



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE  
MESTRADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**



**WILLAMYS RANGEL NUNES DE SOUSA**

**ESTIMATIVA DE TENDÊNCIA DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DE PROCESSOS  
DE DESERTIFICAÇÃO**

**MOSSORÓ – RN**

**JUNHO - 2012**

**WILLAMYS RANGEL NUNES DE SOUSA**

**ESTIMATIVA DE TENDÊNCIA DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DE PROCESSOS  
DE DESERTIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Mestrado de Ciência da Computação – associação ampla entre a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e a Universidade Federal Rural do Semiárido, para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientadores:

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Angélica Félix de Castro – UFERSA.

Prof. Dr. Marcelino Pereira dos Santos Silva – UERN

**MOSSORÓ – RN**

**JUNHO - 2012**

**Catálogo da Publicação na Fonte.  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

Sousa, Willamys Rangel Nunes de

Estimativa de Tendência de séries temporais de imagens de sensoriamento remoto para análise de evolução de processos de desertificação / Willamys Rangel Nunes de Sousa . – Mossoró, RN, 2012.

85 f.

Orientadores: Prof. Dra. Angélica Félix de Castro (UFERSA); Dr. Marcelino Pereira dos Santos Silva (UERN).

Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. Universidade Federal Rural do Semiárido. Ciência da Computação

1. Desertificação - Dissertação. 2. sensoriamento remoto. 3. Séries Temporais.. I. Castro, Angélica Félix de. II. *Silva*, Marcelino Pereira dos Santos III. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. III. Título.

UERN/BC

CDD 333.736

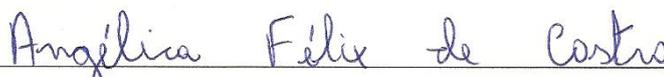
**WILLAMYS RANGEL NUNES DE SOUSA**

**ESTIMATIVA DE TENDÊNCIA DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DE PROCESSOS  
DE DESERTIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ciência  
da Computação para a obtenção do título de Mestre  
em Ciência da Computação.

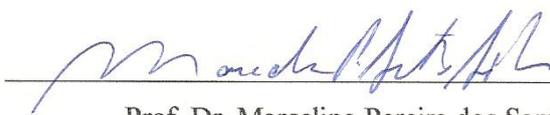
APROVADA EM: 22/06/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_

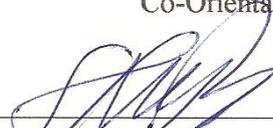
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Angélica Félix de Castro

Orientadora

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Marcelino Pereira dos Santos Silva

Co-Orientador

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Harold Ivan Angulo Bustos

Membro Interno

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Michael Vandesteen Silva Souto – UFC

Membro Externo

*Ao meu ídolo: meu avô Afonso Xavier Nunes (in memoriam), Ao que tenho de mais importante em minha vida: meus pais, Leci e Francisco; meus irmãos: Mychelle e Rafael; e minha amada Thânia.*

## AGRADECIMENTOS

Foram tantas horas de trabalho incessante, de dedicação e de estudo, acompanhadas do convívio diário de inúmeras pessoas, as quais compartilharam os muitos momentos da elaboração deste trabalho. Desde já, me desculpo se, por ventura, esquecer alguém. Assim, agradeço:

A Deus, por toda força que tem me dado, no decorrer de todo este trabalho e por sempre me fazer acreditar que tudo é possível quando se tem dedicação e garra.

Aos meus pais Leci Nunes de Sousa e Francisco de Sousa Santos, por me ensinarem as coisas mais importantes da minha vida.

Aos meus irmãos Mychelle e Rafael, por acreditarem tanto na minha vitória.

À Thânia, minha companheira de todas as horas, por estar sempre do meu lado, me dando forças, acreditando e sendo o meu alicerce durante todos esses anos.

Aos meus orientadores (pais, amigos, companheiros) Angélica Félix de Castro e Marcelino Pereira dos Santos Silva por acreditarem em meu potencial, por me motivarem, por lutarem junto comigo durante toda a pesquisa.

Ao professor Paulo César pela grande contribuição dada durante todos esses meses.

Ao professor Harold por tantas dicas, sugestões e pelo apoio técnico e científico que contribuíram tanto com a pesquisa.

Aos meus amigos Cláudio e Ewerton pela imensa contribuição à pesquisa.

Ao Emiliano Castejon por toda a ajuda na implementação do software apresentado nesta dissertação.

Aos amigos que conquistei em Mossoró: Mailson, Luiz Cláudio, Cleone, Fernando, Artur, Welliana, Aislânia, Rosângela e Rizonara.

À minha prima Alana pelo apoio, motivação e imensa ajuda na correção do documento de dissertação.

Aos membros da banca de defesa pela coerente avaliação e valiosa contribuição científica nesta dissertação.

A UERN e a UFERSA pela oportunidade de aperfeiçoamento acadêmico e infraestrutura fornecida.

À Rosita, por todas as palavras de incentivo e por toda atenção dada na resolução de alguns problemas referentes ao mestrado.

Ao IFPI, por me liberar para o mestrado como uma forma de investimento no meu potencial.

Por fim, a tantos outros que não citei aqui, um grande e fraternal abraço para vocês.

*Sou do tamanho daquilo que vejo e não do tamanho da minha altura.*

*Carlos Drummond de Andrade*

## RESUMO

A desertificação é uma das questões ecológicas e ambientais mais graves no mundo. Entretanto, a ausência de métodos confiáveis de estimativa dos processos de desertificação é um fator crítico no estudo deste tema. Este trabalho busca avançar nesta área propondo uma metodologia para estimar a tendência de evolução da degradação de áreas que sofrem com processos de desertificação. Neste sentido, imagens Landsat TM (*Thematic Mapper*) foram utilizadas para avaliar a degradação no município de Gilbués, localizado no Estado do Piauí, por meio das técnicas de PDI (Processamento Digital de Imagens), usando o índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), do Modelo Linear de Mistura Espectral e da implementação de métodos de estimativa de tendência de séries temporais. Além disso, foram produzidos mapas temáticos da área degradada, entre os anos de 1998 e 2010, para avaliar a evolução da desertificação durante este período, além da estimativa de degradação do solo do ano de 2013.

**Palavras-Chave:** Desertificação. Sensoriamento Remoto. Séries Temporais. Regressão Estatística. Modelo Linear de Mistura Espectral. NDVI.

## ABSTRACT

Desertification is one of the world's direst environmental and ecological issues. However, the absence of reliable methods of identifying the processes of desertification is one of the main factors related to the critical study of this topic. This work attempts to overcome this challenge by proposing a methodology to estimate the trend in the degradation of areas suffering from desertification. In this sense, a Landsat TM images were used to evaluate the degradation in Gilbués, located in the State of Piauí, through the techniques of PDI (Image Processing), using the vegetation index Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Linear Spectral Mixture Model and the implementation of methods tendency estimation of temporal series. Furthermore, thematic maps were produced of the degraded area between the years 1998 and 2010 to evaluate the evolution of this period desertification, beyond the estimation of soil degradation in the year 2013.

**Keywords:** Desertification. Remote Sensing. Times Series. Statistical Regression. Linear Spectral Mixture Model. NDVI.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Áreas piloto para investigação sobre a desertificação no semiárido brasileiro .....	25
Tabela 2 - Imagens Landsat 5 - TM utilizadas .....	53
Tabela 3 - Média e variância da imagem de 2010 nas bandas 3, 4 e 5.....	55
Tabela 4 - Média e variância das demais imagens nas bandas 3, 4 e 5 .....	55
Tabela 5 - Percentuais de diferença calculados pelo MAE para o ano de 2007.....	66
Tabela 6 - Percentuais de diferença calculados pelo MAE para o ano de 2010.....	66

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Núcleos de desertificação no Nordeste Brasileiro .....	24
Figura 2 – Imagens de diferentes sensores e resoluções espaciais .....	26
Figura 3 – Diferença de resolução radiométrica em área urbana .....	27
Figura 4 – Mapa de classificação da cobertura da terra em Xinjinang em 2008.....	30
Figura 5 – Distribuição espacial da desertificação na Ásia Central em 1995.....	31
Figura 6 – Distribuição espacial da desertificação na Ásia Central em 2001.....	31
Figura 7 – Mudanças na dinâmica da desertificação na Ásia Central entre 1995 e 2001 .....	32
Figura 8 – Mapas de desertificação no Ordos em 1980(a), 1990(b) e 2000(c) .....	33
Figura 9 – Contraste entre a distribuição da desertificação atual e o resultado da simulação (áreas na cor amarela representam desertificação): (a) Distribuição da desertificação atual em 1996; (b) Resultado da simulação em 1996 e (c) Resultado da simulação em 2010 .....	34
Figura 10 - Aplicação da equalização de histograma em imagens com baixo contraste: (a) imagem original; (b) histograma da imagem original; (c) imagem equalizada; (d) histograma da imagem equalizada .....	37
Figura 11 - Curvas de reflectância da vegetação verde, vegetação seca (não-fotossintética), solo exposto e água.....	40
Figura 12 - Mapa da localização do município de Gilbués .....	48
Figura 13 - Áreas com solo exposto no município de Gilbués.....	48
Figura 14 - O desafio do desenvolvimento sustentado: desertificação e agronegócio .....	49
Figura 15 - Fluxograma da metodologia .....	52
Figura 16 - Mosaico contendo a área do município de Gilbués .....	54
Figura 17 - NDVI dos anos de 1998, 2001, 2004, 2007 e 2010.....	56
Figura 18 - MLME de 2010 com as imagens fração: (a) solo; (b) sombra; (c) vegetação .....	57
Figura 19 - Imagem NDVI de Gilbués antes e depois da equalização de histograma .....	58
Figura 20 - Imagem MLME de Gilbués antes e depois da equalização de histograma .....	58
Figura 21 - Área de corte no município de Gilbués .....	59
Figura 22 – Extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2007 pelo método de Regressão Linear .....	60
Figura 23 - Extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2007 pelo método de Regressão Quadrática .....	60

Figura 24 - Sequência de imagens NDVI do ano de 2007: (a) NDVI original; (b) NDVI extrapolado por regressão linear; (c) NDVI extrapolado por regressão quadrática; (d) NDVI extrapolado por regressão linear após o processo de corregristo; e (e) NDVI extrapolada por regressão quadrática após o processo de corregristo. ....	62
Figura 25 - Sequência de imagens MLME do ano de 2007: (a) MLME original; (b) MLME extrapolado por regressão linear; (c) MLME extrapolado por regressão quadrática; (d) MLME extrapolado por regressão linear após o processo de corregristo; e (e) MLME extrapolada por regressão quadrática após o processo de corregristo. ....	62
Figura 26 - Extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2010 pelo método de Regressão Linear .....	63
Figura 27 - Extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2010 por Regressão Quadrática.....	63
Figura 28 - Sequência de imagens NDVI do ano de 2010: (a) NDVI original; (b) NDVI extrapolado por regressão linear; (c) NDVI extrapolado por regressão quadrática; (d) NDVI extrapolado por regressão linear após o processo de corregristo; e (e) NDVI extrapolada por regressão quadrática após o processo de corregristo .....	64
Figura 29 - Sequência de imagens MLME do ano de 2010: (a) MLME original; (b) MLME extrapolado por regressão linear; (c) MLME extrapolado por regressão quadrática; (d) MLME extrapolado por regressão linear após o processo de corregristo; e (e) MLME extrapolada por regressão quadrática após o processo de corregristo .....	64
Figura 30 – Esquema de extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2013 por Regressão Linear .....	67
Figura 31 - Extrapolação do ano de 2013 pelo método de regressão linear, a partir de imagens NDVI corregristadas.....	67
Figura 32 - Extrapolação do ano de 2013 pelo método de regressão linear, a partir de imagens MLME corregristadas.....	67
Figura 33 - Imagens <i>Quickbird</i> de alta resolução ilustrando as classes temáticas (a) solo exposto, (b) vegetação degradada e (c) vegetação densa .....	69
Figura 34 - Resultados da classificação de 1998: (a) Mapa de cobertura do solo de 1998 (b) Percentagem das classes temáticas de 1998 .....	69
Figura 35 - Resultados da classificação de 2010: (a) Mapa de cobertura do solo de 2010 (b) Percentagem das classes temáticas de 2010 .....	70
Figura 36 - Resultados da classificação da imagem de 2013 extrapolada: (a) Mapa de cobertura do solo de 2013 (b) Percentagem das classes temáticas de 2013 .....	70

Figura 37 - Classificação de 2010 com quatro pontos capturados por GPS na pesquisa de campo .....	71
Figura 38 - Solo exposto encontrado no <i>ponto 1</i> .....	72
Figura 39 - Vegetação degradada predominante no <i>ponto 2</i> .....	72
Figura 40 - Vegetação densa presente no <i>ponto 3</i> .....	73
Figura 41 - Vegetação degradada no <i>ponto 4</i> .....	73
Figura 42 - Interface do <i>Extrapolaton plugin</i> .....	75
Figura 43 - Extrapolação do NDVI do ano de 2013 .....	75
Figura 44 - NDVI do ano de 2013 obtido através do <i>Extrapolation plugin</i> .....	76

## LISTA DE SIGLAS

AC	Autômato Celular
CONSLAD	Conferência Nacional e Seminário Latino-Americano da Desertificação
DCBD	Descoberta de Conhecimento em Bancos de Dados
FVC	<i>Fractional Vegetation Cover</i>
GeoDMA	<i>Geographical Data Mining Analyst</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KDD	<i>Knowledge Discovery in Databases</i>
LST	<i>Land Surface Temperature</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSAVI	<i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i>
NDSI	<i>Normalized Difference Soil Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
PNCD	Plano Nacional de Combate à Desertificação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SISCOM	Sistema Compartilhado de Informações Ambientais
TVDI	<i>Temperature Vegetation Dryness Index</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVO.....	16
1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	17
<b>2 DESERTIFICAÇÃO .....</b>	<b>18</b>
2.1 CONCEITO DE DESERTIFICAÇÃO.....	18
2.2 FATORES RESPONSÁVEIS PELOS PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO.....	20
2.3 ESTUDOS SOBRE DESERTIFICAÇÃO .....	21
2.4 IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....	25
2.5 MINERAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....	27
2.6 O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA DESERTIFICAÇÃO ..	29
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>35</b>
3.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....	35
<b>3.1.1 Georreferenciamento .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.2 Mosaico de Imagens .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.3 Normalização Radiométrica.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.4 Equalização de Histograma.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.5 Corregistro de Imagem.....</b>	<b>38</b>
3.2 USO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO ESTUDO DE PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO .....	38
3.3 MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL APLICADO AO MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO.....	39
3.4 ESTIMATIVA DE TENDÊNCIA DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS.....	42
<b>3.4.1 Métodos de Estimativa de séries Temporais.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.2 Regressão Linear .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.3 Regressão Quadrática .....</b>	<b>45</b>
<b>4 ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO .....</b>	<b>47</b>
4.1 O MUNICÍPIO DE GILBUÉS .....	47
<b>4.1.1 Aspectos Fisiográficos .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.2 Recursos Hídricos.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.3 Vegetação .....</b>	<b>50</b>

<b>4.1.4 Caracterização e Análise Geomorfológica e Pedológica</b> .....	<b>51</b>
<b>4.2 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA</b> .....	<b>51</b>
<b>4.2.1 Aquisição de Imagens</b> .....	<b>53</b>
<b>4.2.2 Técnicas de Pré-Processamento Utilizadas</b> .....	<b>53</b>
<b>4.2.3 Georreferenciamento da Sequência de Imagens</b> .....	<b>54</b>
<b>4.2.4 Mosaico</b> .....	<b>54</b>
<b>4.2.5 Normalização Radiométrica</b> .....	<b>55</b>
<b>4.2.6 Extração do NDVI</b> .....	<b>56</b>
<b>4.2.7 Extração das Imagens-Fração do Modelo Linear de Mistura Espectral</b> .....	<b>56</b>
<b>4.2.8 Equalização de Histograma</b> .....	<b>57</b>
<b>4.3 EXTRAPOLAÇÃO DE IMAGENS POR MEIO DOS MÉTODOS DE REGRESSÃO LINEAR E QUADRÁTICA</b> .....	<b>59</b>
<b>5 ANÁLISES E RESULTADOS</b> .....	<b>65</b>
5.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DA EXTRAPOLAÇÃO.....	65
5.2 CLASSIFICAÇÃO .....	68
5.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO.....	71
5.4 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE PLUGIN PARA O TERRAVIEW	74
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>77</b>
6.1 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	77
6.2 LIMITAÇÕES .....	78
6.3 TRABALHOS FUTUROS.....	78
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A maioria dos temas que têm recebido atenção nas últimas décadas envolve questões relacionadas ao meio ambiente. A poluição nos seus vários aspectos, o declínio e a perda de biodiversidade, o desmatamento indiscriminado, a degradação do solo e o aquecimento global refletem um “estado de alerta” que permeia toda a sociedade (ABRAHAM e TORRES, 2007).

A desertificação está incluída entre os mais graves problemas ecológicos e ambientais no mundo. Sua ocorrência afeta a segurança alimentar, o desenvolvimento da economia local e as estratégias de conservação dos recursos naturais. Ela é reconhecida entre as questões sócio-econômico-ambientais mais graves nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, e em todo o mundo, tendo mais de dois bilhões de pessoas afetadas pela desertificação (XU, *et al.*, 2009; CHEN e RAO, 2009).

Entretanto, um dos principais entraves no combate a esse problema tem sido a falta de métodos de avaliação robustos para identificar as prioridades de ação política e de gestão, para monitorar o impacto de tais ações e para gerar um entendimento sobre os fatores que levam à desertificação (DIEZ e MCINTOSH, 2011).

Devido à grande importância do tema da desertificação, vários estudos vêm sendo realizados a fim de criar sistemas de indicadores e metodologias que auxiliem na identificação e no monitoramento de áreas que sofram deste tipo de problema.

### 1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia para estimar a evolução dos processos de degradação das áreas com tendência à desertificação. Nesta tarefa será considerada a resposta espectral dos diferentes elementos presentes em imagens de sensoriamento remoto por meio de índice de vegetação e de modelo de mistura, além de métodos de regressão e técnicas de mineração de imagens.

O objetivo principal deste trabalho demanda os seguintes objetivos específicos:

- Compreender as principais causas responsáveis pelos processos de desertificação;
- Efetuar levantamento dos estudos nacionais e internacionais referentes à identificação e monitoramento dos processos de desertificação;

- Avaliar as métricas e índices utilizados para identificar e monitorar tais processos;
- Propor um método suportado por ferramenta computacional que auxilie a análise de áreas reconhecidamente afetadas por processos de desertificação;
- Prototipar os componentes de *software* essenciais à aplicação da metodologia.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Os capítulos deste trabalho estão organizados da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma contextualização sobre o tema desertificação e o uso de imagens de sensoriamento remoto e técnicas de mineração utilizadas nesse tipo de estudo. O Capítulo 3 aborda a fundamentação teórica das técnicas utilizadas neste trabalho. O Capítulo 4, por sua vez, discorre sobre as características da área escolhida para aplicação dos estudos, além de apresentar a metodologia utilizada para estimar processos de desertificação. No Capítulo 5 são analisados os resultados e é apresentada a ferramenta computacional desenvolvida. No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais, as contribuições identificadas bem como as sugestões de trabalhos futuros decorrentes desta pesquisa. Por fim, são apresentadas as Referências Bibliográficas.

## 2 DESERTIFICAÇÃO

Este Capítulo aborda os principais conceitos relacionados ao processo de desertificação, os quais são necessários para o entendimento da pesquisa apresentada neste trabalho. A Seção 2.1 apresenta uma revisão da base conceitual sobre desertificação. A Seção 2.2, por sua vez, apresenta os principais fatores responsáveis pelo processo de desertificação. Na Seção 2.3 são discutidos alguns dos principais estudos mundiais e nacionais sobre esse tema. Já a Seção 2.4 apresenta os conceitos de sensoriamento remoto e de séries temporais. A Seção 2.5 aborda os conceitos relacionados com a técnica de mineração de imagens de sensoriamento remoto. Por fim, a Seção 2.6 discorre sobre alguns estudos recentes sobre o uso de imagens de sensoriamento no estudo da desertificação.

### 2.1 CONCEITO DE DESERTIFICAÇÃO

Diferentemente de outras áreas do conhecimento científico, o tema desertificação é considerado relativamente novo e ainda cheio de desafios.

O termo “desertificação” foi utilizado pela primeira vez na publicação “*Climats, Forêts et Desertification de l’Afrique Tropicale*”, no ano de 1949, do autor André Aubreville, para caracterizar a substituição de florestas tropicais e subtropicais por savanas. Desde então, o termo passou a ser utilizado para descrever a realidade africana.

Em 1990, as Nações Unidas, em uma reunião com especialistas no assunto, reavaliou o tema. A desertificação passou a ser definida como a degradação da terra em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de impactos humanos adversos (CARVALHO e ALMEIDA FILHO, 2007).

Já durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) de 1992, a desertificação passou a ser definida como sendo a degradação da terra em regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultantes de vários fatores, entre eles, as variações climáticas e as atividades humanas (ONU, 1992).

Entretanto, ainda hoje existem questionamentos importantes sobre essa definição decorrentes de algumas fragilidades conceituais existentes. Do ponto de vista da amplitude conceitual, Matallo Júnior (2001) aponta que a “degradação da terra” é, em si, uma ideia complexa, que envolve diferentes componentes. Tais componentes são: a degradação da vegetação, a degradação dos solos, a degradação dos recursos hídricos e a redução da

qualidade de vida da população. Nessa mesma linha de pensamento, Pacheco, Freire e Borges (2006) afirmam que a desertificação é transdisciplinar, pois permeia e perpassa várias áreas do conhecimento.

A amplitude conceitual da desertificação dificulta a elaboração e aplicação de uma metodologia para efeito de estudo, uma vez que ainda não foram conquistados progressos que superem as fronteiras entre as ciências, pois não houve pesquisa suficiente para oferecer caminhos a serem seguidos para a formulação de uma metodologia unificada de trabalho e seus correspondentes indicadores sobre o fenômeno (MATALLO JUNIOR, 2001).

O segundo ponto de fragilidade na definição seria a ausência de métodos universais para o estudo da desertificação. Isso fica claro, devido à dificuldade de construção de uma metodologia “universal” para a geração de conhecimentos específicos sobre o problema.

Na visão de Matallo Júnior (2001), este problema ocorre porque as atuais metodologias de estudo não se configuram como um método no sentido clássico, mas como um aglomerado de conhecimentos de diversas áreas que se colocam a serviço da compreensão do problema.

A ausência de métodos confiáveis de identificação dos processos de desertificação é um dos principais fatores de críticas relacionadas ao estudo deste tema.

Segundo Matallo Júnior (2001), uma avaliação da produção teórica sobre desertificação mostra a pluralidade de métodos e sistemas de indicadores utilizados em todo o mundo, o que revela a dificuldade em estabelecer um consenso sobre um sistema básico de investigação sobre o fenômeno, que considere a multiplicidade de aspectos nele envolvidos.

