



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**DISCRIMINAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DE
CLASSES DE COBERTURA VEGETAL NATURAL E ANTRÓPICA DO
OESTE DA BAHIA A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS DO
SENSOR MODIS**

Elane Fiúza Borges

Tese de Doutorado n. 18

Brasília - DF
Fevereiro de 2014



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

Discriminação e caracterização fenológica de classes de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia a partir de séries temporais do sensor Modis

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor.

Área de concentração: *Geoprocessamento Aplicado à Análise Ambiental*

Elane Fiúza Borges
Orientador: Edson Eyji Sano

Brasília – DF
Fevereiro de 2014

BANCA EXAMINADORA

Edson Eyji Sano
Embrapa Cerrados - Orientador

Gustavo Macedo de Mello Baptista
Universidade de Brasília – Examinador Interno

Paulo Roberto Meneses
Universidade de Brasília – Examinador Interno

Mercedes Maria da Cunha Bustamante
Universidade de Brasília – Examinador Externo

Manuel Eduardo Ferreira
Universidade Federal de Goiás – Examinador Externo

Brasília – DF
Fevereiro de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Borges, Elane F.

Discriminação e caracterização fenológica de classes de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia a partir de séries temporais do sensor MODIS. / Elane Fiúza Borges; orientação de Edson Eyji Sano. Brasília, 2014

138p.

Tese de Doutorado (D) – Universidade de Brasília / Instituto de Geociências, 2014.

1. índice de vegetação; 2. filtro temporal; 3. cerrado; 4. curvas espectro-temporais; 5. métricas fenológicas.

Borges, Elane Fiúza. Discriminação e caracterização fenológica de classes de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia a partir de séries temporais do sensor MODIS. Brasília, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2014, 138p. Tese de Doutorado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Elane Fiúza Borges

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Discriminação e caracterização fenológica de classes de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia a partir de séries temporais do sensor MODIS.

GRAU: Doutor ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Esse direito poderá ocorrer somente após a publicação dos artigos contidos no documento. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Elane Fiúza Borges
elaneborges@uefs.br

“Que as coisas são inatingíveis?
Ora! Isso não é motivo para não querê-las.
Que tristes seriam os caminhos
Sem a presença distante das estrelas”

– Mário Quintana

Aos meus pais,
Pela doação irrestrita de suas vidas,
Por cuidarem de mim e dos meus irmãos, com tanto afinho,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela dádiva do conhecimento científico e pela capacidade de persistir quando as forças pareciam me faltar.

Ao meu orientador, Edson Sano, pela atenção, paciência e dedicação dispensadas, a partir das quais construímos uma relação de confiança, respeito e amizade. Pela simplicidade e pela grandiosidade da pessoa e pesquisador que és, qualidades as quais me surpreenderam várias vezes e muito me ensinaram.

À minha família, de modo especial aos meus pais, que forneceram a base necessária para que eu pudesse galgar novos degraus na minha formação profissional. Agradeço também pela compreensão nos momentos que estive ausente.

Ao Cristiano, pelo apoio constante e irrestrito, por ter compartilhado os momentos mais árduos do doutorado.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, pelas disciplinas ministradas com afinco e dedicação.

Aos Professores Gustavo Baptista e Osmar Carvalho Júnior por integrarem a banca de acompanhamento e pelas relevantes contribuições dadas nos seminários apresentados.

Aos meus amigos, que torceram pela conquista desta batalha.

Aos amigos da UnB, de modo particular à Eluzai, Izabel, Júlio e Suzy, com quem compartilhei dificuldades e conquistas durante o doutorado.

Aos meus colegas da UEFS, especialmente aos amigos do GEONAT (Danilo, João, Jocimara, Raquel e Ricardo) e do Lab. de Geoprocessamento (Camilo e Daniel), pela compreensão e incentivos nos momentos difíceis.

Aos colegas do curso de Geografia da Universidade Federal do Oeste da Bahia, pelas experiências compartilhadas.

Aos meus alunos, com os quais aprendo a cada dia, de modo particular aos meus orientandos que acompanharam o período do doutorado e que ficaram na expectativa da concretização desta etapa.

Ao Heleno (Embrapa Cerrados), pela ajuda nos trabalhos de campo.

À UEFS, pelo apoio à realização da pesquisa do doutorado.

À Universidade Federal do Oeste da Bahia, onde pude viver experiências que guardarei por toda a minha vida.

