13, n.1, p.87-105, 2011.

PEREIRA, D. D.; PEREIRA, F. C. Ecologia das Caatingas. In.: ROCHA, A. P. T.; ABREU, B. S.; FURTADO, D. A.; BARACUHY, J. G. V.; SANTOS, R. T. FERNANDES NETO, S. **Manejo Ecológico de bacias hidrográficas no semiárido brasileiro**. 1 ed. Campina Grande: Epgraf, 2012. 509 p.

PEREIRA, D. D. Quando as políticas públicas auxiliam o processo de desertificação: o caso do Cariri Paraibano. In.: MOREIRA, E. **Agricultura Familiar e Desertificação**. João Pessoa: EDUEPB, 2006. 234 - 275 p.

PEREIRA, D. D. **Cariris paraibanos: do sesmarialismo aos assentamentos de reforma agrária. Raízes da desertificação?** 2008. 370 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, p. 311-313, 2005.

PEREIRA, I. J. J. F. NASCIMENTO, F. R. do. Panorama da desertificação em Chicualacuala, Moçambique (África Austral). **Mercator**, v. 12, n. 29, p. 171-189, 2013.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

REBOUÇAS, A da C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, p. 127 – 154, 1997.

REIS, J. G. **Desertificação no Nordeste**. Recife: SUDENE/DPG/PRN, 1988. 40 p.

RIBEIRO, W. C. Meio Ambiente: o natural e o produzido. **Revista de Geografia**, v. 5, p. 29-32, 1991.

RICKLEFS, R. E. **A Economia da Natureza**. 6 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogam S.A., 2010. 546 p.

RODRIGUES, V. **Pesquisa dos Estudos e Dados sobre a Desertificação no Brasil**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Brasília, 1997. 65 p.

RODRIGUES, M. I. V. **A propensão à desertificação no estado do Ceará: análise dos aspectos agropecuários, econômicos, sociais e naturais**. 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado em Meio ambiente e desenvolvimento). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M. de; TEIXEIRA, A. dos S.; SILVA, B. B. da. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 3, p. 452-465, 2009.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 208 p.

ROSS, J. L. S. Os Fundamentos da Geografia da Natureza. In.: ROSS, J. L. S. **Geografia do Brasil**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011, p. 250 – 311.

SÁ, I. I. S.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M.S.B.; SÁ, I. B. Cobertura vegetal e uso da terra na região Araripe pernambucana. **Mercator**, v.9, n. 19, p. 143-163, 2010.

SACHS, I. **Desenvolvimento: includente, sustentável, sustentado**. Rio de Janeiro: Garamond, 2004. 152 p.

SALES, M. C. L. Evolução dos estudos de desertificação no nordeste brasileiro. **Revista GEOUSP**, n. 11, p. 115-126, 2002.

SALES, M. C. L. **Estudo da degradação ambiental em Gilbués - PI: reavaliando o "núcleo de desertificação"**. 1998. 100 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

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

SANTOS, E. G. dos, SANTOS, C. A. C. dos; BEZERRA, B. G. Analysis of environmental parameters in Gilbués – PI using satellite images. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 4, n. 4, p. 100-110, 2014.

SCHRIER, G. V. D.; JONES, P. D.; BRIFFA, K. R. The sensitivity of the PDSI to the

Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration . **Journal of Geophysical Research**, v. 116, p. 1 – 16, 2011.

SCHUCKNECHT, A.; ERASMI, S.; NIEMEYER, I.; MATSCHULLAT, J. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. **European Journal of Remote Sensing**, v. 46, p. 40 – 59, 2013.

SCHUCKNECHT, A.; MATSCHULLAT, J.; ERASMI, S. Spatial and temporal variability of vegetation status in Paraíba, Northeastern Brazil. **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, p. 32 – 35, 2012.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SEPÚLVEDA S. S. **Gestão del desarrollo sostenible en territorios rurales: métodos para la planificación**. San José, Costa Rica: IICA, 2008. 418 p.

SHAOHONG, W. U.; YUNHE, Y. I. N.; DU, Z.; QINYE, Y. Aridity/humidity status of land surface in China during the last three decades. **Scientia China**, v. 48, p. 1510 – 1518, 2005.

SILVA, V. de P. R. da; GUEDES, M. J. F.; LIMA, W. F. A.; CAMPOS, J. H. B. C. Modelo de previsão de rendimento de culturas de sequeiro, no semiárido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n.1, p. 83 - 87, 2002.

SILVA, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. **Journal of Arid Environment**, v. 58, p. 575 – 596, 2004.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E. e ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente e Sociedade**, v. 10, n. 2, p. 137 - 148, 2007.

SILVA, V. P. R. da; PEREIRA, E. R. R.; AZEVEDO, P. V. de; SOUSA, F. de A. S. de; SOUSA, I. F. de. Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, n.2, p. 131 - 138, 2011.