Dessa dificuldade metodológica deriva outra, cujos desdobramentos também contribuem para a falta de clareza sobre o assunto. Trata-se da sobreposição entre métodos de estudos e métodos de identificação de áreas sob processo de desertificação, visto que para cada caso seria necessária uma abordagem diferenciada; o primeiro objetivando identificar causas e apontar cenários e o segundo direcionado ao diagnóstico, que também se reverte em muitas polêmicas pela descontinuidade de estudos e obstáculos na obtenção de dados diretos e atualizados (CAVALCANTI, COUTINHO e SELVA, 2007).

Existe ainda uma dificuldade em se diferenciar desertificação e seca. Assim, muitas associações são feitas entre estes dois fenômenos. Em alguns casos, seca e desertificação são tratados como um único e mesmo fenômeno e que, portanto, eliminando os efeitos da seca (provendo água) se acabará também com a desertificação.

Em outros casos, a desertificação é vista como um processo que pode levar a um aumento ou intensificação das secas e a mudanças climáticas e, portanto, a única finalidade de

combatê-la é evitar a mudança do clima. Do mesmo modo, em alguns casos, a desertificação é vista como um mito ou mesmo uma invenção para captar fundos dos países desenvolvidos (MATALLO JUNIOR, 2001).

Por fim, não existe metodologia de avaliação econômica dos processos de desertificação. A maioria das avaliações econômicas das perdas relacionadas com esse fenômeno estão desatualizadas e com valores mais apropriados para condições africanas.

Pelos motivos supracitados, os elementos necessários ao convencimento da sociedade e das instituições públicas e privadas ficam comprometidos, inviabilizando qualquer análise mais precisa sobre os benefícios dos investimentos em conservação e gestão de recursos naturais em zonas que sofrem desse fenômeno.

## 2.2 FATORES RESPONSÁVEIS PELOS PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO

A degradação da terra e a desertificação constituem graves problemas. Tais problemas incidem sobre 33% da superfície da Terra, onde vivem cerca de 2,6 bilhões de pessoas (42% da população total). Esses problemas são particularmente agudos na região da África Subsaariana<sup>1</sup>, onde residem mais de 200 milhões de pessoas. Ali, cerca de 20 a 50% das terras estão degradadas. A degradação do solo é também severa na Ásia e na América Latina, assim como em outras regiões do globo (BRASIL, 2004).

Como resultado do avanço da desertificação, estima-se que se percam anualmente 24 bilhões de toneladas da camada arável do solo, o que afeta negativamente a produção agrícola e o desenvolvimento sustentável das regiões impactadas (BRASIL, 2004).

Em seu trabalho, Carvalho (2001) estimou que mais de um terço da superfície agricultável do planeta, situada em regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, está submetida ao processo de desertificação. A desertificação é vista por ele como a maior causa da redução de produtividade das terras, afetando inclusive a economia e a política.

As causas e, ao mesmo tempo, as consequências da degradação e da desertificação são, frequentemente, a pobreza e a insegurança alimentar combinadas com variações severas do ciclo hidrológico, como secas e enchentes. Além de tais fatores, também são causas do processo de desertificação: desmatamento, cultivo extensivo, exploração predatória como

---

<sup>1</sup> A região da África Subsaariana é composta por 47 países. É a única região no mundo onde o número de pessoas vivendo sob extrema pobreza, com menos de US\$ 1 ao dia, quase que dobrou entre o início dos anos 80 e 2004

também a industrialização e urbanização sem considerações ambientais (SHEIKH e SOOMRO, 2006).

Além disso, de acordo com Lopes (2005), solos suscetíveis à erosão e embasamento contendo rochas que dificultam o acúmulo de água subterrânea são fatores que contribuem para o avanço da desertificação.

Tais modificações levam a uma excessiva pressão sobre os recursos naturais e adoção de estratégias de sobrevivência que exaurem os recursos pelo uso da terra, cujas causas imediatas são o uso inapropriado e a degradação do solo, água e vegetação; perda da diversidade vegetativa e biológica, afetando a estrutura e a função do ecossistema (BRASIL, 2004). Além disso, um rápido aumento da população humana e animal necessita de uma correspondente expansão das áreas cultivadas, levando a terra a uma sobreutilização e, portanto, causando degradação dos solos (SHEIKH e SOOMRO, 2006).

A discussão das causas e consequências da desertificação, degradação de terras e ocorrência de secas é um assunto complexo e ainda pouco entendido. A seca ocorre frequentemente em áreas afetadas pela desertificação, correspondendo a uma característica do clima regional, no que se refere às suas principais determinações causais. A relação entre desertificação e seca, por um lado, e a influência humana, de outro, ainda não foram completamente explicadas. Secas ocasionais (devidas à sazonalidade ou às variações interanuais das chuvas) e secas severas de longos períodos podem ser causadas ou agravadas pela influência humana sobre o meio ambiente (redução da cobertura vegetal, mudança do efeito de albedo<sup>2</sup>, mudanças climáticas locais, efeito estufa, etc.). Assim, as atividades humanas contribuem para acelerar o processo de desertificação, agravando suas consequências negativas sobre as pessoas (BRASIL, 2004).

### 2.3 ESTUDOS SOBRE DESERTIFICAÇÃO

Devido à grande importância dada nos últimos anos ao tema da desertificação, vários estudos vêm sendo realizados a fim de criar sistemas de indicadores para identificar áreas que sofram com este tipo de problema.

---

<sup>2</sup> Em termos geográficos, o albedo representa a relação entre a quantidade de luz refletida pela superfície terrestre e a quantidade de luz recebida do Sol. Esta relação varia fortemente com o tipo de materiais existentes à superfície: por exemplo, em regiões cobertas por neve, o albedo ultrapassa os 80%, enquanto num solo escuro, não vai além dos 10%. Na sua globalidade, o albedo médio da Terra é de cerca de 37%.

O estudo do fenômeno da desertificação, com a apresentação de indicadores, tem sido sugerido desde a Conferência de Nairóbi<sup>3</sup> em 1977, buscando-se detectar o problema logo no início do seu aparecimento em qualquer área. Através de algumas variáveis, diagnostica-se a desertificação em todos os seus processos físicos, biológicos, econômicos e sociais (RODRIGUES e VIANA, 1997).

O reconhecimento, por parte da comunidade internacional, da existência de processos de desertificação em escala global vem se constituindo em crucial desafio para todos os países e, em especial, para aqueles em desenvolvimento. Esse desafio diz respeito, de um lado, a aspectos práticos com os quais as populações convivem e os governos devem enfrentar enquanto formuladores de políticas públicas e, de outro, com aspectos teóricos e metodológicos da mais alta importância, pois são aspectos que possibilitam a compreensão e dimensionamento do problema para adequada conscientização dos diferentes atores sociais, para formulação das políticas públicas e para tomada de decisões (MATALLO JUNIOR, 2001).

Existe um desafio importante a ser vencido: desenvolver e aprimorar o conhecimento sobre o assunto, a fim de alcançar as condições para um salto qualitativo em direção a uma metodologia específica para o estudo da desertificação.

Vê-se, portanto, que do ponto de vista dos esforços internacionais, especialmente nos Estados Unidos e Europa, o direcionamento privilegiado dos estudos de desertificação são no sentido da verticalização temática, muito mais do que na tentativa de formulação de “sistemas” ou “metodologias” de indicadores, confirmando a tradição científica setorial de abordagem do problema (MATALLO JUNIOR, 2001).

Já em termos regionais, o esforço que vem sendo feito na América Latina e Caribe para o desenvolvimento de metodologias minimamente padronizadas sobre desertificação tem história bastante significativa, embora muito recente e ainda não concluída (MATALLO JUNIOR, 2001).

As discussões visando à uniformização de uma metodologia para o estudo da desertificação tiveram início durante a realização da Conferência Nacional e Seminário Latino-Americano da Desertificação (CONSLAD), ocorrida no período de 7 a 11 de março de 1994, na cidade de Fortaleza, Estado do Ceará.

---

<sup>3</sup> Conferência realizada em Nairóbi, capital do Quênia, para ampliar o conhecimento sobre a desertificação, suas consequências sócio-econômicas e ambientais, e o desenvolvimento e a adoção de medidas de controle nos países afetados pelo fenômeno.

Naquela ocasião foram discutidas a necessidade e as bases para a elaboração de um diagnóstico dos países da região que proporcionassem condições mínimas de comparação. O argumento baseava-se na ideia de que a implementação da Convenção da Desertificação, assim como o acesso aos recursos financeiros, poderiam depender de parâmetros com aceitação geral, tais como área e população afetadas, o que exigiria que os diagnósticos utilizassem a mesma metodologia e indicadores (MATALLO JUNIOR, 2001).

O início dos estudos mais sistematicamente relativos à ocorrência da desertificação no Brasil remonta aos anos 70, com o professor João Vasconcelos Sobrinho<sup>4</sup>, ao destacar que os ventos quentes e secos, que caracterizam o ambiente semiárido do Nordeste brasileiro, seriam, em grande parte, responsáveis pelos altos índices de evaporação dos solos, rios e depósitos de água, bem como pela desidratação dos seres vivos (incluindo-se aí as plantas, os animais e o homem) (GALVÃO e SAITO, 2003).

Nos quinze anos que separaram a Conferência de Nairobi da Conferência Internacional das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente (mais conhecida como RIO 92), poucos eventos ocorreram ou ações se desenvolveram, mundialmente, no sentido de combater ou controlar a desertificação.

Ainda assim, o Brasil se manteve sempre presente às discussões relativas ao tema, mesmo que, sistematicamente, contasse com um grupo de especialistas bastante pequeno e basicamente formado por pesquisadores e técnicos muitas vezes desarticulados entre si, via de regra, atuando sem apoio institucional e cujos enfoques contrariavam os interesses políticos e econômicos vigentes de desenvolvimento a qualquer custo (GALVÃO e SAITO, 2003).

O professor João Vasconcelos Sobrinho tem sido considerado um pioneiro nos estudos sobre a desertificação no Brasil. Sua trajetória teve início com a publicação, em 1971, da monografia intitulada *Núcleos de Desertificação no Polígono das Secas*, onde apresenta as primeiras ideias sobre os núcleos de desertificação (MATALLO JUNIOR, 2001).

A formulação da categoria de “núcleos de desertificação” foi um dos artifícios usados pelo autor, com vistas a permitir melhor aproximação com o fenômeno, ou seja, para permitir uma abordagem em nível local. Na contextualização dos núcleos, que aparecem primeiramente com a nomenclatura de “áreas-piloto”, o autor reafirma que “a impossibilidade de um estudo abrangente de uma área por demais vasta como seria a de um Estado ou de todo

---

<sup>4</sup> João de Vasconcelos Sobrinho (professor, engenheiro agrônomo e ecólogo) foi um dos fundadores da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Publicou cerca de 30 livros, todos sobre ecologia e conservação dos recursos naturais.

o polígono da seca 'nos impõe' a escolha de áreas específicas bem representativas, passíveis de serem estudadas como áreas-piloto" (MATALLO JUNIOR, 2001).

Assim os “núcleos de desertificação” devem ser considerados como as “unidades mínimas” a partir das quais os estudos devem ser conduzidos. A aplicação desses conceitos à realidade do Nordeste indicou seis áreas como núcleos de desertificação (áreas-piloto). A Figura 1 ilustra os Núcleos de desertificação do Nordeste Brasileiro, dando ênfase ao município do Gilbués no Estado do Piauí, um dos casos mais característicos do fenômeno na região Nordeste. Por sua vez, a Tabela 1 apresenta todas as áreas-piloto apontadas no estudo.

Finalmente, com vistas a gerar os subsídios informacionais básicos necessários às discussões relativas à elaboração do Plano Nacional de Combate à Desertificação (PNCD), o Ministério do Meio Ambiente brasileiro realizou, no ano de 1997, dois mapeamentos temáticos regionais referentes à desertificação no Brasil: “Ocorrência de Desertificação e áreas de Atenção Especial no Brasil” e o “Mapa de Susceptibilidade à Desertificação no Brasil” (GALVÃO e SAITO, 2003).

Cabe esclarecer que o PNCD se encontra em processo permanente de reelaboração, da mesma forma que ainda está em discussão a definição dos aspectos relativos à real abrangência e o dimensionamento das áreas de risco e/ou ocorrência dos processos de desertificação no território brasileiro.

Figura 1 - Núcleos de desertificação no Nordeste Brasileiro



Fonte: MMA<sup>5</sup> (2006 apud CARVALHO e ALMEIDA FILHO, 2007)

<sup>5</sup> MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Recursos hídricos. Brasil. 2006. Disponível em: < www.mma.gov.br>. Acesso em: 2 fev. 2006.

Tabela 1 - Áreas piloto para investigação sobre a desertificação no semiárido brasileiro

Áreas piloto selecionadas	Estado	Regiões Naturais e/ou Microrregiões Homogêneas	Municípios
01	Piauí	Caatinga	Gilbués, Simplício Mendes, Cristino Castro, Ribeiro Gonçalves, Corrente, Bom Jesus e municípios vizinhos.
02	Ceará	Inhamuns	Tauá, Arneiroz, Mombaça, Aiuaba, Catarina, Saboeiro, Irauçuba e municípios vizinhos.
03	Rio Grande do Norte	Seridó	Currais Novos, Acari, Parelhas, Equador, Carnaúba dos Dantas, Caicó, Jardim do Seridó e municípios vizinhos.
04	Paraíba	Cariris Velhos	Juazeirinho, São João do Cariri, Serra Branca, Cabaceiras, Camalaú, Picuí e municípios vizinhos.
05	Pernambuco	Sertão Central	Salgueiro, Parnamirim, Cabrobró, Itacuraba, Belém do São Francisco, Petrolina, Afrânio, Ouricuri, Araripina e municípios vizinhos.
06	Bahia	Sertão do São Francisco	Uauá, Marururé, Chorrochó, Abaré, Rodelas, Curuçá, Glória, Jeremoabo, Juazeiro e municípios vizinhos.

Fonte: BRASIL (2004)

## 2.4 IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento remoto é um campo de ciência aplicada para aquisição de informações da superfície da Terra por meio de dispositivos que executam o sensoriamento e o registro da energia refletida ou emitida, seguido pelo processamento, análise e aplicação dessas informações (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

Os satélites de sensoriamento remoto são, atualmente, as fontes mais significativas de novos dados sobre o nosso planeta e os bancos de dados de imagem de sensoriamento remoto com informações espaciais são os que mais crescem (SILVA, *et al.*, 2005).

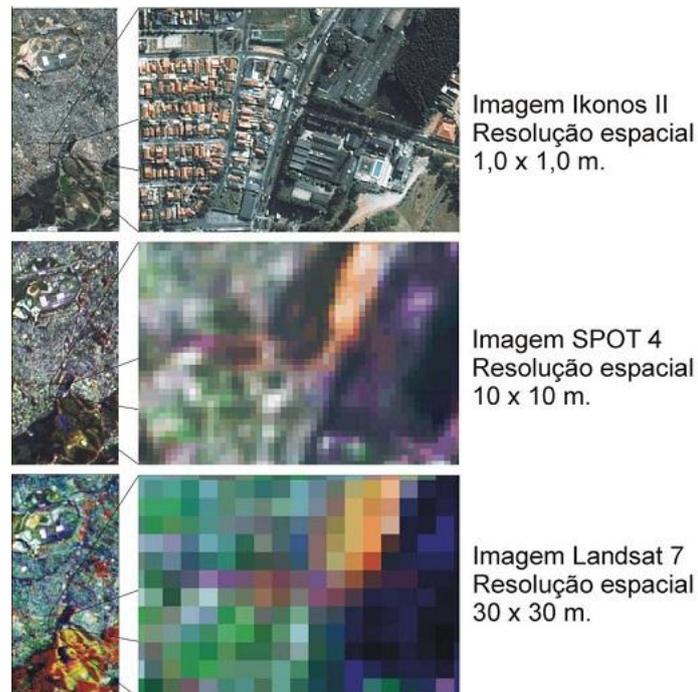
O primeiro satélite de sensoriamento remoto operacional (Landsat 1 - MSS) foi lançado em 1972, desde então, tem havido uma grande experiência em nível mundial na coleta, processamento e análise dos dados de sensoriamento remoto (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

Imagens obtidas por meio da aquisição e processamento de sensores remotos são usadas em muitos campos da pesquisa, uma vez que as informações fornecidas por elas são fortemente exigidas em muitas áreas, incluindo governo, economia, infraestrutura e hidrologia. Existem exemplos de uso em segurança, previsão de safras, planejamento urbano e monitoramento de recursos hídricos (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

No processo de aquisição de imagem, quatro conceitos são fundamentais: resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

A resolução espacial define o nível de detalhe de uma imagem, ou seja, se um sensor tem uma resolução espacial de vinte metros, então cada *pixel* representa uma área de  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ . A Figura 2 ilustra o contraste visual entre diferentes resoluções em áreas urbanas (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

Figura 2 – Imagens de diferentes sensores e resoluções espaciais



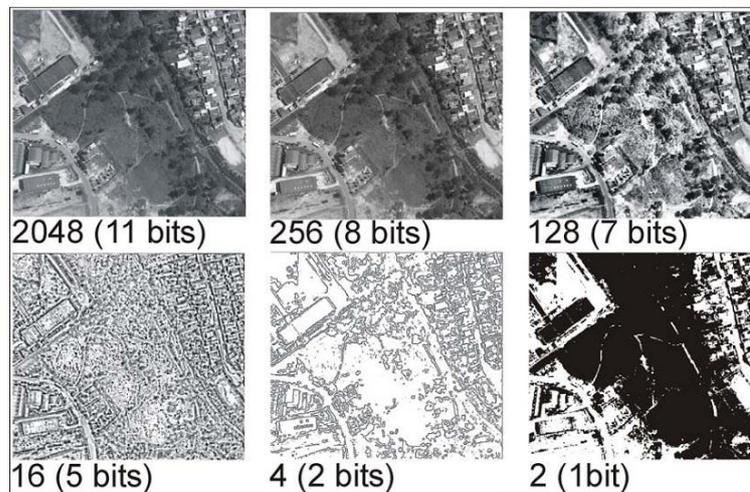
Fonte: MELO (2002)

Devido às diferenças na composição físico-química dos materiais que compõem os objetos, estes interagem de maneira diferente com as ondas eletromagnéticas. Assim, a

reflexão dos comprimentos de onda acontece em quantidades diferentes para cada tipo de material ou objeto, o que permite estabelecer uma caracterização espectral de cada um deles (IMAGEM, 2011).

A resolução radiométrica pode ser expressa pela quantidade de níveis de cinza usados para representar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior a resolução radiométrica de uma imagem, maior quantidade de informação presente na mesma (Figura 3) (MATHER, 1999).

Figura 3 – Diferença de resolução radiométrica em área urbana



Fonte: MELO (2002)

A resolução temporal se refere ao intervalo de tempo em dias ou horas, que o sistema demora em obter duas imagens consecutivas da mesma região sobre a Terra. Assim, se um sensor é capaz de obter uma imagem de uma área a cada 16 (dezesesseis) dias, então a sua resolução temporal é este período (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

## 2.5 MINERAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

A grande quantidade de dados, coletados e armazenados em grandes e numerosos repositórios, excede em muito a capacidade humana de compreensão sem o uso de ferramentas poderosas. Consequentemente, decisões importantes são frequentemente tomadas não com base em dados ricos em informações, mas sim na intuição do tomador de decisão, simplesmente porque o decisor não tem as ferramentas para extrair o conhecimento valioso incorporado na vasta quantidade de dados (HAN e KAMBER, 2006).

Assim, há uma necessidade urgente de uma nova geração de teorias e ferramentas computacionais para auxiliar os seres humanos a extrair informação útil de grandes volumes

de dados digitais. Estas teorias e ferramentas são o objeto de estudo do campo emergente da Descoberta de Conhecimento em Bancos de Dados - DCBD (do inglês *Knowledge Discovery in Databases* - KDD) (FAYYAD, PIATETSKY-SHAPIRO e SMYTH, 1996).

As informações e os conhecimentos adquiridos nesse processo podem ser usados para aplicações que vão desde a análise de mercado, detecção de fraude e retenção de clientes até o controle de produção e a exploração científica (HAN e KAMBER, 2006).

O conceito de DCBD refere-se ao processo global de descoberta de conhecimento útil a partir dos dados. A mineração de dados é um passo no processo de DCBD na qual consiste a aplicação de análise de dados e algoritmos de descoberta que, sob as limitações de eficiência computacionais aceitáveis, produz uma enumeração particular de padrões (ou modelos) sobre os dados (FAYYAD, PIATETSKY-SHAPIRO e SMYTH, 1996).

Por sua vez, mineração de imagens de sensoriamento remoto trata especificamente do desafio de captar padrões, processos e agentes presentes no espaço geográfico, a fim de extrair conhecimento específico para entender ou para tomar decisões relativas a um conjunto de temas relevantes, incluindo a mudança na terra, variações climáticas e estudos de biodiversidade. Eventos como padrões de desmatamento, correlações de mudança climática e dinâmica de espécies são exemplos de preciosos conhecimentos contidos em repositórios de imagens de sensoriamento remoto (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

Tais abordagens de mineração integram bancos de dados espaciais e questões de mineração de dados, trazendo recursos valiosos para entender fatos e processos representados em dados espaciais, descobrindo relacionamentos espaciais, criando bases de conhecimento espacial, e revelando padrões espaciais e processos contidos em repositórios espaciais (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

Aplicações desta tecnologia incluem, além de sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas, imagens médicas, *geomarketing*, navegação, controle de tráfego, estudos ambientais, e muitas outras áreas onde os dados espaciais são usados (SILVA, CÂMARA e ESCADA, 2008).

## 2.6 O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA DESERTIFICAÇÃO

De acordo com Singh<sup>6</sup> (1989 *apud* Carvalho e Almeida Filho, 2007), a análise multitemporal de imagens de sensoriamento remoto é uma técnica eficiente para detecção de mudanças na cobertura da Terra ao longo dos anos.

O dano à vegetação terá, sem dúvida, um impacto negativo sobre o ambiente. Portanto, investigar os atuais estados da vegetação é de grande importância para explorar o caráter ecológico das áreas estudadas. Assim, além de estudar os aspectos da degradação ecológica de tais áreas, a maioria dos trabalhos existentes neste campo de pesquisa segue três vertentes principais.

A primeira utiliza métodos relacionados com a identificação e avaliação dos processos de degradação da terra. A segunda, por sua vez, aborda métodos para monitorar a evolução de tais processos. Já a terceira vertente de trabalhos, procura modelar o processo de desertificação através de métodos que visam estimar a tendência de evolução de tais processos.

Dentre os trabalhos que apresentam métodos de identificação de áreas afetadas pela desertificação, encontra-se o trabalho de Kasimu e Tateishi (2010).

Em seu estudo, Kasimu e Tateishi (2010) utilizaram dados do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) do ano de 2008 para mapear a dinâmica da vegetação na região de *Xinjiang*, na China. O seu objetivo foi gerar um mapa de cobertura da terra de resolução espacial de 1 km, usando o método de classificação de árvore de decisão C5.0, e em seguida, identificar áreas em risco de desertificação.

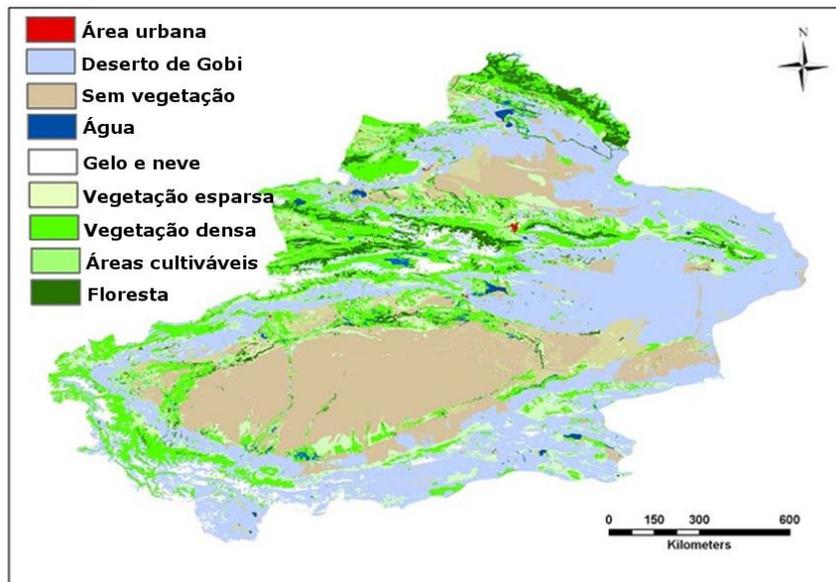
Algumas variáveis foram extraídas dos dados do sensor MODIS, tais como: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDSI (*Normalized Difference Soil Index*).

O resultado da classificação (Figura 4) apresenta o mapa temático da cobertura da terra em *Xinjiang* (KASIMU e TATEISHI, 2010).

---

<sup>6</sup> SINGH, A. Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing*. v. 10, n. 6, p. 989-1003, 1989.

Figura 4 – Mapa de classificação da cobertura da terra em Xinjinang em 2008



Fonte: Kasimu e Tateishi (2010)

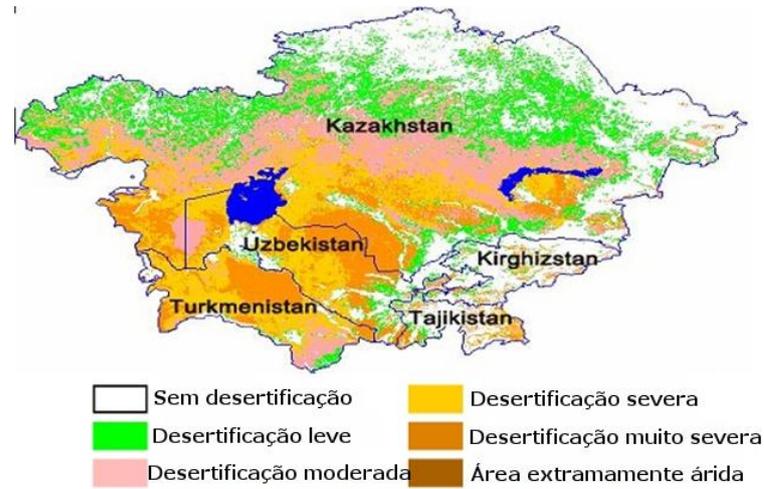
Em outra vertente, o trabalho de Liu *et al.* (2005) teve o objetivo de monitorar a evolução das áreas afetadas por processos de desertificação.

O trabalho propõe um sistema de índice adequado para o monitoramento da desertificação em larga escala, usando técnicas de sensoriamento remoto. A área de estudo abrange cinco países: Uzbequistão, Tadjiquistão, Cazaquistão, Turcomenistão e Quirguistão.

A fim de refletir a natureza e o estado ecológico das terras desertificadas, Liu *et al.* (2005) utilizaram cinco indicadores de desertificação: FVC (*Fractional Vegetation Cover*), MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*), Albedo, LST (*Land Surface Temperature*) e TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*).

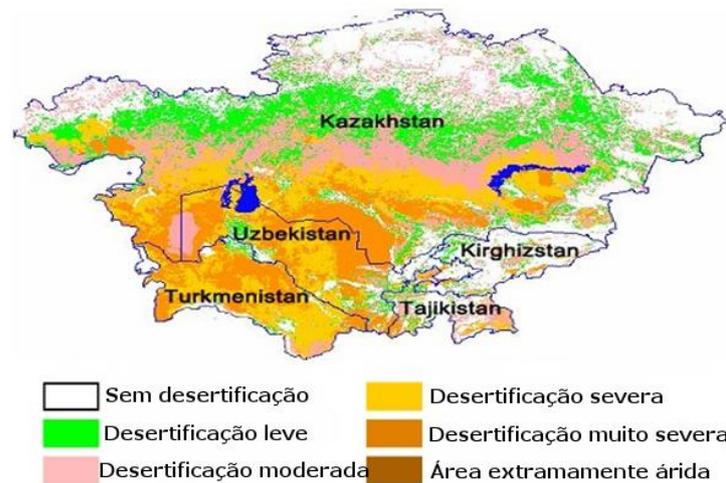
O classificador de árvore de decisão foi utilizado para realizar a classificação do grau de desertificação e, ao final do processo nos dois anos, foi apresentado um mapa com a distribuição da desertificação em 1995 (Figura 5) e em 2001 (Figura 6).

Figura 5 – Distribuição espacial da desertificação na Ásia Central em 1995



Fonte: Liu, *et al.* (2005)

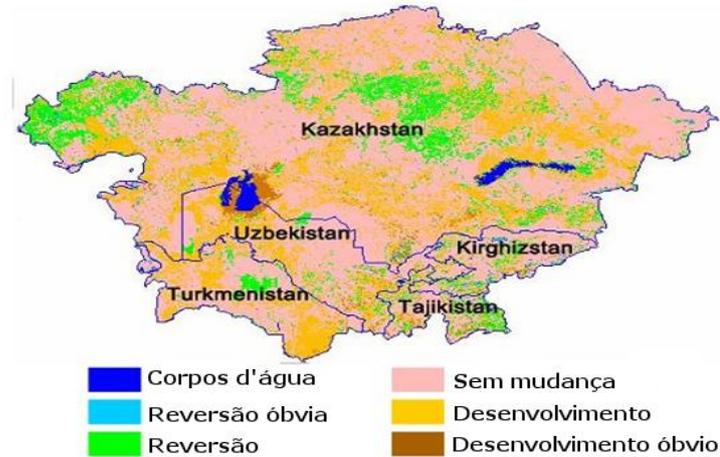
Figura 6 – Distribuição espacial da desertificação na Ásia Central em 2001



Fonte: Liu, *et al.* (2005)

A Figura 7 mostra as mudanças na desertificação na Ásia Central entre os anos de 1995 e 2001. Os graus de mudanças na desertificação foram representados em 5 (cinco) classes: reversão óbvia, reversão, nenhuma mudança, em desenvolvimento e em desenvolvimento óbvio (LIU, *et al.*, 2005).

Figura 7 – Mudanças na dinâmica da desertificação na Ásia Central entre 1995 e 2001



Fonte: Liu, *et al.* (2005)

O trabalho de Xu *et al.* (2009) é outro exemplo na linha de métodos de monitoramento da desertificação. Neste trabalho, o Planalto Ordos na China foi selecionado como a região de pesquisa e tentou-se desenvolver um método para avaliar a desertificação, por meio do desenvolvimento de indicadores a partir de dados Landsat (NASA, 2011), que consideram o efeito de heterogeneidade ambiental e variação sazonal nos valores determinados através do sistema de indicadores (XU, *et al.*, 2009).

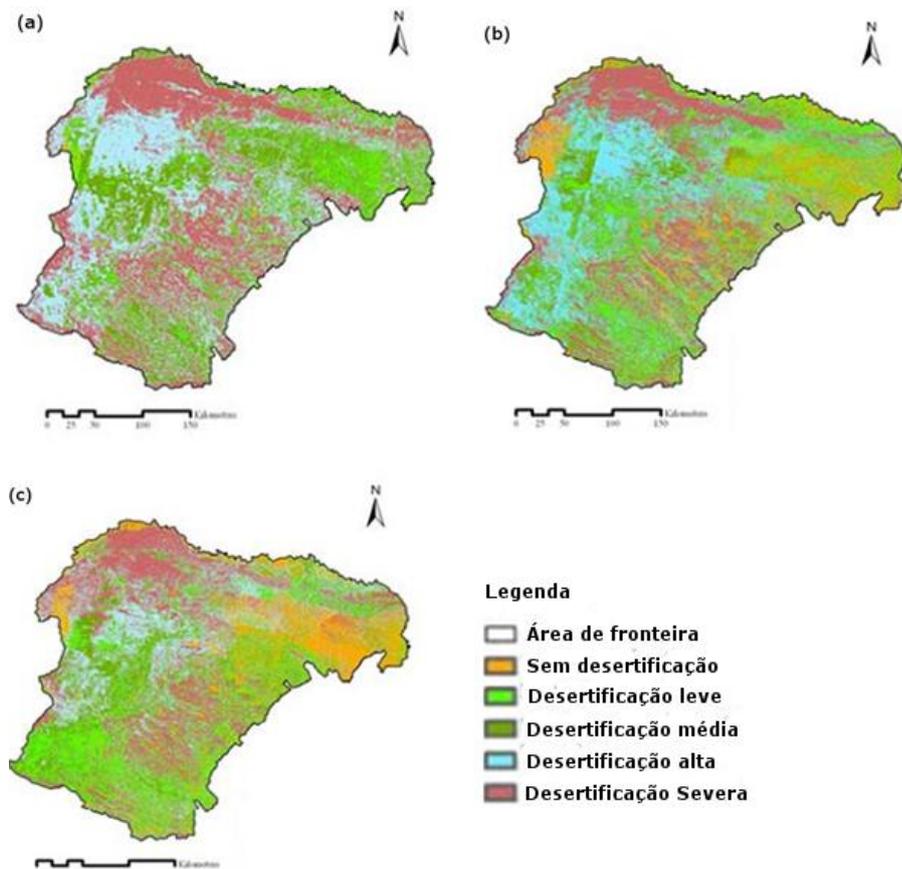
Aqui também foi utilizado o algoritmo de árvore de decisão para realizar a classificação. Para isso, a desertificação nesta área foi classificada em cinco classes: *sem desertificação*, *desertificação leve*, *desertificação média*, *desertificação grave* e *desertificação severa*. A Figura 8 mostra os mapas de desertificação nos anos de 1980, 1990 e 2000.

Além de identificar e monitorar áreas que sofrem de processo de desertificação, alguns trabalhos foram propostos para tentar estimar a tendência de evolução de tais processos.

Um método baseado em Sistema de Informação Geográfica - SIG (do inglês *Geographic Information System - GIS*), Sensoriamento Remoto e o modelo Autômato Celular (AC) foi apresentado por Ding, Chen e Wang (2009) para simular a evolução espaço-temporal da desertificação em Bashang e suas áreas vizinhas na província de Hebei, na China.

A fim de simular com mais precisão a evolução da desertificação, o método de Monte Carlo foi adotado para simular os efeitos aleatórios de desertificação (ATZBERGER, 1952).

Figura 8 – Mapas de desertificação no Ordos em 1980(a), 1990(b) e 2000(c)

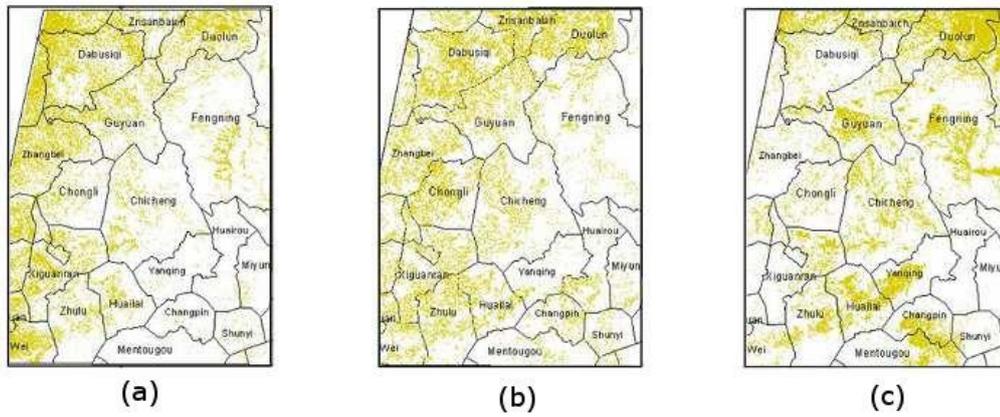


Fonte: Xu, *et al.* (2009)

Imagens de satélite de 1987, 1996 e 2006 e outras informações sobre meteorologia, geologia, dados hidrológicos etc., foram coletadas para a área de estudo. Com base nisso, o sistema de simulação de desertificação foi implementado por meio da integração da teoria de AC ao *software* ArcGIS (ESRI, 2011).

O modelo foi executado várias vezes para ajustar os parâmetros a serem utilizados para prever a tendência da expansão da desertificação em um futuro próximo. O resultado da simulação mostra que a tendência de expansão da desertificação em 1996 e 2000 é homóloga à situação real (Figura 9) (DING, CHEN e WANG, 2009).

Figura 9 – Contraste entre a distribuição da desertificação atual e o resultado da simulação (áreas na cor amarela representam desertificação): (a) Distribuição da desertificação atual em 1996; (b) Resultado da simulação em 1996 e (c) Resultado da simulação em 2010



Fonte: Ding, Chen e Wang (2009)

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda a fundamentação teórica necessária para manipulação de imagens orbitais no estudo de processos de desertificação. A Seção 3.1 apresenta uma visão geral sobre algumas técnicas de pré-processamento utilizadas em imagens de sensoriamento remoto. A Seção 3.2, por sua vez, apresenta a definição de índices de vegetação e o seu uso em estudos de desertificação. Na Seção 3.3 é apresentado o Modelo Linear de Mistura Espectral. Por fim, a Seção 3.4 apresenta os conceitos relacionados com a estimativa de tendência de séries temporais.

#### 3.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

As imagens de sensores remotos muitas vezes são adquiridas com ruídos, que podem comprometer análises temporais. Assim, torna-se necessário a aplicação de técnicas de pré-processamento para deixá-las adequadas ao uso.

Pré-processamento de imagens é definido como o conjunto de processamentos pelo qual passa uma imagem, visando minimizar ao máximo suas distorções. Estas distorções podem ser classificadas em radiométricas e geométricas. As distorções radiométricas alteram os níveis de cinza de cada elemento da imagem. Por sua vez, as distorções geométricas alteram a distribuição espacial dos elementos de imagem, afetando escala, afinidade, orientação, entre outras. Dentre várias técnicas de pré-processamento de imagens disponíveis, existem: georreferenciamento, mosaico, normalização radiométrica, equalização de histograma, correção de registro, entre outras (SANTOS, PELUZIO e SAITO, 2010).

##### 3.1.1 Georreferenciamento

Georreferenciar uma imagem ou mapa é tornar suas coordenadas conhecidas em um dado sistema de referência. Este processo inicia-se com a obtenção das coordenadas (pertencentes ao sistema no qual se planeja georreferenciar) de pontos da imagem ou do mapa a serem georreferenciados, conhecidos como *pontos de controle*. Estes pontos de controle são locais que oferecem uma feição física perfeitamente identificável, tais como: interseções de estradas e de rios, represas, pistas de aeroportos, edifícios proeminentes, topos de montanha, dentre outros. A obtenção das coordenadas dos pontos de controle pode ser realizada em

campo a partir de levantamentos topográficos, GPS (*Global Positioning System*), dentre outros métodos (ROQUE, *et al.*, 2006).

### 3.1.2 Mosaico de Imagens

O mosaico de imagens tem a finalidade de juntar duas (ou mais) imagens para gerar uma imagem maior. Desta forma, uma visão completa das cenas coletadas pelos sensores pode ser obtida. Este processo é utilizado quando a área de estudo é maior que a cena disponibilizada pelo satélite (BAGLI e FONSECA, 2005).

### 3.1.3 Normalização Radiométrica

Durante a aquisição de dados pelos sensores orbitais, existem vários fatores que causam as distorções radiométricas das imagens tais como: a diferença das condições atmosféricas, iluminação, ângulos de visada, entre outros. Para determinadas aplicações, a correção destas distorções é um processo indispensável. Por outro lado, em muitas situações, o processo de correção radiométrica não é uma tarefa fácil, principalmente, quando o procedimento envolve o conhecimento dos fatores que causam tais distorções que nem sempre estão disponíveis (SANTOS, PELUZIO e SAITO, 2010).

Em função disso, na análise multitemporal, vários autores utilizam a normalização (ou retificação) radiométrica ao invés de correção radiométrica. Normalizar radiometricamente duas imagens de datas distintas tem como objetivo compatibilizar as amplitudes dos níveis de cinza dos elementos de imagem em cada banda espectral de uma série multitemporal de imagens. O processo de normalização radiométrica inicia-se com a eleição de uma das imagens temporais como *imagem de referência* e as outras imagens como *imagem de ajuste*. Geralmente, essa técnica consiste em determinar os coeficientes de uma transformação linear, que aplicada à imagem de ajuste, efetua a retificação desejada (SANTOS, PELUZIO e SAITO, 2010).

### 3.1.4 Equalização de Histograma

O histograma de uma imagem é um conjunto de valores indicando o percentual de *pixels* naquela imagem que apresentam um determinado nível de cinza. Estes valores são normalmente representados por um gráfico de barras, que fornece para cada nível de cinza o

número (ou o percentual) de *pixels* correspondentes na imagem. Através da visualização do histograma de uma imagem obtemos uma indicação de sua qualidade quanto ao nível de contraste e quanto ao seu brilho médio (ou seja, se a imagem é predominantemente clara ou escura) (MARQUES FILHO e VIEIRA NETO, 1999).

Cada elemento deste conjunto é calculado de acordo com a Equação 1 (MARQUES FILHO e VIEIRA NETO, 1999):

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (1)$$

Onde:

$$0 \leq r_k \leq 1;$$

$k = 0, 1, \dots, L-1$ , onde  $L$  é o número de níveis de cinza da imagem digitalizada;

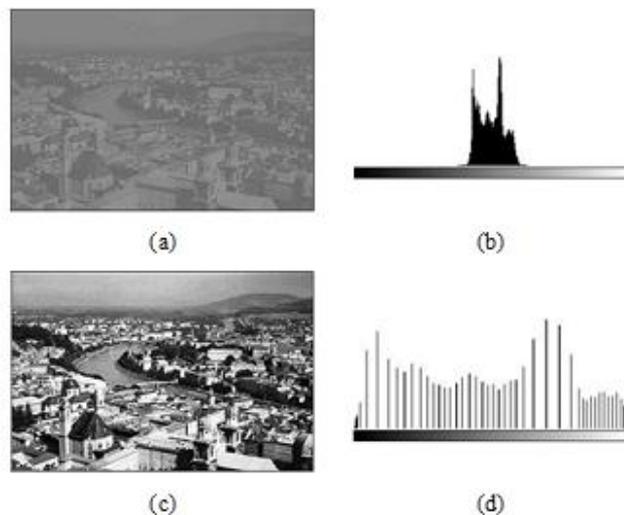
$n$  = número total de *pixels* na imagem;

$p_r(r_k)$  = probabilidade do  $k$ -ésimo nível de cinza;

$n_k$  = número de *pixels* cujo nível de cinza corresponde a  $k$ .

A equalização de histograma é uma técnica a partir da qual se procura redistribuir os valores de tons de cinza dos *pixels* em uma imagem, de modo a obter um histograma uniforme, no qual o número (percentual) de *pixels* de qualquer nível de cinza é praticamente o mesmo. A Figura 10 mostra um exemplo da equalização de histograma em imagens com baixo contraste (MARQUES FILHO e VIEIRA NETO, 1999):

Figura 10 - Aplicação da equalização de histograma em imagens com baixo contraste: (a) imagem original; (b) histograma da imagem original; (c) imagem equalizada; (d) histograma da imagem equalizada



### 3.1.5 Corregistro de Imagem

O corregistro (ou alinhamento geométrico) pode ser definido como a sobreposição de duas ou mais imagens (uma imagem base e uma imagem monitor). Isso pode ser feito mediante algumas operações, tais como: rotação, translação e escala que posicionam alinhadamente as imagens, gerando uma matriz dessa transformação (RODRIGUES, 2010).

## 3.2 USO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO ESTUDO DE PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO

Os índices de vegetação são tipos específicos de transformação radiométrica, comumente utilizadas no intuito de avaliar os recursos naturais e monitorar a cobertura vegetal, em especial na detecção de mudanças de uso e cobertura das terras, pois apresentam uma relação direta e satisfatória com a fitomassa foliar verde (JESUS e MIURA, 2009).

O princípio básico da aplicação dos índices de vegetação reside na premissa que os dosséis verdes e a vegetação saudável possuem interações distintas em regiões do espectro eletromagnético correspondente às faixas do visível e do infravermelho próximo, assim como o comportamento da água e dos solos.

Geralmente, um índice de vegetação é formado pela combinação de bandas espectrais que podem ser adicionadas, subtraídas, divididas ou multiplicadas de forma a produzir um valor único que indique a quantidade ou o vigor de vegetação. Um índice de vegetação com alto valor de brilho indica *pixels* cobertos por uma alta proporção de vegetação viva, ou seja, saudável (SANTOS, PELUZIO e SAITO, 2010).

A forma mais simples de obter o índice de vegetação é pela razão entre duas bandas espectrais. Algumas razões entre bandas têm sido definidas a partir do conhecimento do comportamento espectral da vegetação viva.

Razões entre bandas, geralmente, são quocientes entre medidas de reflectância em porções separadas do espectro. As razões são efetivas em realçar ou revelar informações quando existe uma relação inversa entre duas respostas espectrais para o mesmo fenômeno biofísico (SANTOS, PELUZIO e SAITO, 2010).

Se duas feições têm o mesmo comportamento espectral, as razões entre bandas fornecem poucas informações adicionais. Por outro lado, se elas têm respostas espectrais bem diferentes, a razão entre as bandas fornece um valor único que, concisamente, expressa o contraste entre as duas reflectâncias.

Para a vegetação viva, a estratégia da razão pode ser especialmente efetiva devido à relação inversa entre valores de brilho da vegetação na região do vermelho e infravermelho próximo. Isto é, a absorção da luz vermelha (VM) pela clorofila (80% a 90%) e a alta reflexão da radiação infravermelha (IV) pela mesófila (40 a 50%) asseguram que as características espectrais do vermelho e o infravermelho próximo serão bem diferentes e, conseqüentemente, a razão (IV/VM) será alta. Superfícies não-vegetadas, incluindo água, solo exposto e vegetação morta ou estressada, não terão estas respostas espectrais específicas e, conseqüentemente, suas razões irão decrescer em magnitude. Assim, a razão IV/VM pode fornecer uma medida da importância da reflectância vegetativa dentro de um dado *pixel* (SANTOS, PELUZIO e SAITO, 2010).

Dentre os muitos índices de vegetação existentes, o NDVI é uma das muitas medidas mais usadas para medir o vigor da vegetação. Ele permite identificar a presença de vegetação na superfície e caracterizar sua distribuição espacial, bem como identificar sua evolução no decorrer do tempo (SILVA, *et al.*, 2009).