SIVAKUMAR, M. V. K. Interactions between climate and desertification **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, p. 143 – 155, 2007.

- SOME'E, E. B. S.; EZANI, A.; TABARI, H. Spatiotemporal trends of aridity index in arid and semi-arid regions of Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, p. 149 –160, 2013.
- SOUZA, B. I. de; SILANS, A. M. B. P. de; SANTOS, J. B. dos. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 8, n. 2, p. 292-298, 2004.
- SOUZA, B. I. de. **Cariri Paraibano. Do silêncio do lugar a Desertificação**. 2008. 198 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SOUZA, B. I. ; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. de. Políticas Públicas, uso do solo e desertificação nos Cariris Velhos (PB/Brasil). **Scripta Nova**, v. 14, n. 311, 2010.
- SOUZA, D. C. & OYAMA, M. D. Climatic consequences of gradual desertification in the semi-arid area of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 103, p. 345–357, 2011.
- TABARI, H.; NIKBAKHT, J.; HOSSEINZADEH TALAEE, P. Identification of Trend in Reference Evapotranspiration Series with Serial Dependence in Iran. **Water Resources Management**. v. 26, p. 2219 – 2232, 2012.
- TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.13, p. 51 - 63, 2008.
- THIEL, H. **A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis**, Part 3. Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen A. 53:1397-1412, 1950.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, N. J.: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, publications in Climatology. v. 8, n. 1, 1955. 104 p.
- TRAVASSOS, I. S.; SOUSA, B. I. Os negócios da lenha: indústria, desmatamento e desertificação no Cariri paraibano. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, v. 18, n. 2, p. 329-340, 2014.

- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977, 91 p.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia - ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade (UFRGS), 2007. 944 p.
- TUNDISI, J. G. Recursos Hídricos. São Carlos. **Revista Multiciência**, v.1, 2003.
- UNCCD. United Nations Convention to Combat Desertification. **Intergovernmental. Negotiating Committee for a Convention to Combat Desertification**. U. N. Doc. A/AC.241/27, 33 I.L.M. 1328. New York: United Nations, 1994.
- UNEP. United Environment Programme. **World Atlas of Desertification**. Londres: UNEP/Edward Arnold, 1992, 69 p.
- UVO, C.R. B.; BERNDTSSON, R. Regionalization and Spatial Properties of Ceará State Rainfall in Northeast Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. 2, 1996.
- VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Metodologia para identificação de Processos de Desertificação: manual de indicadores**. SUDENE. Recife, 1978. 22 p.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital, 2 ed. Recife, 2006. 449 p.
- VAN BELLEN, H. M. **Indicadores e Sustentabilidade: Uma análise comparativa**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005, 253 p.
- VIEIRA, V. P. P. B. Sustentabilidade do semiárido brasileiro Desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 105 - 112, 2002.
- WAQUIL, P. D.; SCHNEIDER, S.; FILIPPI, E.E.; CONTERATO M. A.; SPECHT, S.; RUCKERT, A.; RAMBO, A.; RADOMSKY, G. Avaliação de desenvolvimento territorial em quatro territórios rurais no Brasil. **REDES**, v. 15, n. 1, p. 104 - 127, 2010.
- WANG, G.S., SUN, S.H, LIAO, Y.P., ZHANG, Y.X. Study on remote sensing monitoring and information of sandstorm disaster. In: **Desertification Monitoring Center of Ministry of Forestry** (Ed). Research of Desertification Monitoring Technique in China. China Forestry Science Press, Beijing, 2000. 264 p.
- WANG, S.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2, p. 133 - 142, 2007.

XU, D.; LI, C.; SONG, X.; REN, H. The dynamics of desertification in the farming-pastoral region of North China over the past 10 years and their relationship to climate change and human activity. **Catena**, v. 123, p. 11 – 22, 2014.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. Oficina de Textos: São Paulo, 2013. 216 p.

YANG, X.; ROST, K.T.; LEHMKUHL, K.; ZHU, Z. The evolution of dry lands in northern China and in the Republic of Mongolia since the Last Glacial Maximum. **Quaternary International**, v. 118, p. 69 – 85, 2004.

ZARCH, M. A. A.; SIVAKUMAR, B.; SHARMA, A. Assessment of global aridity change. **Journal of Hydrology**. v. 520, p. 300 – 313, 2015.

ZHANG, Q.; YU XU, C.; ZHANG, Z. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 98, p. 89–99, 2009.

ANEXO 1

Valores do fator de correção (F_i) para diferentes latitudes (ϕ) no Hemisfério Sul.

Lat.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0°	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,01	1,01	1,04	1,01	1,04
5°	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10°	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15°	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20°	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22°	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23°	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24°	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25°	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26°	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27°	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28°	1,19	1,02	1,02	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29°	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30°	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31°	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32°	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23

Fonte: Thornthwaite (1948).