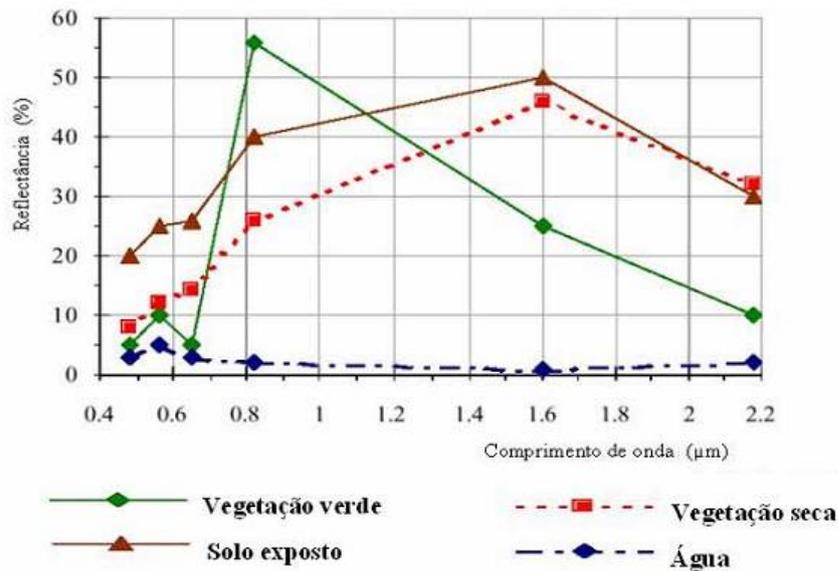
Este índice também pode ser utilizado para auxiliar os estudos que tratam da temática da desertificação, pois a partir das imagens geradas é possível observar áreas que apresentem níveis baixos ou ausentes de NDVI, característica de áreas que estejam sob processo de degradação, ou seja, potencialmente susceptíveis ao processo de desertificação (ARAÚJO, *et al.*, 2010).

### 3.3 MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL APLICADO AO MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO

Imagens de sensoriamento remoto normalmente apresentam *pixels* misturados, devido à variação e proximidade dos alvos na superfície. Em geral, todos os materiais na natureza apresentam, em um determinado comprimento de onda do espectro eletromagnético, um comportamento espectral próprio ao interagir com os fótons de luz. Estas diferenças podem ser notadas, por exemplo, para o solo exposto, vegetação verde (fotossinteticamente ativa) ou seca, e água ou sombra (Figura 11) (FERREIRA, 2003).

Também contribuem à mistura no sinal, principalmente entre *pixels*, fatores espúrios à obtenção das imagens, em particular aqueles devido à contaminação atmosférica e variações na geometria de aquisição. Desta forma, a radiância observada em um dado ponto é resultado de uma mistura espectral originada pela resposta de cada um destes componentes contidos no *pixel*. (SHIMABUKURO e SMITH, 1995; VERHOEYE e DE WULF, 2002).

Figura 11 - Curvas de reflectância da vegetação verde, vegetação seca (não-fotossintética), solo exposto e água.



Fonte: Ferreira (2003)

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) possui como objetivos básicos: reduzir o volume de dados a serem utilizados em um processamento (por exemplo, classificação de imagens) e realçar os alvos de interesse. Este modelo fundamenta-se no pressuposto de que a resposta espectral de um *pixel*, numa imagem qualquer (bandas 1, 2, ...,  $m$ ), seria uma combinação linear dos espectros de diversos materiais contidos na superfície. Nestas condições, para qualquer imagem (multiespectral ou hiperespectral) e sendo as respostas espectrais dos componentes conhecidas, as proporções destes podem ser estimadas, de forma individual, por meio da geração de imagens-fração solo, sombra e vegetação. As três bandas geradas representam a proporção de vegetação, solo e sombra existente em cada *pixel* da imagem (SHIMABUKURO e SMITH, 1995; SHIMABUKURO, *et al.*, 1998).

Cada imagem-fração pode ser obtida através da aplicação do Modelo de Mistura apresentado na Equação 2. Por sua vez, a Equação 3 refere-se ao termo de erro da primeira equação, correspondendo aos valores residuais presentes em cada *pixel*, não solucionados pelo método de análise proposto (FERREIRA, *et al.*, 2003).

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij}x_{ij}) + e_i \quad (2)$$

$$e_i = r_i - \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_{ij}) \quad (3)$$

Onde:  $r_i$  é a reflectância espectral observada na banda  $i$  de um *pixel*, contendo um ou mais componentes;  $a_{ij}$  é a reflectância espectral do componente  $j$  dentro de um *pixel*;  $e_i$  é o erro para a banda  $i$  (contribuição residual não considerada pelo conjunto de *endmembers*);  $j = 1, 2, 2, \dots, n$  (número de componentes);  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  (número de bandas espectrais).

O MLME deve seguir as restrições apresentadas na Equação 4 e 5, as quais orientam a análise das proporções de cada componente amostrado na imagem (FERREIRA, *et al.*, 2003).

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad (4)$$

$$\sum x_j = 1 \quad (5)$$

Dessa forma, os valores nas imagens-fração (bandas sintéticas) devem variar de 0 (*pixels* escuros) a 1 ou 100% (*pixels* claros), indicando, respectivamente, a menor e a maior proporção do componente identificado nas imagens-fração (FERREIRA, *et al.*, 2003).

O uso de imagens-fração permite reduzir a dimensionalidade dos dados e realçam as informações desejadas. A imagem-fração correspondente à vegetação realça a cobertura vegetal. A imagem-fração solo realça áreas de solo exposto, e por fim, a imagem-fração sombra/água realça corpos d'água e áreas alagadas (a sombra é considerada por apresentar a mesma resposta espectral que corpos d'água) (SHIMABUKURO, *et al.*, 1998).

Segundo Metternight e Fermont (1998), é possível identificar e realizar o mapeamento da degradação do solo relacionada aos processos erosivos em regiões semiáridas através do MLME. No referido trabalho, esta técnica demonstrou que feições de erosão podem ser mapeadas, e que esse método pode ser combinado com a análise visual das imagens, permitindo um refino na análise.

O MLME é também apropriado para o monitoramento de áreas desertificadas visto que permite distinguir as proporções de solo, vegetação e sombra. Nas regiões áridas é muito comum a mistura entre vegetação e solo em diferentes proporções, portanto, o emprego deste algoritmo aumentaria a precisão da avaliação da área desertificada (COLLADO, CHUVIECO e CAMARASA, 2002).

### 3.4 ESTIMATIVA DE TENDÊNCIA DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS

A classe de fenômenos cujo processo observacional e consequente quantificação numérica gera uma sequência de dados distribuídos no tempo é denominada *série temporal* (SOUZA, 1989).

Granger e Newbold<sup>7</sup> (1977 *apud* PASSOS, 2005) consideram como objetivo inicial da análise de séries temporais a realização de inferências sobre as propriedades ou características básicas do mecanismo gerador do processo estocástico das observações da série. Da mesma forma, Bussab<sup>8</sup> (1988 *apud* PASSOS, 2005) considera que ao analisar os dados, a estatística deve se preocupar com a criação de modelos que explicitem estruturas do fenômeno em observação, as quais frequentemente estão misturadas com variações acidentais ou aleatórias. Além disso, Bussab e Morettin (2003) afirmam que ao se proceder a uma análise de dados, busca-se de alguma forma uma regularidade, um padrão ou um modelo presente nas observações.

Assim, através da abstração de regularidades contidas nos fenômenos observáveis de uma série temporal, existe a possibilidade de se construir um modelo matemático como uma representação simplificada da realidade (Barbancho, 1970 *apud* PASSOS, 2005).

Por sua vez, Milone e Angelini (1995) definem modelo matemático como o conjunto das variáveis consideradas em combinação com o modo como elas se relacionam. Não existem modelos perfeitos, porque não há como identificar e controlar todas as variáveis envolvidas nos fenômenos em estudo, de maneira que os resultados fornecidos pelos modelos são sempre aproximados. A qualidade de um dado modelo matemático pode ser medida quando aplicada em situações reais, cujos resultados sejam previamente conhecidos. Assim, se ao efetuar a comparação entre os dados reais e teóricos, os valores obtidos forem razoavelmente próximos, o modelo escolhido ou adotado é bom, mas, caso os resultados se apresentem muito dispares, tanto as variáveis consideradas quanto as relações entre elas devem ser reavaliadas.

Após a formulação do modelo matemático, obtido pela seleção entre as alternativas de classes de modelos identificadas como apropriadas para essa representação e subsequente estimação de seus parâmetros, é possível utilizá-lo para testar alguma hipótese ou teoria a

---

<sup>7</sup> GRANGER, C. W. J.; NEWBOLD, P. **Forecasting Economic Time Series**. New York: Academic Press, 1977.

<sup>8</sup> BUSSAB, W. D. O. **Análise de Variância e de Regressão**. São Paulo: Atual, 1988.

respeito do mecanismo gerador do processo estocástico e realizar a previsão de valores futuros da série temporal (PASSOS, 2005).

Estatisticamente, as séries temporais são indicadores quantitativos e sua análise tem por objetivo investigar o mecanismo gerador, descrever o comportamento e fazer prognósticos. Podem expressar tendências, ciclos e variabilidade relevantes ou se revelar aleatórias, derivando daí seu interesse para a climatologia (CONTI, 2005).

Imagens e dados obtidos por sensoriamento remoto são fontes valiosas de informação para pesquisas sobre desertificação. Considerando países de dimensões territoriais, como o Brasil, imagens de satélite permitem que grandes extensões terrestres sejam monitoradas continuamente. Como há diversos tipos de satélite, com periodicidade de captura e resolução espacial diferentes, é importante poder integrar as informações contidas nas imagens que envolvem a mesma região, de modo a garantir que as diferenças de informação coletadas possam ser efetivamente utilizadas para o benefício dos analistas e especialistas em estudos ambientais (CHINO, ROMANI e TRAINA, 2010).

### **3.4.1 Métodos de Estimativa de séries Temporais**

A estimativa não constitui um fim em si, mas um meio de fornecer informações e subsídios para uma conseqüente tomada de decisão, visando atingir determinados objetivos (MORETTIN e TOLOI, 2004). Segundo Barbancho (1970 *apud* PASSOS, 2005), uma estimativa é uma manifestação relativa a sucessos desconhecidos em um futuro determinado.

Por sua vez, Wheelwright e Makridakis (1985) definem um método de estimativa como sendo o conjunto de procedimentos usados no desenvolvimento de uma determinada previsão.

Os métodos de estimativa de séries temporais, classificados como métodos quantitativos, baseiam suas previsões na extrapolação de características de observações passadas e no inter-relacionamento entre essas observações, fornecendo previsões acuradas se o futuro apresentar comportamento similar ao passado (WHEELWRIGHT e MAKRIDAKIS, 1985).

De acordo com Wheelwright e Makridakis (1985), a maioria dos métodos de previsão de séries temporais se baseia na suposição de que observações passadas contêm todas as informações sobre o padrão de comportamento da série temporal e esse padrão é recorrente no tempo. O propósito dos métodos de previsão consiste em distinguir o padrão de qualquer ruído que possa estar contido nas observações e então usar esse padrão para prever os valores

futuros da série temporal. Assim, pela identificação desse componente, a previsão para períodos de tempo subsequentes ao observado pode ser desenvolvida.

Os modelos de regressão baseiam-se no relacionamento entre duas ou mais variáveis de forma que uma delas possa ser explicada ou ter seu valor estimado por meio de outras variáveis. No caso de dados espaciais, havendo autocorrelação espacial, o modelo gerado deve incorporar a estrutura espacial, já que a dependência entre as observações afeta a capacidade de explicação do modelo (CÂMARA, *et al.*, 2004).

### 3.4.2 Regressão Linear

A Regressão Linear é um modelo de relação entre uma variável aleatória dependente  $y$  e uma variável independente  $x$ . O objetivo é encontrar uma reta que encaixe, tanto quanto possível, nas observações (ALVES, VIANA e SALES, 2009). A função de Regressão Linear é apresentada abaixo pela Equação 6:

$$y = a + bx + e \quad (6)$$

Onde:  $y$  é a variável dependente;  $x$  é a variável independente;  $a$  e  $b$  são as ordenadas na origem (ou intercepto) e de inclinação, respectivamente e “ $e$ ” é o erro vindo do caráter aleatório de  $y$ .

A equação do modelo de regressão linear ajustada ao método de extrapolação de séries temporais de imagens é dada pela Equação 7, onde  $(x,y)$  correspondem às coordenadas do *pixel* de interesse;  $I_1(x,y,t)$  representa o nível de cinza dos *pixels* de cada sequência na  $t$ -ésima tentativa, ou observação;  $t=1,2,3,\dots,n$  é a variável independente de tempo; o subíndice  $1$  indica que um ajuste linear entre duas sequências sucessivas de imagens foi usado para calcular a extrapolação em um tempo futuro após a segunda sequência;  $a_1$  é o coeficiente de regressão (coeficiente angular); e, finalmente,  $b_1$  representa o coeficiente linear. Assim,  $a_1$  e  $b_1$  representam os parâmetros de ajuste da regressão linear no tempo.

$$I_1(x, y, t) = a_1(x, y)t + b_1(x, y) \quad (7)$$

Portanto, para encontrar uma imagem extrapolada no tempo usando-se o método de regressão linear é necessário ter uma sequência em um dado período de tempo – que

corresponde ao instante inicial de tempo, isto é,  $t=0$  – e outra sequência em um ponto posterior no tempo. É também necessário determinar os valores de  $a_1$  e  $b_1$ . Para isto,  $b_1$  pode ser definido assumindo que  $t$  é igual a 0 (zero) na Equação 7. De forma similar,  $a_1$  pode ser estimado pela Equação 7, assumindo que  $t$  corresponde ao período de tempo posterior, correspondente à segunda sequência, e substituindo o valor de  $b_1$ .

### 3.4.3 Regressão Quadrática

A Regressão Quadrática é um modelo de relação entre uma variável aleatória dependente  $y$  e uma variável independente  $x$ . O objetivo é encontrar uma parábola que encaixe, tanto quanto possível, nas observações (ALVES, VIANA e SALES, 2009). A função da regressão quadrática e demonstrada abaixo pela Equação 8:

$$y = ax^2 + bx + c + e \quad (8)$$

Onde:  $y$  é a variável dependente ou explicada;  $x$  é a variável independente ou explicativa;  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros da equação quadrática.

A equação do modelo de regressão quadrática ajustada ao método de extrapolação de séries temporais de imagens é dada pela Equação 9, onde:  $t=1,2,3,\dots,n$  é a variável independente do tempo e  $I_2(x,y,t)$ , da mesma forma que  $I_1(x,y,t)$ , representa o nível de cinza dos *pixels* de cada sequência na  $t$ -ésima tentativa, ou observação; da mesma forma,  $(x,y)$  corresponde às coordenadas dos *pixels* de interesse. Além disso, o subíndice 2 indica que um ajuste polinomial quadrático (de ordem 2), entre três sequências sucessivas, foi usado para calcular a extrapolação em um tempo futuro após terceira sequência;  $a_2$ ,  $b_2$  e  $c_2$  são parâmetros da regressão quadrática e representam os parâmetros do ajuste da regressão quadrática no tempo.

$$I_2(x, y, t) = a_2(x, y)t^2 + b_2(x, y)t + c_2(x, y) \quad (9)$$

Portanto, para encontrar uma imagem extrapolada no tempo usando a regressão quadrática, é necessário ter uma sequência em um dado período de tempo, que corresponde ao instante inicial do tempo ( $t=0$ ), e outras duas sequências em instantes de tempos posteriores diferentes. Também é necessário determinar os valores de  $a_2$ ,  $b_2$  e  $c_2$ . Para isto,  $c_2$  pode ser definido assumindo que  $t$  é igual a 0 (zero) na Equação 9. Para definir  $a_2$  e  $b_2$  é necessário

resolver o sistema linear que é formado ao substituir os diferentes instantes de tempo posteriores na Equação 9 que estão associados com as amostras conhecidas das séries temporais conhecidas nesses períodos de tempo, e substituir o valor de  $c_2$  nelas.

## **4 ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO**

Este capítulo apresenta as características da área de estudo e a metodologia utilizada para estimar os processos de desertificação. A Seção 4.1 descreve as características gerais do município de Gilbués no Estado do Piauí. A Seção 4.2, por sua vez, apresenta os uma visão geral da metodologia e dos dados utilizados durante a produção do trabalho. Por fim, a Seção 4.3 apresenta os métodos de estimativa de tendência de séries temporais utilizados para estimar a tendência de evolução dos processos de desertificação.

### **4.1 O MUNICÍPIO DE GILBUÉS**

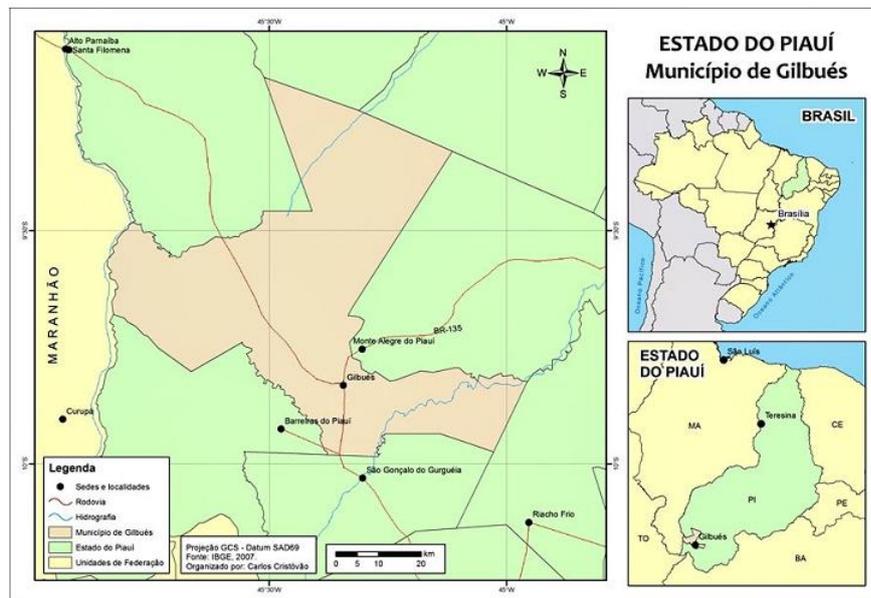
O modelo de desenvolvimento econômico adotado no Estado do Piauí, desde o início da colonização, esteve alicerçado, durante muitas décadas, na criação extensiva de bovinos, portanto explorando a base natural com maior ou menor intensidade. Deve ser notado que o Piauí contava com os maiores e melhores rebanhos bovinos da região Nordeste, a partir de meados do século XVIII, quando dominou o mercado colonial de carne seca até ser suplantado, no final deste século, pelo charque do Estado do Rio Grande do Sul. A criação extensiva de bovinos é uma das causas da degradação dos solos, pois resulta em pisoteio e compactação, propiciando o transporte de expressivos volumes de terra pelas chuvas para o leito dos rios, agravada pela agricultura nômade e desprovida de técnicas conservacionistas (VIEIRA e LIMA, 2007; CREPANI, 2009).

A região Sul do Estado do Piauí, mais precisamente os municípios de Gilbués, Barreiras do Piauí, Monte Alegre do Piauí e São Gonçalo do Gurgueia, compreendem uma área em avançado processo de desertificação, que teve início com a lavoura de subsistência e a prática de queimadas, tendo se agravado a partir de meados da década de 40 do século passado, com a descoberta de diamantes na região, explorados até a exaustão. Nos dias de hoje, o processo de degradação ambiental é também motivado pelo desmatamento para a implantação de pastagens, expondo os solos arenosos e friáveis da região, que favorecem processos erosivos.

Por sua importância e por apresentar a maioria dos fatores causadores do processo de desertificação, a área de estudo deste trabalho se concentra no município de Gilbués no Estado do Piauí. O município está localizado na microrregião do Alto Médio Gurgueia, tendo

como limites: ao Norte, os municípios de Baixa Grande do Ribeiro, Bom Jesus e Santa Filomena; ao Sul, os municípios de Barreiras do Piauí e São Gonçalo do Gurgueia; a Leste, os municípios de Monte Alegre do Piauí e Riacho Frio; e a Oeste, os municípios de Barreiras do Piauí, Santa Filomena e o Estado do Maranhão, compreendendo uma área irregular de 3.475,18 km<sup>2</sup>. A sede municipal tem as coordenadas geográficas de 09°49'55" de latitude Sul e 45°20'38" de longitude Oeste de *Greenwich* e está a 797 km de distância de Teresina, capital do Estado. A principal via de circulação é a Rodovia Federal BR 135. A Figura 12 apresenta a localização da área de estudo. Já a Figura 13 ilustra uma vasta área do município caracterizada por solos extremamente expostos (AGUIAR e GOMES, 2004; IICA, 2010).

Figura 12 - Mapa da localização do município de Gilbués



Fonte: SILVA *et al.* (2010)

Figura 13 - Áreas com solo exposto no município de Gilbués

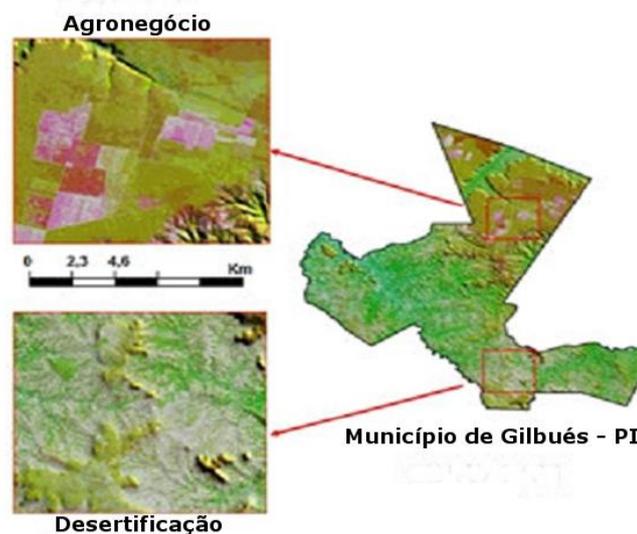


Fonte: IICA (2010)

O município foi criado pelo Decreto-Lei nº 52 de 29/03/1938. A população total, segundo o Censo 2010 do IBGE, é de 10.213 habitantes, onde 57.6% das pessoas residem na zona urbana e 42.4% estão na zona rural (IBGE, 2010).

A preocupação gerada pela convivência entre os fenômenos de degradação e agronegócio resultou em trabalhos que buscam o desenvolvimento sustentável nesta região. A Figura 14 ilustra espacialmente o desafio do desenvolvimento sustentável que se estabelece na região de Gilbués. Nela pode-se perceber que as terras ao Norte do município são destinadas ao agronegócio, ao passo que no sul o processo de desertificação está acelerado. Portanto, o controle dos efeitos causados pela desertificação podem evitar que as áreas destinadas ao agronegócio sejam atingidas por tais fenômenos (CREPANI, 2009).

Figura 14 - O desafio do desenvolvimento sustentado: desertificação e agronegócio



Fonte: Crepani (2009)

De um lado, o município de Gilbués sofre as consequências dos processos de desertificação, que se manifestam na forma de áreas com acentuada taxa de erodibilidade dos solos (IICA, 2010). De outro lado, segundo a Embrapa (2010), o município é um dos maiores produtores de soja do Estado do Piauí. Portanto, conviver com essas situações extremas dentro da mesma unidade político-administrativa configura-se o desafio do desenvolvimento sustentado e a receita para vencê-lo passa pelo conhecimento do território, desde suas características físicas até seu estado atual de uso, para que suas fraquezas sejam respeitadas e suas potencialidades exploradas (IICA, 2010).

#### **4.1.1 Aspectos Fisiográficos**

As condições climáticas do município de Gilbués (com altitude da sede a 481 m acima do nível do mar) apresentam temperaturas mínimas de 25°C e máximas de 36°C, com clima quente e semiúmido. A precipitação pluviométrica média anual é definida no Regime Equatorial Continental, com isoietas anuais em torno de 800 a 1200 mm e período chuvoso estendendo-se de novembro/dezembro a abril/maio. O trimestre mais úmido corresponde aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (AGUIAR e GOMES, 2004).

#### **4.1.2 Recursos Hídricos**

O município de Gilbués está inserido na Bacia Hidrográfica do Parnaíba, com sua nascente na Chapada das Mangabeiras, fronteira do Piauí com o Estado do Tocantins. Esta Bacia é considerada parte integrante da Bacia Hidrográfica do Nordeste e possui cerca de 342.988 km<sup>2</sup>, dos quais 249.374 km<sup>2</sup> pertencem ao Piauí. Pode ser dividida em Alto Parnaíba, Médio Parnaíba e Baixo Parnaíba, e abrange porções dos estados do Maranhão e Ceará. O município de Gilbués está localizado na região do Alto Parnaíba (LOBOZIAK, CAPUTO e MELO, 2000).

Os principais rios presentes na região de estudo são os rios Uruçuí Vermelho, Uruçuí Preto e Gurgueia, além dos riachos São Miguel e Santa Maria. O padrão de drenagem predominante é o dendrítico, isoladamente tendendo a pinado (SILVA-FILHO, LIMA e FERREIRA, 1994).

Nesta região o processo de assoreamento dos rios é bastante comum, em virtude de sedimentos oriundos do processo erosivo corrente na área. A deposição de sedimentos nos rios acaba por alterar os cursos d'água, gerando feições denominadas meandros abandonados (GALVÃO, 1994).

#### **4.1.3 Vegetação**

A área de estudo está inserida na faixa de transição entre o domínio dos cerrados do Brasil Central e o domínio do semiárido do Nordeste brasileiro. Desta forma, sua cobertura vegetal caracteriza-se por uma variação entre cerrado (árvores esparsas de pequeno porte e tronco retorcido) e caatinga, predominando, no entanto, espécimes pertencentes ao cerrado. Apenas pequenas porções do município apresentam áreas onde a vegetação permanece

inalterada, geralmente restrita aos topos de morros e encostas mais íngremes (GALVÃO, 1994; CARVALHO e ALMEIDA FILHO, 2007).

#### **4.1.4 Caracterização e Análise Geomorfológica e Pedológica**

A Geomorfologia predominante da região do município de Gilbués é de Chapadas tabulares/tabuliformes isoladas e cuestras, em vasta superfície de aplainamento, limitada por escarpas que podem atingir 600 metros. A região de estudo também se encontra inserida na área dos Chapadões do Alto Médio Parnaíba, que constituem chapadas com altitudes decrescentes de Sul para Norte, variando entre 700 e 300 metros (SILVA, *et al.*, 2010).

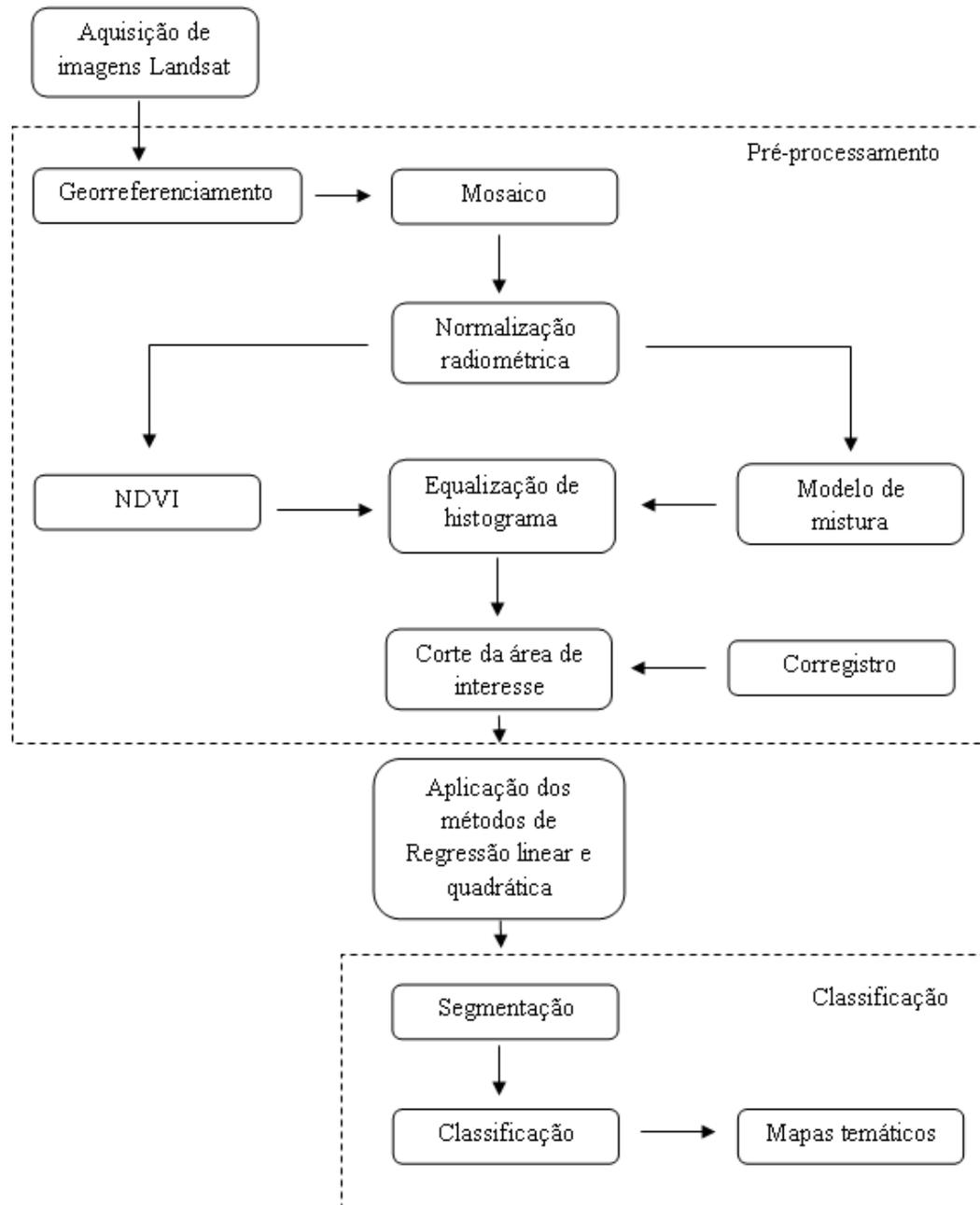
O solo predominante é do tipo Latossolo Vermelho Amarelo com textura média, são provenientes da alteração de arenito, conglomerado, folhelho, calcário, silexito e siltito, são espessos, friáveis, porosos, jovens, com influência do material subjacente, predominando os latossolos amarelos álicos ou distróficos de textura média, associados com areias quartzosas e/ou podzólico vermelho-amarelo, plíntico ou não plíntico (GALVÃO, 1994).

Essas litologias são extremamente vulneráveis à erosão, são representadas por siltitos, arenitos e conglomerados, pertencentes às formações Pedra de Fogo, Piauí e Urucuia. A lateritização é um processo frequente nos solos da região. Tais tipos de solo, apresentados anteriormente favorecem os processos de erosão e voçorocas e aceleram a desertificação na região de Gilbués (SALES, 1997). Além disso, os solos da área de estudo são predominantemente arenosos, pobres em matéria orgânica e com baixa umidade. Os processos erosivos em Gilbués são frequentemente, comandados pela ação eólica, pois o trabalho dos ventos em regiões subúmidas e semiáridas é mais intenso do que nas regiões úmidas (SILVA, *et al.*, 2010).

#### **4.2 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA**

A metodologia desenvolvida neste trabalho visa a implementação de métodos para estimar a tendência de evolução dos processos de desertificação. O processo foi dividido em fases, tais como: aquisição de dados, pré-processamento, extrapolação e classificação de imagens. As fases do processo estão representadas na Figura 15 e descritas em detalhes nas seções seguintes deste capítulo.

Figura 15 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria

De acordo com a Figura 15, o primeiro passo da metodologia foi a aquisição de uma sequência de imagens do satélite Landsat 5 - TM. Estas imagens foram os dados de entrada para o processo.

Na fase seguinte, as imagens foram pré-processadas e, em seguida, foram extraídos o NDVI e as imagens-fração do Modelo Linear de Mistura Espectral.

Além disso, para que a validação dos resultados fosse mais efetiva, por meio de uma pesquisa de campo uma área do município foi selecionada e recortada, onde foram aplicados os métodos de estimativa de séries temporais.

Após a aplicação dos algoritmos de estimativa de séries temporais de imagens, a fase de classificação foi realizada. Algoritmos de segmentação e de classificação supervisionada foram aplicados sobre as imagens com o intuito de avaliar a evolução do processo de desertificação na área de estudo.

#### 4.2.1 Aquisição de Imagens

Neste estudo, uma sequência de imagens Landsat 5 - TM entre os anos de 1998 e 2010 foi utilizada para estimar a tendência de evolução do processo de desertificação em Gilbués (DGI, 2011). A Tabela 2 apresenta as informações sobre as imagens, tais como o ano de referência, a data, as cenas e as bandas utilizadas.

Tabela 2 - Imagens Landsat 5 - TM utilizadas

Ano	Data	Cenas	Bandas
1998	14/08/1998	220/66 e 220/67	3, 4 e 5
2001	21/07/2001	220/66 e 220/67	3, 4 e 5
2004	13/07/2004	220/66 e 220/67	3, 4 e 5
2007	07/08/2007	220/66 e 220/67	3, 4 e 5
2010	15/08/2010	220/66 e 220/67	3, 4 e 5

Fonte: Aatoria própria

As imagens foram coletadas no mesmo período do ano (entre os meses de julho e agosto) para tentar diminuir as diferenças na cobertura vegetal, causadas por períodos chuvosos e períodos de seca.

#### 4.2.2 Técnicas de Pré-Processamento Utilizadas

As imagens de todos os anos foram pré-processadas usando as técnicas de georreferenciamento, mosaico, normalização radiométrica, equalização de histograma e

corregistro. Em seguida, foram extraídos o NDVI e as imagens-fração do Modelo Linear de Mistura Espectral.

Para realizar a fase de pré-processamento, utilizou-se os *softwares* Spring (CÂMARA, *et al.*, 1996) e o Terraview (TERRAVIEW, 2010).

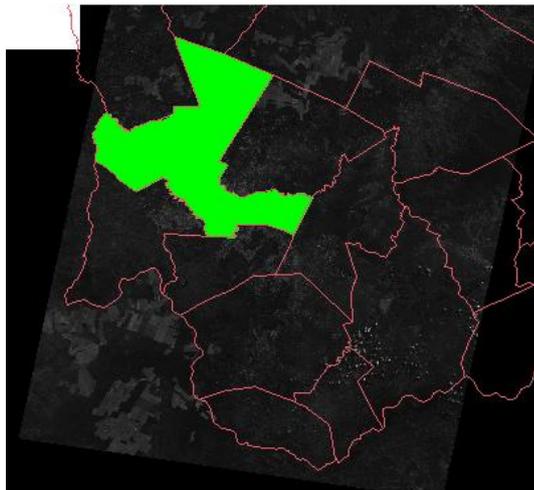
#### 4.2.3 Georreferenciamento da Sequência de Imagens

As imagens de todos os anos foram georreferenciadas pelo *software* Spring, tendo como base as cenas do satélite Landsat 5 - TM 220/66 e 220/67 do ano de 2007 fornecida pelo SISCOM (Sistema Compartilhado de Informações Ambientais) do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) (SISCOM, 2012).

#### 4.2.4 Mosaico

Como a área do município de Gilbués é coberta por duas cenas do satélite Landsat 5 - TM (220/66 e 220/67), as mesmas foram fundidas utilizando a ferramenta de mosaico do Spring. A Figura 16 mostra a imagem resultante do processo de mosaico de duas cenas realçando o município de Gilbués.

Figura 16 - Mosaico contendo a área do município de Gilbués



Fonte: A autoria própria

#### 4.2.5 Normalização Radiométrica

Neste estudo, foi utilizado o método de Uniformização das Médias e Variâncias sobre as bandas 3, 4 e 5 do satélite Landsat referentes à área de estudo (LEONARDI, SOUZA e FONSECA, 2003).

As bandas 3, 4 e 5 do ano de 2010 foram utilizadas como imagens de referência para ajustar as bandas dos anos anteriores. A Tabela 3 apresenta os valores de média e variância nas três bandas de 2010. Por sua vez, a Tabela 4 apresenta os valores para a média e variância, antes e depois de ser aplicada a técnica de normalização radiométrica.

Tabela 3 - Média e variância da imagem de 2010 nas bandas 3, 4 e 5

<b>Imagem</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
2010 (banda 3)	39.11	156.94
2010 (banda 4)	61.75	88.65
2010 (banda 5)	103.36	645.30

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 - Média e variância das demais imagens nas bandas 3, 4 e 5

<b>Imagem</b>	<b>Antes da Normalização</b>		<b>Depois da Normalização</b>	
	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
1998 (banda 3)	36.86	128.10	38.62	157.31
1998 (banda 4)	58.95	103.48	61.27	88.40
1998 (banda 5)	96.62	595.92	102.87	646.07
2001 (banda 3)	29.17	88.88	38.57	157.97
2001 (banda 4)	52.44	57.54	61.21	88.91
2001 (banda 5)	80.71	421.84	102.87	645.45
2004 (banca 3)	41.62	179.99	38.59	157.60
2004 (banca 4)	63.89	114.18	61.26	88.90
2004 (banca 5)	100.98	641.31	102.98	640.88
2007 (banca 3)	39.64	150.49	38.68	153.89
2007 (banca 4)	62.39	95.21	61.29	89.59
2007 (banca 5)	102.13	608.26	102.87	645.09

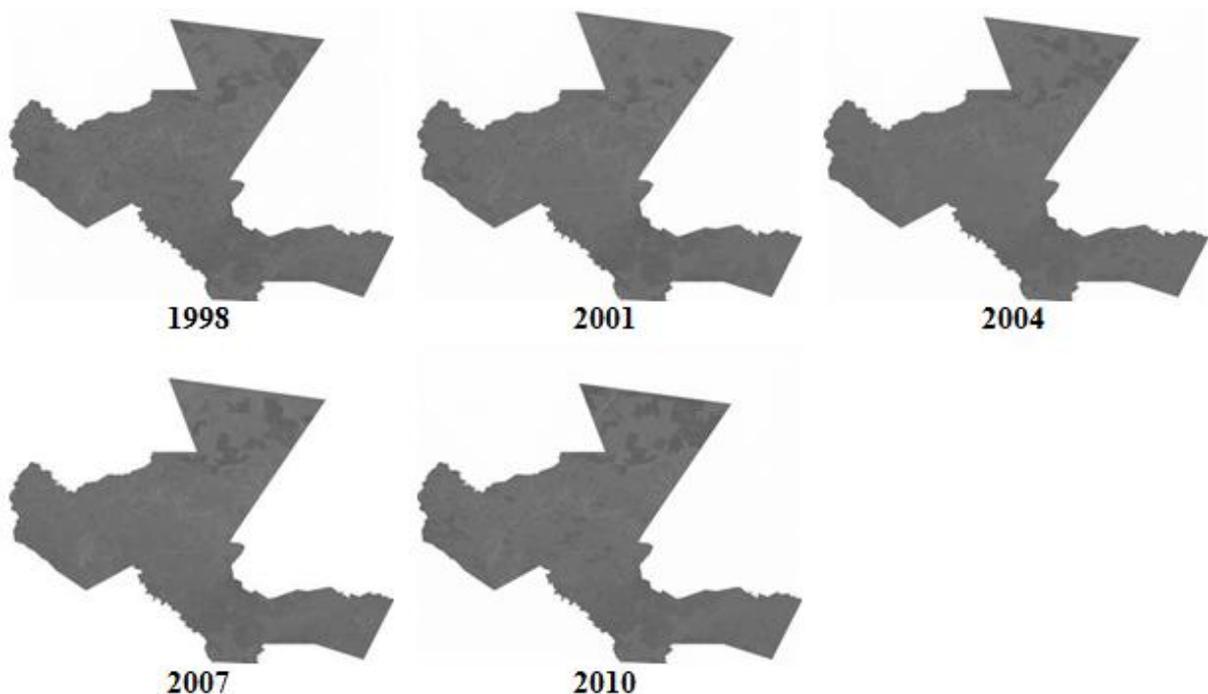
Fonte: Autoria própria

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4, pode-se perceber que os valores de média e variância de todas as bandas se aproximaram dos valores das bandas de referência do ano de 2010, após serem submetidas ao processo de normalização radiométrica. Isto ajuda a diminuir as distorções existentes entre as imagens da sequência temporal.

#### 4.2.6 Extração do NDVI

De posse das bandas 3 e 4, o NDVI foi extraído da sequência de imagens anteriormente pré-processada. O Spring foi utilizado para executar esta tarefa. A Figura 17 apresenta os NDVI gerados para anos entre 1998 e 2010.

Figura 17 - NDVI dos anos de 1998, 2001, 2004, 2007 e 2010



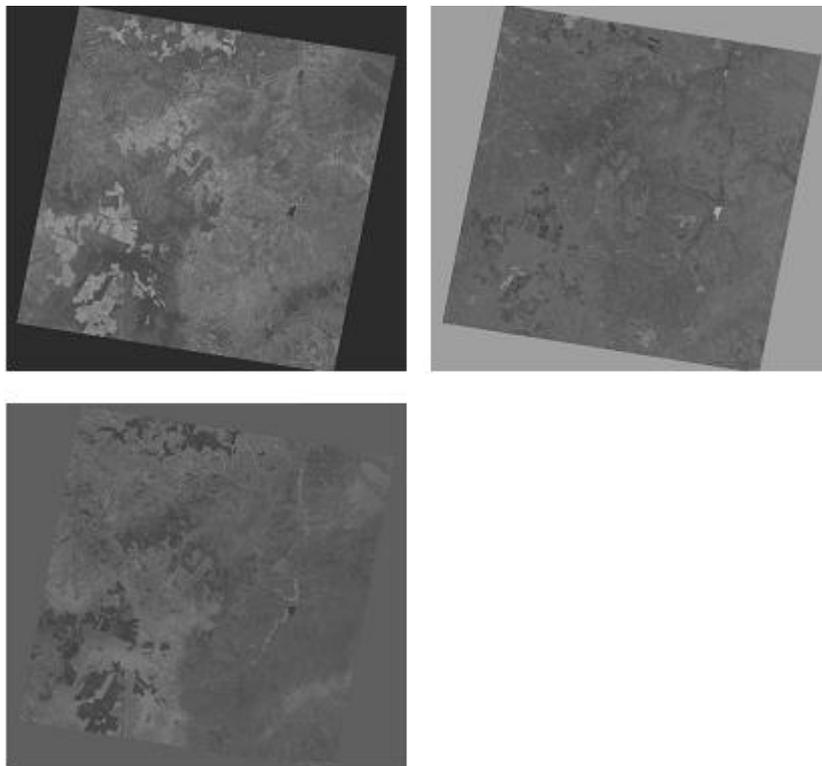
Fonte: Autoria própria

#### 4.2.7 Extração das Imagens-Fração do Modelo Linear de Mistura Espectral

Com as imagens importadas para o *software* Terraview, o algoritmo de MLME foi aplicado às bandas 3, 4 e 5 das imagens da série temporal utilizada, de modo a estimar a proporção dos componentes misturados em um *pixel*.

A seleção dos componentes vegetação, solo e sombra foi feita visualmente a partir da imagem. Para vegetação, foi selecionado um *pixel* pertencente ao cerrado/caatinga não degradado. Para solo, áreas com grande exposição de solo foram escolhidas. Por fim, para sombra, *pixels* de água não puderam ser selecionados, devido à intermitência e assoreamento dos rios da região. Portanto, *pixels* correspondentes a sombreamento causado pela topografia foram os escolhidos para constituir *endmembers* (componentes puros). Com isso, foram geradas três imagens-fração: vegetação, solo e sombra (Figura 18). A imagem-fração solo foi a que caracterizou bem as áreas de solo exposto, por isso foi escolhida para ser aplicada no estudo da desertificação.

Figura 18 - MLME de 2010 com as imagens fração: (a) solo; (b) sombra; (c) vegetação

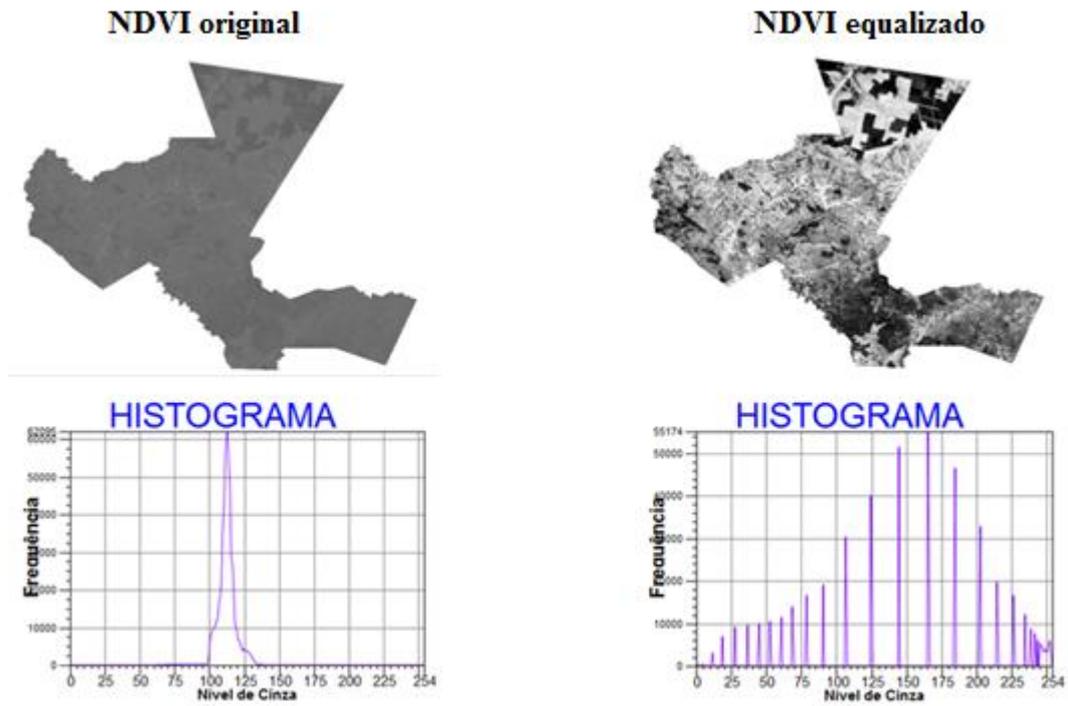


Fonte: Autoria própria

#### 4.2.8 Equalização de Histograma

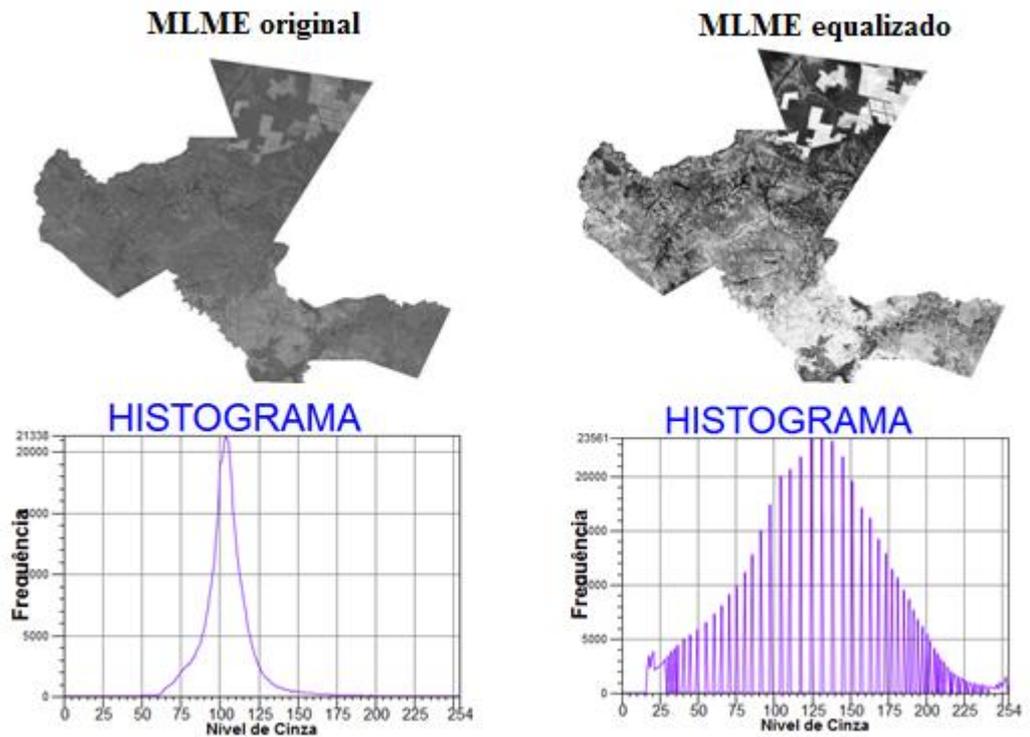
A técnica de equalização de histograma foi aplicada à sequência de imagens NDVI e MLME de todos os anos, utilizando o Spring. As Figuras 19 e 20 apresentam, respectivamente, as imagens NDVI e MLME do ano de 2010, antes e depois de ser aplicada a técnica de equalização de histograma.

Figura 19 - Imagem NDVI de Gilbués antes e depois da equalização de histograma



Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Imagem MLME de Gilbués antes e depois da equalização de histograma



Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado através dos histogramas apresentados nas Figuras 19 e 20, a aplicação da técnica de equalização de histograma amplia o contraste das áreas com diferentes níveis de cobertura vegetal. Portanto, ela configura-se em uma importante ferramenta a ser aplicada em imagens que visam avaliar a mudança na cobertura da vegetação durante os anos.

#### 4.3 EXTRAPOLAÇÃO DE IMAGENS POR MEIO DOS MÉTODOS DE REGRESSÃO LINEAR E QUADRÁTICA

Uma vez que as imagens NDVI e MLME foram extraídas da sequência de imagens, uma área do município foi selecionada para que fossem aplicados os métodos de correção e de regressão linear e quadrática. Isso facilitou a realização de uma pesquisa de campo para validar os resultados alcançados na execução dos algoritmos. A área do corte escolhida está localizada na região sul do município de Gilbués e está representada em destaque na Figura 21.

Figura 21 - Área de corte no município de Gilbués



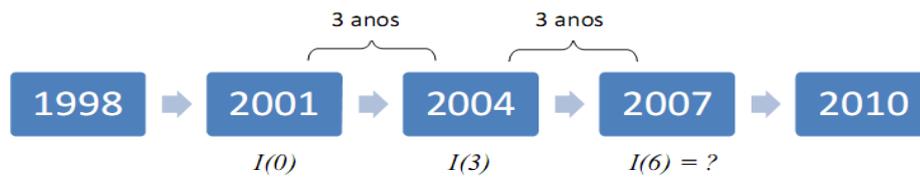
Fonte: Autoria própria

Em um primeiro momento, os algoritmos de regressão linear e quadrática foram aplicados em imagens previamente conhecidas, para que fossem avaliados seus desempenhos.

Portanto, foram utilizadas as imagens NDVI e MLME dos anos de 2007 e 2010 para que fossem comparadas com as imagens geradas pelo algoritmo. Assim, as sequências de 2007 e 2010 foram extrapoladas, usando os métodos de regressão linear e quadrática definidos pelas Equações 7 e 9, respectivamente.

Para extrapolar imagens, usando o método de regressão linear, é necessário usar duas sequências de imagens anteriores. Assim, para extrapolar a sequência de 2007, foram utilizadas as imagens dos anos de 2001 e 2004. A Figura 22 ilustra o esquema de extrapolação de imagens, através do método de regressão linear. O mesmo esquema serve para extrapolar as imagens NDVI e MLME.

Figura 22 – Extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2007 pelo método de Regressão Linear



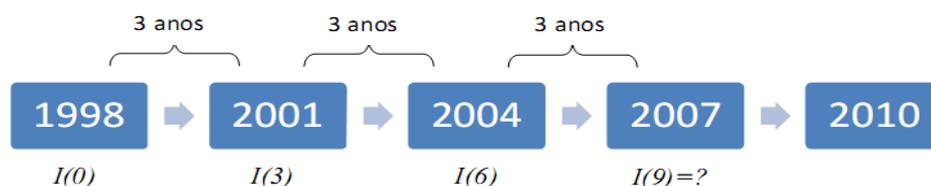
Fonte: Autoria própria

De acordo com a Figura 22, a primeira imagem da sequência corresponde ao instante inicial de tempo ( $t = 0$ ). Assim, a imagem de 2001 é chamada  $I(0)$  (ou seja, a imagem no tempo 0). Como a variação temporal é de 3 (três) anos entre cada uma das imagens da sequência, a imagem de 2004 é chamada  $I(3)$ . Por sua vez, a imagem que se pretende extrapolar é chamada  $I(6)$ . Para encontrar a imagem de 2007, basta substituir estes valores na Equação 7 e resolver o sistema de Equação 10.

$$\begin{cases} I(0) = b \\ I(3) = 3a + b \\ I(6) = 6a + b \end{cases} \quad (10)$$

Por outro lado, para extrapolar as imagens do ano de 2007 usando o método de regressão quadrática, foram usadas as sequências de 1998, 2001 e 2004. A Figura 23 ilustra o esquema de extrapolação de imagens, utilizando este método.

Figura 23 - Extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2007 pelo método de Regressão Quadrática



Fonte: Autoria própria

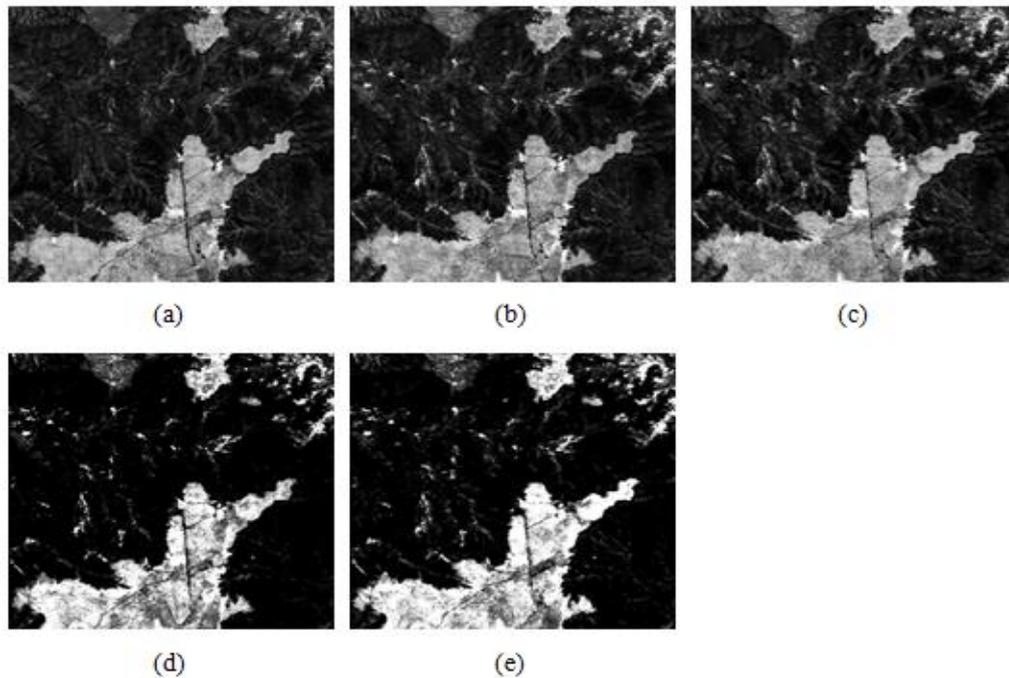
Portanto, de acordo com a Figura 23, para encontrar uma imagem extrapolada no tempo usando o método de regressão quadrática, foram utilizadas três sequências de imagens. A imagem de 1998, por estar no início da sequência, foi chamada  $I(0)$ . Como a variação temporal é de 3 (três) anos entre as imagens da série temporal, a imagem de 2001 foi chamada  $I(3)$  e a imagem de 2004 foi chamada de  $I(6)$ . Por fim, a imagem que se pretende extrapolar é chamada  $I(9)$ . Para encontrar a imagem de 2007, basta substituir estes valores na Equação 9 e resolver o sistema de Equação 11.

$$\begin{cases} I(0) = c \\ I(3) = 9a + 3b + c \\ I(6) = 36a + 6b + c \\ I(9) = 81a + 9b + c \end{cases} \quad (11)$$

As Figuras 24 e 25 apresentam as imagens NDVI e MLME do ano de 2007, geradas pelo processo de regressão linear e quadrática, respectivamente. As Figuras 24(a), (b) e (c) correspondem às imagens NDVI do ano de 2007 e suas extrapolações (linear e quadrática), antes da aplicação da técnica de correção. A Figura 24(a) é a imagem NDVI real do ano de 2007, a Figura 24(b) corresponde à imagem extrapolada pelo método de regressão linear e a Figura 24(c) consiste na imagem extrapolada pelo método de regressão quadrática. Por sua vez, as Figuras 24(d) e 24(e) correspondem às imagens extrapoladas por regressão linear e quadrática, respectivamente, do ano de 2007 após ser aplicada a técnica de correção.

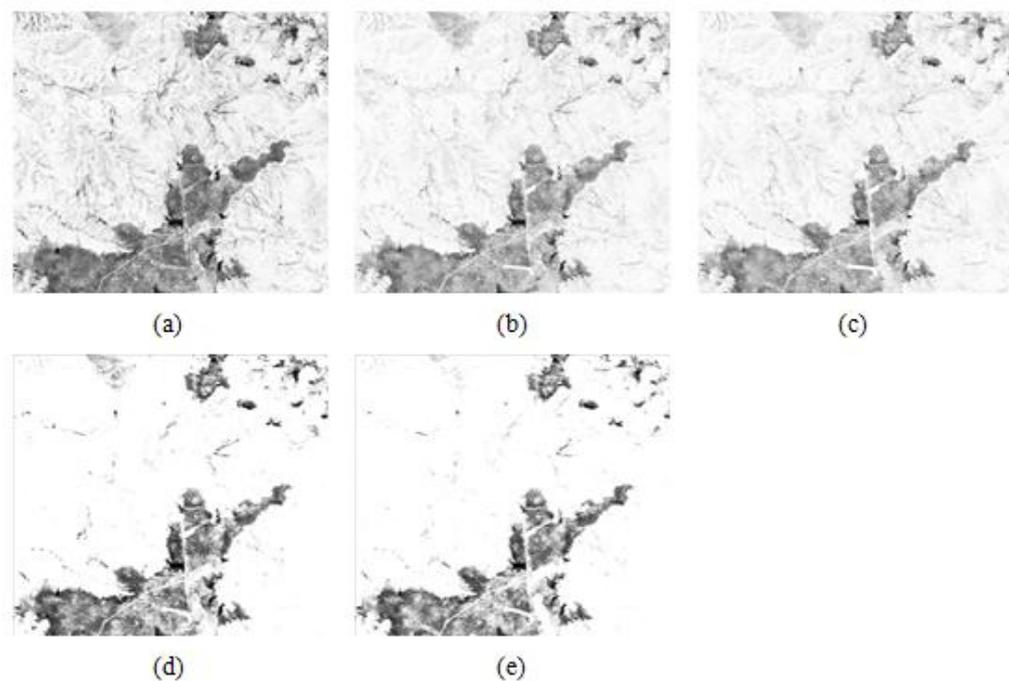
De maneira análoga, as Figuras 25(a), (b) e (c) correspondem às imagens MLME do ano de 2007 e suas extrapolações (linear e quadrática), antes da aplicação da técnica de correção. A Figura 25(a) é a imagem MLME real do ano de 2007, a Figura 25(b) corresponde à imagem extrapolada pelo método de regressão linear e a Figura 25(c) consiste na imagem extrapolada pelo método de regressão quadrática. Por sua vez, as Figuras 25(d) e 25(e) correspondem às imagens extrapoladas por regressão linear e quadrática, respectivamente, do ano de 2007 após ser aplicada a técnica de correção.

Figura 24 - Sequência de imagens NDVI do ano de 2007: (a) NDVI original; (b) NDVI extrapolado por regressão linear; (c) NDVI extrapolado por regressão quadrática; (d) NDVI extrapolado por regressão linear após o processo de correção; e (e) NDVI extrapolada por regressão quadrática após o processo de correção.



Fonte: Autoria própria

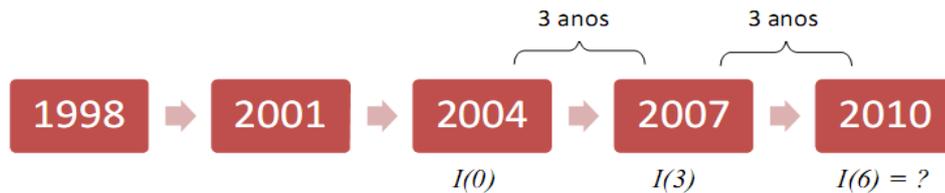
Figura 25 - Sequência de imagens MLME do ano de 2007: (a) MLME original; (b) MLME extrapolado por regressão linear; (c) MLME extrapolado por regressão quadrática; (d) MLME extrapolado por regressão linear após o processo de correção; e (e) MLME extrapolada por regressão quadrática após o processo de correção.



Fonte: Autoria própria

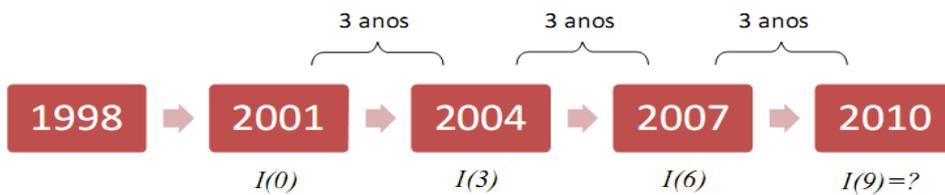
De maneira similar, para extrapolar a sequência de 2010 usando o método de regressão linear, foram utilizadas as sequências de 2004 e 2007 e para método de regressão quadrática, foram usadas as sequências de 2001, 2004 e 2007. As Figuras 26 e 27 ilustram a extrapolação das imagens de 2010 por regressão linear e quadrática, respectivamente.

Figura 26 - Extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2010 pelo método de Regressão Linear



Fonte: Autoria própria

Figura 27 - Extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2010 por Regressão Quadrática



Fonte: Autoria própria

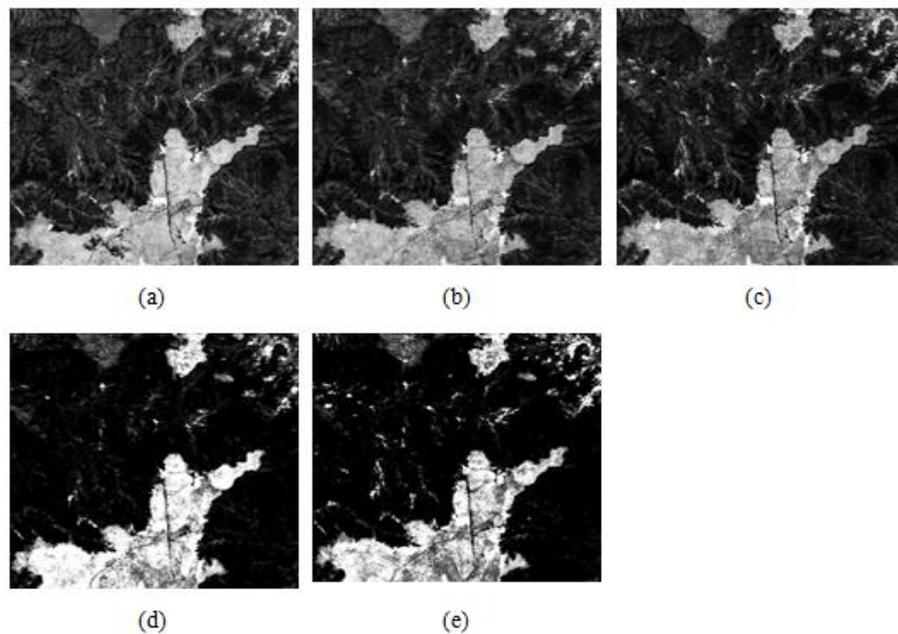
As Figuras 28 e 29 apresentam as imagens NDVI e MLME do ano de 2010, geradas pelo processo de regressão linear e quadrática, respectivamente.

A Figura 28 corresponde ao corte da imagem NDVI do ano de 2010 e suas extrapolações antes do corregristo (Figuras 28(a), (b) e (c)) e depois do corregristo (Figuras 28(d), (e)). A Figura 28(a) é a imagem NDVI real de 2010, a Figura 28(b) representa o NDVI de 2010 extrapolado pelo método de regressão linear e a Figura 28(c) por regressão quadrática. Por sua vez, a Figura 28(d) é a imagem NDVI obtida por extrapolação usando o método de regressão linear depois de ser aplicada a técnica de corregristo, enquanto que a Figura 28(e) utilizando o método de regressão quadrática.

Similarmente, a Figura 29 corresponde ao corte da imagem MLME do ano de 2010 e suas extrapolações antes do corregristo (Figuras 29(a), (b) e (c)) e depois do corregristo (Figuras 29(d), (e)). A Figura 29(a) é a imagem MLME real de 2010, a Figura 29(b) representa o MLME de 2010 extrapolado pelo método de regressão linear e a Figura 29(c) por regressão quadrática. Por sua vez, a Figura 29(d) é a imagem MLME obtida por extrapolação

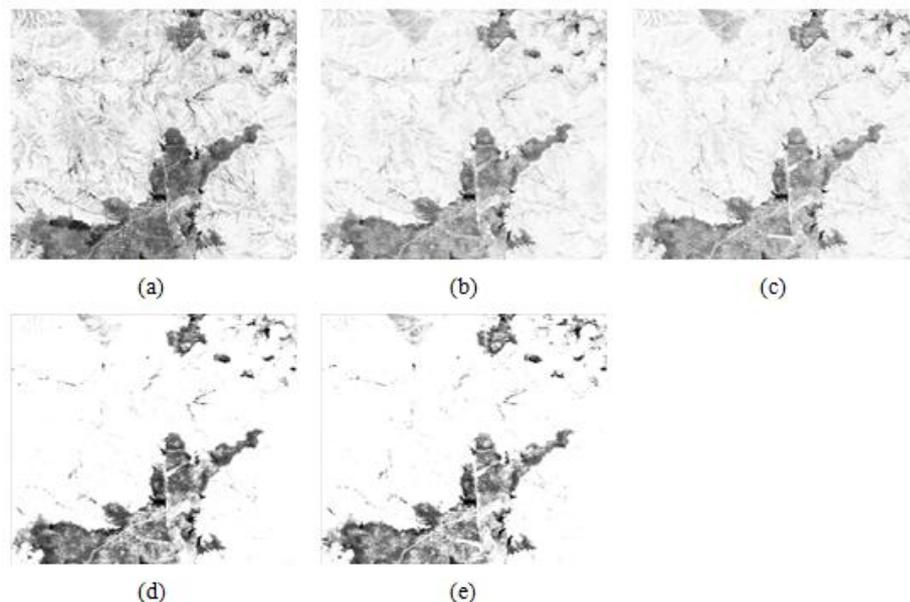
usando o método de regressão linear depois de ser aplicada a técnica de correção, enquanto que a Figura 29(e) utilizando o método de regressão quadrática.

Figura 28 - Sequência de imagens NDVI do ano de 2010: (a) NDVI original; (b) NDVI extrapolado por regressão linear; (c) NDVI extrapolado por regressão quadrática; (d) NDVI extrapolado por regressão linear após o processo de correção; e (e) NDVI extrapolada por regressão quadrática após o processo de correção



Fonte: Autoria própria

Figura 29 - Sequência de imagens MLME do ano de 2010: (a) MLME original; (b) MLME extrapolado por regressão linear; (c) MLME extrapolado por regressão quadrática; (d) MLME extrapolado por regressão linear após o processo de correção; e (e) MLME extrapolada por regressão quadrática após o processo de correção



Fonte: Autoria própria

## 5 ANÁLISES E RESULTADOS

Este capítulo analisa e discute os resultados alcançados durante a pesquisa. A Seção 5.1 apresenta os métodos utilizados na validação dos resultados após a aplicação dos métodos de extrapolação. A Seção 5.2, por sua vez, apresenta o processo de classificação da área desertificada no município de Gilbués. Na Seção 5.3 são discutidos os métodos utilizados para validar o resultado da classificação. Por fim, a Seção 5.4 apresenta o protótipo de *plugin* desenvolvido como contribuição computacional da pesquisa.

### 5.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DA EXTRAPOLAÇÃO

Após o processo de extrapolação das imagens, torna-se necessário calcular o nível de similaridade entre a imagem real e a extrapolada. Para esta tarefa, foi utilizada a biblioteca de processamento de imagem *ProEikon*. Esta biblioteca possui um algoritmo chamado *DistG* que calcula a diferença entre duas imagens em escala de cinza, permitindo quantificar numericamente a precisão das imagens geradas (KIM, 2011).

Existe, entre outros estimadores, o *Mean Absolute Error* (MAE) que em estatística, é uma grandeza utilizada para medir o quão próximas as estimativas estão dos resultados finais, além de ser uma medida comum de erro de previsão em análises de séries temporais. Ele pode avaliar o erro entre os dados estimados por extrapolação numérica e os dados reais. O MAE é representado pela Equação 12, onde  $x_i$  é o valor real e  $y_i$  corresponde ao dado estimado e  $n$  representa o número total de avaliações consideradas na previsão.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (12)$$

Para realizar as comparações entre as imagens reais e as extrapoladas neste trabalho, o estimador MAE foi implementado através de um componente de *software*.

As Tabelas 5 e 6 exibem os valores de saída após a execução deste algoritmo. As colunas das tabelas representam o método de regressão utilizado e as linhas representam as diferentes imagens usadas (antes e depois do correto) e o conteúdo das células mostram o valor do MAE obtido (o valor máximo é 100%).

A Tabela 5 mostra os resultados das análises realizadas sobre a imagem real de 2007 e as suas extrapolações pelos métodos de regressão linear e quadrática, respectivamente. Com uma análise simples sobre essas tabelas, é possível observar que o método de regressão linear tem um melhor resultado que o método de regressão quadrática.

Tabela 5 - Percentuais de diferença calculados pelo MAE para o ano de 2007

	Regressão Linear	Regressão Quadrática
NDVI antes do corregristo	6.58%	7.19%
NDVI depois do corregristo	6.71%	7.34%
MLME antes do corregristo	6.52%	7.17%
MLME depois do corregristo	5.83%	6.59%

Fonte: Autoria própria

A Tabela 6, por sua vez, mostra os resultados das análises realizadas entre a imagem real de 2010 e as extrapoladas pelos métodos de regressão linear e quadrática. De acordo com os resultados, mais uma vez, o método de regressão linear alcançou melhores resultados quando comparado aos valores encontrados utilizando-se o método de regressão quadrática. Além disso, é importante destacar que ambas as tabelas mostram que os resultados obtidos foram superiores depois que as imagens foram corregristadas.

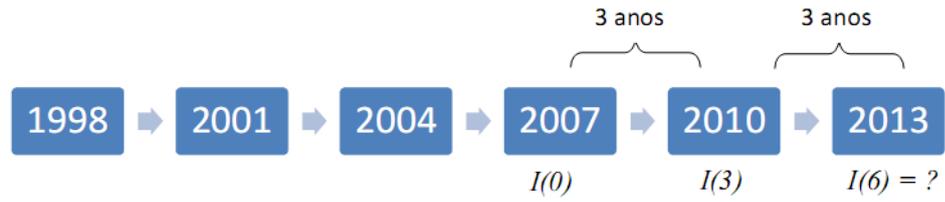
Tabela 6 - Percentuais de diferença calculados pelo MAE para o ano de 2010

	Regressão Linear	Regressão Quadrática
NDVI antes do corregristo	7.08%	8.46%
NDVI depois do corregristo	6.41%	7.63%
MLME antes do corregristo	7.42%	8.51%
MLME depois do corregristo	7.03%	8.02%

Fonte: Autoria própria

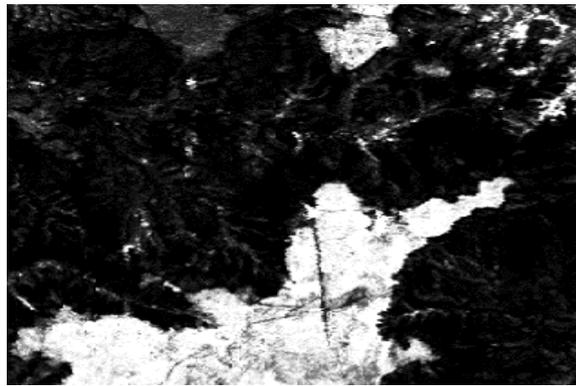
Como o método de regressão linear e as imagens corregristadas obtiveram melhores resultados, eles foram utilizados para estimar o comportamento do ano de 2013. A Figura 30 apresenta o esquema de extrapolação das imagens NDVI e MLME para o ano de 2013, através do método de regressão linear a partir de imagens corregristadas. Já as Figuras 31 e 32 apresentam as imagens NDVI e MLME geradas para o ano de 2013, respectivamente.

Figura 30 – Esquema de extrapolação das imagens NDVI e MLME do ano de 2013 por Regressão Linear



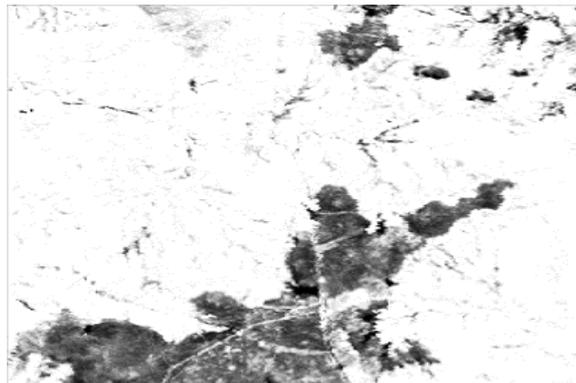
Fonte: Autoria própria

Figura 31 - Extrapolação do ano de 2013 pelo método de regressão linear, a partir de imagens NDVI corrigidas



Fonte: Autoria própria

Figura 32 - Extrapolação do ano de 2013 pelo método de regressão linear, a partir de imagens MLME corrigidas



Fonte: Autoria própria

## 5.2 CLASSIFICAÇÃO

Visando produzir mapas temáticos da área degradada, foi utilizado o *plugin* do Terraview chamado GeoDMA (*Geographical Data Mining Analyst*) para realizar o processo de classificação das imagens NDVI do município de Gilbués (KORTING, *et al.*, 2009).

O GeoDMA realiza todas as fases de processamento necessárias para manipular dados de sensoriamento remoto, incluindo os processos de segmentação, extração e seleção de atributos, treinamento, classificação e análise exploratória dos dados (KORTING, *et al.*, 2009). Ele foi desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e foi projetado para ser o mais genérico possível. Sua intenção é detectar padrões em bases de dados de informação geográfica (KORTING, FONSECA e CÂMARA, 2010).

Apesar da extrapolação ter sido realizada com imagens NDVI e MLME, o processo de classificação foi aplicado apenas nas imagens NDVI, uma vez que neste tipo de imagem as classes utilizadas no processo de classificação ficaram melhor caracterizadas.

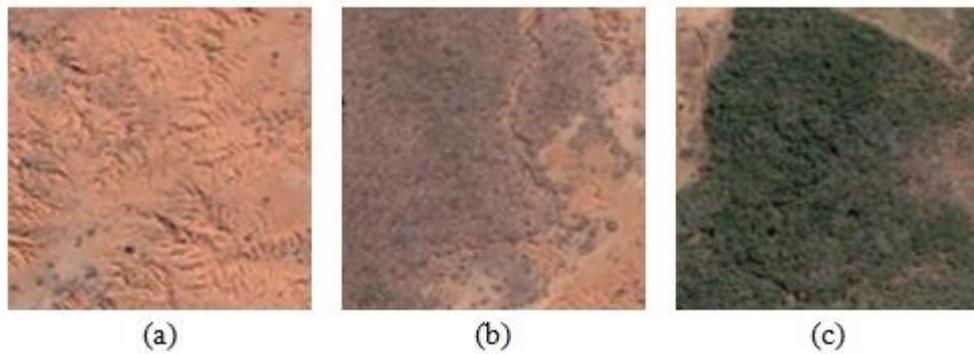
Primeiramente, as imagens NDVI foram segmentadas, utilizando-se o algoritmo *Region Growing* (BINS, *et al.*, 1996). Os valores de similaridade e área foram 4 e 8, respectivamente. Além disso, o processo de classificação utilizou o algoritmo de árvore de decisão C4.5 (QUINLAN, 1993). E, na fase de treinamento do algoritmo de classificação, algumas regiões foram selecionadas para representar as classes: solo exposto, vegetação densa e vegetação degradada.

Assim, foi possível avaliar a evolução do processo de desertificação entre os anos de 1998 e 2010 no município de Gilbués. Além disso, também foi estimado o padrão de desertificação para o ano de 2013.

Para este estudo, foram criadas três classes temáticas: solo exposto, vegetação degradada e vegetação densa. A Figura 33 ilustra cada uma das classes temáticas utilizadas.

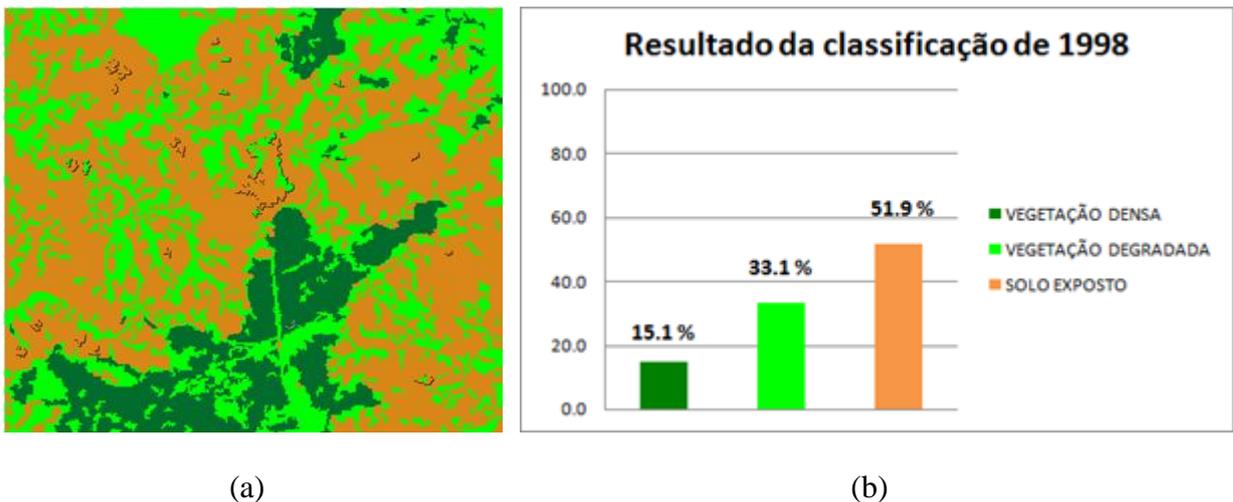
A Figura 34(a) mostra o resultado obtido após o processo de classificação aplicado à imagem do ano de 1998. A Figura 34(b) apresenta um gráfico com a porcentagem da presença de cada uma das classes temáticas.

Figura 33 - Imagens *Quickbird* de alta resolução ilustrando as classes temáticas (a) solo exposto, (b) vegetação degradada e (c) vegetação densa



Fonte: Satellite Imaging (2011)

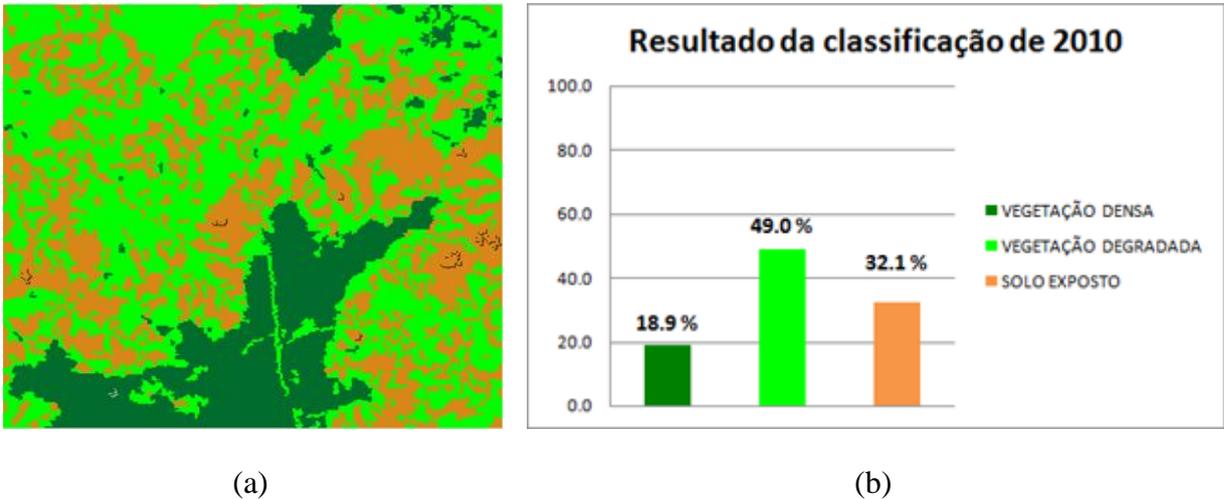
Figura 34 - Resultados da classificação de 1998: (a) Mapa de cobertura do solo de 1998 (b) Percentagem das classes temáticas de 1998



Fonte: Autoria própria

A Figura 35, por sua vez, apresenta o resultado obtido após o processo de classificação aplicado à imagem de 2010 e seu respectivo gráfico com a porcentagem das classes temáticas. De acordo com os resultados, no período entre 1998 e 2010 foi detectado que houve um incremento de 3.8% na classe de vegetação densa. Por sua vez, a vegetação degradada aumentou 15.9% e o solo exposto reduziu 19.8%.

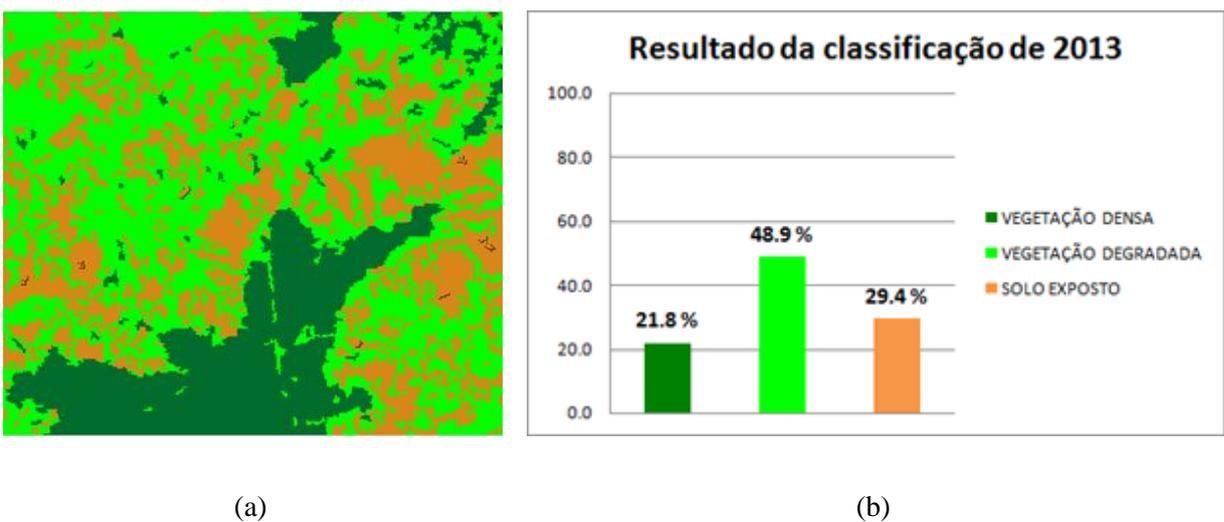
Figura 35 - Resultados da classificação de 2010: (a) Mapa de cobertura do solo de 2010 (b) Percentagem das classes temáticas de 2010



Fonte: Autoria própria

Finalmente, a imagem estimada pelo método de regressão linear para o ano de 2013 foi classificada. Os resultados são mostrados na Figura 36. De acordo com o resultado da classificação, quando comparada ao ano de 2010 a tendência é de que o solo exposto seja reduzido em 2.7%. Por sua vez, a classe de vegetação degradada tende a reduzir em 0.1% e a classe vegetação densa tem uma tendência de incremento de 2.9%.

Figura 36 - Resultados da classificação da imagem de 2013 extrapolada: (a) Mapa de cobertura do solo de 2013 (b) Percentagem das classes temáticas de 2013



Fonte: Autoria própria

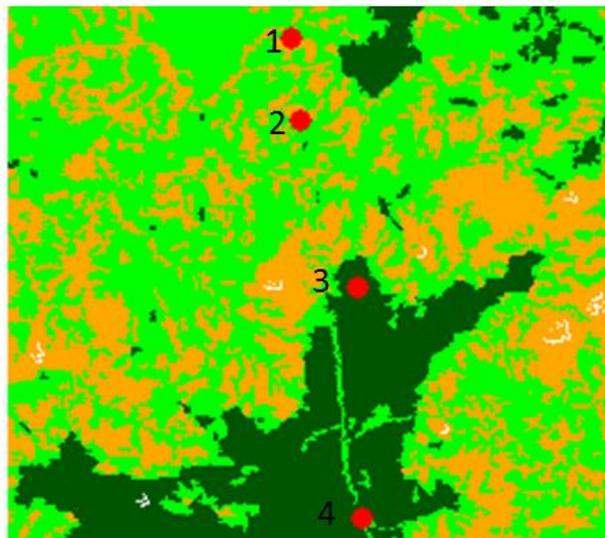
### 5.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO

Para validar o processo de classificação das imagens apresentado na seção anterior, foi realizada uma pesquisa de campo no município de Gilbués, durante o mês de novembro de 2011.

Através do uso de um equipamento de GPS, foi possível capturar pontos representativos das três classes definidas neste estudo (solo exposto, vegetação densa e vegetação degradada). Além disso, com o uso de uma câmera digital, foram registradas algumas imagens da área.

A Figura 37 ilustra alguns pontos analisados durante a pesquisa de campo. Nela é possível identificar quatro pontos distintos.

Figura 37 - Classificação de 2010 com quatro pontos capturados por GPS na pesquisa de campo



Fonte: Autoria própria

Todos os pontos capturados foram bem representativos das classes apontadas no estudo. O *ponto 1* representa uma grande faixa de terra com extrema degradação, apresentando áreas com predominância de processos erosivos. A Figura 38 exhibe a realidade encontrada no *ponto 1*.

Figura 38 - Solo exposto encontrado no *ponto 1*



Fonte: Autoria própria

O *ponto 2* apresenta grande área de vegetação degradada, com a vegetação nativa dando espaço aos campos abertos. A Figura 39 mostra a vegetação degradada encontrada nesta região.

Figura 39 - Vegetação degradada predominante no *ponto 2*



Fonte: Autoria própria

No *ponto 3* foi encontrada uma grande área com vegetação nativa densa. A Figura 40 mostra a vegetação densa encontrada neste ponto.

Figura 40 - Vegetação densa presente no *ponto 3*



Fonte: Autorial própria

No *ponto 4*, por sua vez, foi encontrada uma grande área com vegetação em fase de transição entre uma vegetação densa e uma vegetação degradada. A Figura 41 apresenta a vegetação encontrada neste ponto.

Figura 41 - Vegetação degradada no *ponto 4*



Fonte: Autorial própria

Os dados colhidos durante a pesquisa de campo validaram o processo de classificação computacional, uma vez que a realidade se mostrou consistente com os resultados obtidos no meio computacional.

#### 5.4 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE PLUGIN PARA O TERRAVIEW

Com a intenção de automatizar o processo de estimativa de séries temporais de imagens, um *plugin* para o Terraview foi implementado com o objetivo de auxiliar os estudos sobre desertificação.

De acordo com os dados apresentados na Seção 5.1 (Tabelas 5 e 6), o método de Regressão Linear foi mais eficiente, obtendo imagens com menores diferenças quando comparado ao método de regressão quadrática. Por este motivo, o algoritmo implementado na ferramenta foi o de regressão linear.

O *Extrapolation Plugin*<sup>9</sup>, como foi chamado, foi desenvolvido utilizando a linguagem C++, no ambiente TerraLib 4.1.0<sup>10</sup>, utilizando o Microsoft Visual Studio .NET 2003.

A TerraLib é uma biblioteca de classes escritas em C++ que permite a construção de aplicativos geográficos, com código fonte aberto e distribuída como um *software* livre. Ela está dividida em três partes principais (UBA, 2007):

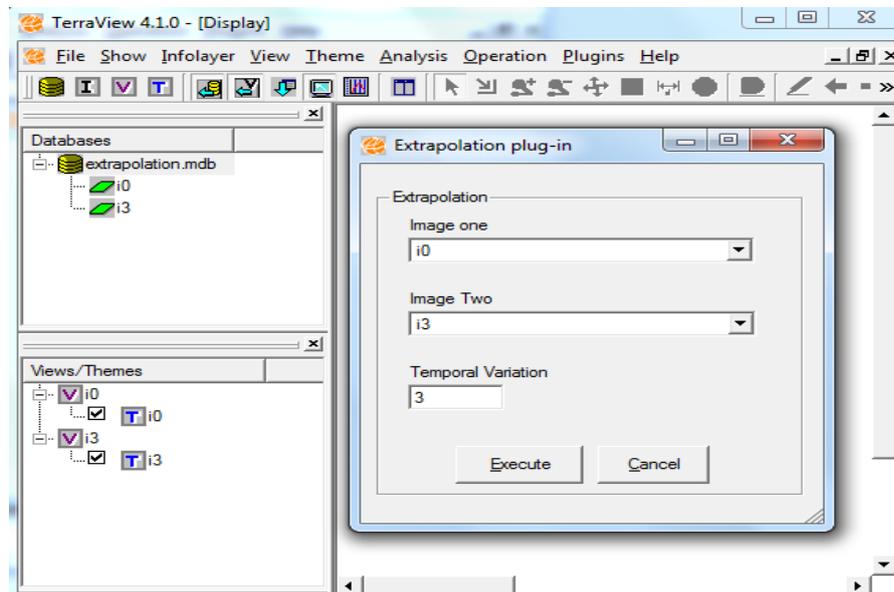
- *Kernel*: composto de classes de armazenamento das geometrias e atributos em um banco de dados objeto-relacional, classes para trabalhar com projeção cartográfica, operadores topológicos e direcionais e classes para manipulação de imagens;
- *Functions*: contém os algoritmos que utilizam as estruturas básicas do *kernel*, incluindo análise espacial, linguagens de consulta e simulação, e funções para conversão de dados;
- *Contrib*: aplicações construídas por usuários da TerraLib.

A TerraLib oferece uma classe chamada *TeRaster* para a representação de dados matriciais, a qual pode ser instanciada a partir de imagens em diferentes formatos, como GeoTIFF e JPEG. O método de regressão linear foi implementado no *Extrapolation Plugin*, utilizando esta classe (VINHAS, *et al.*, 2002).

O funcionamento do *plugin* é bem simples. Para a execução do algoritmo, basta que sejam carregados do banco de dados Terraview dois *rasters* pertencentes a uma mesma série temporal e, ao mesmo tempo, informar o valor (em anos, meses etc) para a variação temporal entre estas. A Figura 42 apresenta a interface do *plugin*.

<sup>9</sup> Disponível em: <http://sourceforge.net/projects/extrapolationpg/>

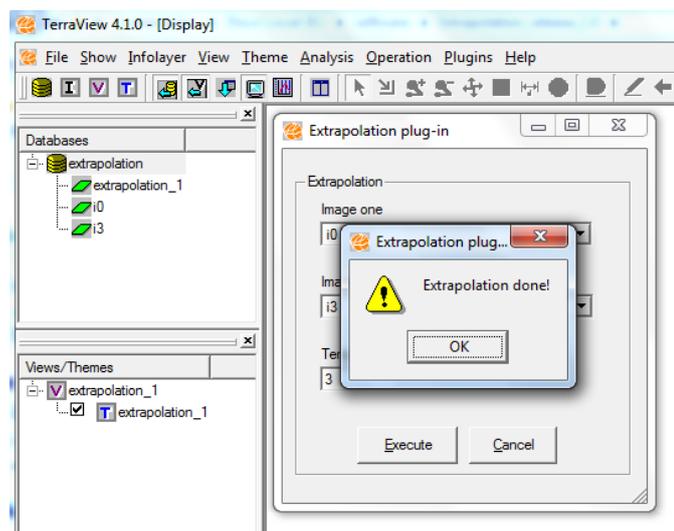
<sup>10</sup> Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/terralib/php/dow.php?body=Dow>

Figura 42 - Interface do *Extrapolaton plugin*

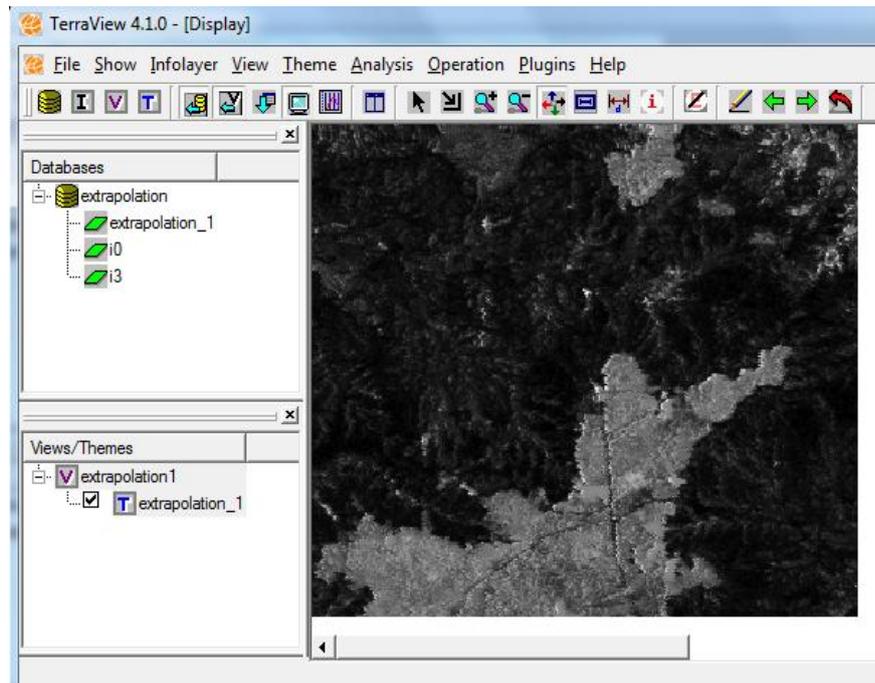
Fonte: Autoria própria

Após informar as imagens de entrada e a variação temporal, basta clicar no botão *Execute* e a imagem no período posterior é gerada. As Figuras 43 e 44 apresentam, respectivamente, a execução do *plugin* e o resultado da extrapolação do NDVI do ano de 2013.

Figura 43 - Extrapolação do NDVI do ano de 2013



Fonte: Autoria própria

Figura 44 - NDVI do ano de 2013 obtido através do *Extrapolation plugin*

Fonte: Autoria própria

## 6 CONCLUSÃO

Estimar o comportamento futuro dos processos de desertificação é uma questão aberta e é uma área extremamente importante, devido ao fato de poder ajudar na implementação de políticas que visam controlar e combater esse processo. Para realizar esta tarefa foram propostas neste trabalho técnicas de estimativa de séries temporais utilizando métodos de regressão linear e quadrática. Além disso, foram utilizados o NDVI e o MLME para avaliar os processos de desertificação. Ademais, mapas temáticos obtidos através do processo de classificação foram utilizados para monitorar os processos de degradação na área de estudo.

Nos resultados apresentados na Seção 5.1, o método de regressão linear é mais adequado às estimativas de séries temporais de imagens, uma vez que a diferença entre a imagem real e a imagem extrapolada é menor quando comparada com os resultados encontrados utilizando-se o método de regressão quadrática.

Além disso, o estudo mostrou que tanto as imagens NDVI como as MLME, apresentam bons resultados e, portanto, podem ser empregadas no estudo da estimativa de tendência de evolução dos processos de desertificação.

Portanto, chegou-se a conclusão que a projeção de imagens usando técnicas de regressão linear é uma alternativa viável para monitorar e estimar a tendência de evolução dos processos de desertificação. Além disso, constatou-se que o corregristo aplicado à série temporal tem um efeito muito importante na estimação de imagens, uma vez que os resultados após a aplicação do corregristo foram melhores quando comparados aos resultados encontrados nas imagens sem o uso de tal técnica.

### 6.1 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Várias contribuições podem ser identificadas neste trabalho, como:

- O uso de métodos de estimativa de séries temporais para o estudo da evolução dos processos de desertificação;
- Comparação do uso de imagens NDVI e do MLME no estudo sobre desertificação;
- Classificação da área degradada no município de Gilbués entre os anos de 1998 e 2010 e sua estimativa para 2013;

- Implementação de um *plugin* para o Terraview para automatizar o processo de extrapolação de imagens, através do método de regressão linear.
- Publicação de resultados em conferência internacional (SOUSA, *et al.*, 2012).

## 6.2 LIMITAÇÕES

É importante destacar que existe uma limitação no uso do NDVI, tendo em vista que se trata de um índice sensível a uma série de fatores, como por exemplo as estações do ano. Assim, torna-se importante que a sequência de imagens seja adquirida no mesmo período do ano. Caso contrário, os resultados serão afetados. Isto é um fator limitador, uma vez que nem sempre é possível adquirir imagens adequadas para realização de estudos sobre uma determinada área em um dado período. Tal limitação também afeta as imagens-fração do Modelo Linear de Mistura Espectral.

Além disso, ressalte-se que este trabalho não elimina a necessidade do uso de outros dados e informações acerca dos fenômenos de desertificação. Pelo contrário, ele se apresenta como uma ferramenta para viabilizar novos experimentos e análises de processos de desertificação.

## 6.3 TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de melhorar a pesquisa apresentada neste trabalho, perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas:

- Realização de estudos sobre outras áreas afetadas pelos processos de degradação para avaliar o comportamento da ferramenta computacional desenvolvida;
- Uso de outros tipos de imagens e índices para verificar os seus resultados e compará-los com os apresentados neste trabalho;
- Adição de novas funcionalidades à ferramenta, como, por exemplo, o algoritmo para calcular o valor do MAE.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, E. M.; TORRES, L. M. Estado del Arte en el Uso de Indicadores y Puntos de Referencia en la Lucha Contra la Desertificación y la Dequía en América Latina y El Caribe. **Interciencia: Una Revista de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo**, v. 32, n. 12, p. 827-833, 2007.
- AGUIAR, R. B.; GOMES, J. R. C. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea - Piauí**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 19. 2004.
- ALVES, C.; VIANA, P. M. F.; SALES, M. M. **Proposta de uma nova metodologia de estimativa de carga de ruptura em estaqueamento utilizando da teoria da energia complementar**. VI Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão. Goiania-GO: [s.n.]. 2009. p. 6693-6698.
- ARAÚJO, I. R. de; SILVA, H. P. da; LOPES, A. Sá S.; ALENCAR, B. P. B. da; SILVA, H. D. B. da. **Cálculo de NDVI no Suporte as Estudo de Desertificação no Município de Orocó – PE**. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife: [s.n.]. 2010. p. 1-6.
- ATZBERGER, P. J. The Monte-Carlo Method. **Journal of the American Statistical Association**, 47, 1952.
- BAGLI, V. V.; FONSECA, L. M. G. **Mosaico de Imagens Baseado na Análise em Múltiplas Resoluções**. VII Simpósio Brasileiro de Geoinformática. Campos do Jordão: [s.n.]. 2005.
- BARBANCHO, A. G. **Fundamentos e Possibilidades da Econometria**. Rio de Janeiro: Forum, 1970.
- BINS, L. S.; FONSECA, L. M. G.; ERTHAL, G. J.; MITSUO II, F. **Satellite Imagery Segmentation: a Region Growing Approach**. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador, BA, Brasil: [s.n.]. 1996. p. 677-680.
- BRASIL. **Programa Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN-Brasil)**. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, p. 220. 2004.
- BUSSAB, W. D. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. São Paulo: Saraiva, 2003.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; MITSUO II, F. **SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented Data Modelling**. **Computers & Graphics**, 20, 1996. 395-403.
- CÂMARA, G.; CARVALHO, M. Sá; CRUZ, O. G.; VIRGINIA, C. Análise Espacial de Áreas. In: DRUCK, S., et al. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 190.

CARVALHO, C. M.; ALMEIDA FILHO, R. **Avaliação da Desertificação no Sudoeste do Estado do Piauí, através de Técnicas de Sensoriamento Remoto**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis: [s.n.]. 2007.

CARVALHO, V. C. **Abordagem Multiescala para o Monitoramento de Indicadores do Processo de Desertificação**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu: SBSR. 2001. p. 1539-1551.

CAVALCANTI, E. R.; COUTINHO, S. F. S.; SELVA, V. S. F. Desertificação e Desastres Naturais na Região do Semiárido Brasileiro. **Revista Caderno de Estudos Sociais**, Massangana, 2007.

CHEN, S.; RAO, P. **Regional Land Degradation Mapping Using MODIS Data and Decision Tree (DT) Classification in a Transition Zone between Grassland and Cropland of Northeast China**. Proceedings of the 2009 First IEEE International Conference on Information Science and Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society. 2009. p. 1395–1398. Disponível em.

CHINO, D. Y. T.; ROMANI, L. A. S.; TRAINA, A. J. M. **Extração de Séries Temporais de Imagens de Satélite para Monitoramento de Safras Agrícolas e de Dados Climáticos**. XXX Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (CSBC 2010). Belo Horizonte, MG: [s.n.]. 2010. p. 137-144.

COLLADO, A.; CHUVIECO, E.; CAMARASA, A. Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina. **Journal of Arid Environments**, 52, Janeiro 2002. 121-133.

CONTI, J. B. A Questão Climática do Nordeste Brasileiro e os Processos de Desertificação. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, PR, 1, 2005. 7-14.

CREPANI, E. **O Núcleo de Desertificação de Gilbués observado pelo Sensoriamento Remoto e pelo Geoprocessamento**. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, Brasil: [s.n.]. 2009. p. 5185-5192.

DGI. DGI - Divisão de Geração de Imagens (INPE), 2011. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 22 mar. 2011.

DIEZ, E.; MCINTOSH, B. S. Organisational Drivers for Constraints on and Impacts of Decision and Information Support Tool Use in Desertification Policy and Management, Amsterdam, v. 26, p. 317-327, Março 2011. ISSN 1364-8152. Disponível em.

DING, H.; CHEN, J.; WANG, G. **A Model for Desertification Evolution Employing GIS with Cellular Automata**. International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS). [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 324-328.

EMBRAPA. **Ata da XXXI Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Londrina, p. 321. 2010.

ESRI. ESRI – Environmental Systems Research Institute, 2011. Disponível em: <<http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>>. Acesso em: 16 mar. 2011.

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. **AI Magazine**, v. 17, p. 37-54, 1996.

FERREIRA, M. E. **Análise do Modelo Linear de Mistura Espectral na Discriminação de Fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (Bioma Cerrado)**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília (UNB). Brasília. 2003.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G.; SANO, E. E.; SHIMABUKURO, Y. E. **Uso do Modelo Linear de Mistura Espectral para o Mapeamento Sistemático e Operacional do Bioma Cerrado: Possibilidades, Implicações e Procedimentos Metodológicos**. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte - MG: [s.n.]. 2003. p. 657-664.

GALVÃO, A. L. C. D. O.; SAITO, C. H. Mapeamentos sobre Desertificação no Brasil: uma análise comparativa. **Brasil Florestal (Revista Científica do IBAMA)**, v. 23, n. 17, 2003.

GALVÃO, A. L. C. O. **Caracterização geoambiental em região submetida aos processos de desertificação - Gilbúes-PI, um estudo de caso**. Anais da Conferência Nacional da Desertificação. Fortaleza: [s.n.]. 1994. p. 79-1994.

GRANGER, C. W. J.; NEWBOLD, P. **Forecasting Economic Time Series**. New York: Academic Press, 1977.

HAN, J.; KAMBER, M. **Data Mining: Concepts and Techniques**. 2. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2006. ISBN 1558609016.

IBGE. Censo 2010. **Censo 2010**, 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 01 mar. 2012.

IICA. **Formulação de subsídios para a elaboração do zoneamento ecológico-econômico do núcleo original de desertificação de Gilbués, estudo de caso dos municípios de Gilbués e Monte alegre, no estado do Piauí**. Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). Brasília, p. 200. 2010. (978-92-9248-172-8).

IMAGEM. Conceitos de Imagens de Satélite e Sensoriamento Remoto. **IMAGEM – Soluções de Inteligência Geográfica**, 2011. Disponível em: <[http://www.img.com.br/marketing/intersat/Conceitos\\_Imagens\\_Intersat.pdf](http://www.img.com.br/marketing/intersat/Conceitos_Imagens_Intersat.pdf)>. Acesso em: 16 mar. 2011.

JESUS, S. C. D.; MIURA, A. K. **Análise de regressão linear múltipla para estimativa do índice de vegetação melhorado (EVI) a partir das bandas 3, 4 e 5 do sensor TM/Landsat 5**. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal: [s.n.]. 2009. p. 1103-1110.

KASIMU, A.; TATEISHI, R. Extraction Area at Risk of Desertification Using MODIS and Geophysical Data: In Xinjiang Uyghur Autonomous Region of China. **International Conference on Multimedia Technology (ICMT)**, 2010. 1-4.

KIM, H. Y. Proeikon - Routines and Programs in C ++ for Image Processing and Computer Vision, 2011. Disponível em: <<http://www.lps.usp.br/hae/software>>. Acesso em: 14 Fevereiro 2011.

KORTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; ESCADA, M. I. S.; CÂMARA, G. **GeoDMA – Um Sistema para Mineração de Dados de Sensoriamento Remoto**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, RN, Brasil: [s.n.]. 2009.

KORTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; CÂMARA, G. **Interpreting Images with GeoDMA**. GEOgraphic Object-Based Image Analysis Conference (GEOBIA). Ghent, Belgium: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2010.

LEONARDI, S. S.; SOUZA, S. M. D.; FONSECA, L. M. G. **Comparação do Desempenho de Algoritmos de Normalização Radiométrica de Imagens de Satélite**. Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte: [s.n.]. 2003. p. 2063-2069.

LIU, A.; WANG, J.; LIU, Z.; WANG, J. **Monitoring desertification in arid and semi-arid areas of China with NOAA-AVHRR and MODIS data**. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 2362–2364.

LOBOZIAK, S.; CAPUTO, M. V.; MELO, J. H. G. **Middle Devonian- Tournaisian Miospore Biostratigraphy in the Southwestern Outcrop Belt of the Parnaíba Basin, North-central Brazil**. Revue de Micropaléontologie. Paris: [s.n.]. 2000. p. 301-318.

LOPES, H. L. **Modelagem de Parâmetros Biofísicos para Avaliação de Risco à Desertificação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife, PE, p. 101. 2005.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. ISBN 8574520098.

MATALLO JUNIOR, H. **Indicadores de desertificação: histórico e perspectivas**. Brasília: Cadernos UNESCO Brasil: série meio ambiente e desenvolvimento, v. 2, 2001. 126 p.

MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-sensed Images**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1999. 292 p.

MELO, D. H. C. T. B. **Uso de Dados Ikonos II na Análise Urbana: Testes Operacionais na Zona Leste de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 2002. 146 p.

MILONE, G.; ANGELINI, F. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Atlas, 1995.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. D. C. **Análise de Séries Temporais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2004.

NASA. The Landsat Program. **National Aeronautics and Space Administration (NASA)**, 2011. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 19 mar. 2011.

ONU. **Agenda 21 - Manejo de ecossistemas frágeis: a luta contra a desertificação e a seca**. Organização das Nações Unidas (ONU). Rio de Janeiro. 1992.

PACHECO, A. D. P.; FREIRE, N. C. F.; BORGES, U. D. N. NESA - Núcleo de Estudos e Articulação sobre o Semi-Árido, 2006. Disponível em: <<http://www.fundaj.gov.br/geral/nesa/geografia.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2011.

PASSOS, A. M. **A Utilização de Métodos Numéricos na Caracterização das Propriedades dos Compostos Formados de Argila Bentonita e Óxido Xerogels**. Dissertação de Mestrado. Curitiba - PR: [s.n.]. 2005.

QUINLAN, J. R. **C4.5: Programs for Machine Learning**. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. ISBN 1-55860-238-0.

RODRIGUES, E. P. **Avaliação de Métricas para o Corregistro Não Rígido de Imagens Médicas**. PhD Thesis. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo. 2010.

RODRIGUES, M. I. V.; VIANA, M. O. D. L. Desertificação e construção de um coeficiente interdisciplinar para o Estado do Ceará, 1997. Disponível em: <[http://www.ecoeco.org.br/conteudopublicacoes/encontrosii\\_enmesa14.pdf](http://www.ecoeco.org.br/conteudopublicacoes/encontrosii_enmesa14.pdf)>. Acesso em: 11 mar. 2001.

ROQUE, C. G.; OLIVEIRA, I. C. de; FIGUEIREDO, P. P.; BRUM, E. V. P.; CAMARGO, M. F. Georreferenciamento. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 4, n. 1, p. 87-102, 2006.

SALES, M. C. L. **Estudo da degradação ambiental em Gilbués-PI: Reavaliando o "núcleo de desertificação"**. Dissertação de mestrado. São Paulo: USP. 1997.

SANTOS, A. R. D.; PELUZIO, T. M. D. O.; SAITO, N. S. **SPRING 5.1.2 passo a passo: aplicações práticas**. Alegre: CAUFES, 2010. 153 p. ISBN 978-85-61890-06-3.

SATELLITE IMAGING, C. **Satellite Imaging Corporation**, 2011. Disponível em: <<http://www.satimagingcorp.com/gallery.html>>. Acesso em: 12 fev. 2011.

SHEIKH, B. A.; SOOMRO, G. H. Desertification: causes, consequences and remedies. **Pakistan Journal of Agriculture**, 2006.

SHIMABUKURO, Y. E.; BATISTA, G. T.; MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C.; Duarte, V.. Using Shade Fraction Image Segmentation to Evaluate Deforestation in Landsat Thematic Mapper Images of the Amazon Region. **International Journal of Remote Sensing**, 19, n. 3, 1998. 535-541.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. Fraction Images Derived from Landsat TM and MSS Data for Monitoring Reforested Areas. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 21, n. 1, 1995. 67-74.

SILVA, I. A. de S.; SILVA, J. C. B. da; SILVA, K. A. e; BARROS, J. R. **ESTUDO DA DESERTIFICAÇÃO EM GILBUÉS-PIAUI: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, VARIABILIDADE CLIMÁTICA E IMPACTOS AMBIENTAIS**. I Simpósio Regional de Geografia do Cerrado – SIREGEO. Barreiras-BA: [s.n.]. 2010. p. 331-344.

SILVA, L. da; COSTA FILHO, J. F. da; LIMA, E. R. V.; ALMEIDA, H. A. de. Análise do Albedo e do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) em uma Bacia Hidrográfica usando o SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land. **XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Viçosa - MG, 2009. Disponível em. Acesso em: 25/03/2011.

SILVA, M. P. D. S. Mineração de Dados – Conceitos, Aplicações e Experimentos com WEKA, p. 19-21, 2004. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.sbc.org.br/download.php?paper=35>>. Acesso em: 15 mar. 2011.

SILVA, M. P. S.; CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; VALERIANO, D. M.; ESCADA, M. I. S. **Mining Patterns of Change in Remote Sensing Image Databases**. Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Data Mining. Washington, DC: IEEE Computer Society. 2005. p. 362-369. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICDM.2005.98>.

SILVA, M. P. S.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S. Image Mining: Detecting Deforestation Patterns Through Satellites, p. 55-75, 2008. Data Mining Applications for Empowering Knowledge Societies.

SILVA, M. T.; SILVA, V. P. R.; PATRÍCIO, M. C. M.; MARIANO, E. B. **Análise Dinâmica do Processo de Desertificação na Região de Gilbués-PI, Utilizando Imagens do TM/Landsat 5**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal: [s.n.]. 2009. p. 6265-6272.

SILVA-FILHO, J. P.; LIMA, E. F.; FERREIRA, D. G. **Avaliação do Consumo de energéticos florestais no Município de Gilbués, Piauí, Brasil**. Conferência Nacional e Seminário Latino-Americano da Desertificação. Fortaleza-CE: Anais. São José dos Campos: INPE, 11 p. 1 CD-ROM. 1994.

SISCOM. Download de Imagens de Satélite. **Sistema Compartilhado de Informações Ambientais**, 2012. Disponível em: <<http://siscom.ibama.gov.br/>>. Acesso em: 23 set. 2011.

SOUSA, W. R. N.; BANDEIRA, C. L. L.; RIBEIRO, E. C.; CASTRO, A. F.; BUSTOS, H. I. A.; SILVA, M. P. S. **MONITORING OF DESERTIFICATION PROCESSES THROUGH TREND ESTIMATES OF TIME SERIES**. International Conference on Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA). Rio de Janeiro: [s.n.]. 2012. p. 561-565.

SOUZA, R. C. **Modelos Estruturais para Previsão de Séries Temporais: Abordagens Clássica e Bayesiana**. 17º Colóquio Brasileiro de Matemática. Rio de Janeiro: [s.n.]. 1989.

TERRAVIEW. Terraview 4.1.0, 2010. Disponível em: <[www.dpi.inpe.br/terraview](http://www.dpi.inpe.br/terraview)>. Acesso em: 10 fev. 2011.

UBA, D. M. **Implementação do Operador Sobreposição de Temas no Ambiente TerraLib/TerraView**. Monografia. INPE. São José dos Campos, SP, p. 36. 2007.

VERHOEYE, J.; DE WULF, R. Land Cover Mapping at Sub-pixel Scales Using Linear Optimization Techniques. **Remote Sensing of Environment**, 79, n. 1, 2002. 96-104. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425701002425>.

VIEIRA, V. C. B.; LIMA, M. M. G. **Diagnóstico Hidroclimático do Município de Gilbués-PI**. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. João Pessoa: [s.n.]. 2007.

VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R.; FERREIRA, K. R.; CÂMARA, G.; PAIVA, J. A. **Programação Genérica Aplicada a Algoritmos Geográficos**. V Simpósio Brasileiro de GeoInformação. Caxambu, MG: [s.n.]. 2002.

WHEELWRIGHT, S. C.; MAKRIDAKIS, S. **Forecasting Methods for Management**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1985.

XU, D. Xu; KANG, X.; QIU, D.; ZHUANG, D.; PAN, J. Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale: A Case Study in the Ordos Plateau, China. **Sensors**, v. 9, n. 3, p. 1738–1753, 2009. Disponível em: Acesso em:17/03/2011.