À Embrapa Cerrados, pelo apoio logístico às atividades de campo.

Ao Centro de Sensoriamento Remoto do IBAMA, pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento dessa pesquisa.

RESUMO

Com o lançamento do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo das plataformas Terra e Aqua em 1999 e 2002, respectivamente, com resolução temporal de 1-2 dias, abriu-se a possibilidade de utilizar séries temporais contínuas de imagens orbitais para discriminar classes de cobertura vegetal natural e antrópica em diferentes partes da Terra. Os objetivos propostos nesta pesquisa foram: a) analisar a qualidade radiométrica das séries temporais (2000-2011) do índice de vegetação realçado (EVI) do sensor Terra/Modis do Oeste da Bahia e identificar o filtro mais apropriado, dentre os disponíveis no programa Timesat, para suavizar as referidas séries temporais; b) classificar as séries temporais filtradas de EVI pelo algoritmo *spectral angle mapper* (SAM) para mapear o uso e cobertura vegetal do Oeste da Bahia; e c) caracterizar a fenologia da cobertura vegetal do Oeste da Bahia por meio de métricas fenológicas derivadas de séries temporais de EVI.

A qualidade radiométrica foi analisada com base nos dados do *Pixel Reliability*, disponível no produto MOD13Q1. Os desempenhos dos três métodos de suavização disponibilizados no Timesat (Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico) foram analisados por meio do teste F de Graybill e pela estatística de Willmot. Curvas espectro-temporais representativas das classes Campo sujo, Cerrado ralo, Cerrado típico, Cerrado denso, Floresta estacional, Mata seca, Vegetação secundária, Cultura agrícola e Pastagem cultivada foram utilizadas como membros de referência na aplicação do algoritmo SAM para classificar as séries temporais e obter o mapa de uso e cobertura vegetal da área de estudo. A acurácia do mapeamento foi analisada por meio de imagens do satélite RapidEye e estatística Kappa. As séries temporais de EVI foram processadas no programa Timesat para extrair as métricas fenológicas de taxas de rebrota, senescência, produtividades total e sazonal, valores de mínimo e máximo, comprimento e amplitude alcançados em cada estação climática. Posteriormente, realizaram-se as tabulações cruzadas entre as métricas fenológicas e as classes de cobertura vegetal natural e antrópica da área de estudo.

Cinco por cento dos pixels do Modis do Oeste da Bahia estiveram cobertos por nuvens, praticamente todos eles provenientes da estação chuvosa. O filtro que apresentou melhor desempenho na suavização de séries temporais do Modis EVI dessa região foi Logística dupla. O classificador SAM discriminou as classes supracitadas (índice Kappa = 0,8), todavia, baseado em dados disponíveis na literatura, houve subestimação da Pastagem cultivada e superestimação do Cerrado típico.

As métricas fenológicas evidenciaram as adaptações vegetativas relacionadas ao periodismo da vegetação no Oeste da Bahia. Observou-se grande heterogeneidade na representação das métricas fenológicas, pois a vegetação do Cerrado possui grande

diversidade em termos de estrutura (composto por um mosaico de formações campestre, savânica e florestal), além de apresentar forte influência da sazonalidade climática. Essas características refletem-se em acentuadas diferenças em termos de índice de área foliar, densidade e distribuição espacial de indivíduos e teor de água nas folhas, entre outros parâmetros. Portanto, os distintos padrões das métricas encontrados nessa pesquisa estão relacionados às características naturais e adaptativas ao ambiente de cada fitofisionomia presente na área de estudo. No caso da agropecuária (culturas agrícolas de sequeiro e pastagens cultivadas, principalmente), as métricas também apresentaram elevada heterogeneidade, por causa da diversidade em termos de tipo de cultura (por exemplo, soja, milho, algodão e milheto) e do manejo de solos e planta (por exemplo, plantio direto e plantio convencional).

Esse estudo permitiu demonstrar o potencial de séries temporais do sensor Modis, após a aplicação do filtro temporal, para discriminar classes de uso e cobertura vegetal no Oeste da Bahia. Recomenda-se a continuidade da pesquisa a partir das séries temporais em consonância com os dados do regime pluviométrico para o Oeste da Bahia, devido as marcantes características da sazonalidade, para a análise do comportamento fenológico da cobertura vegetal na área de estudo.

Palavras-Chave: índice de vegetação; filtro temporal; Cerrado; curvas espectro-temporais; Métricas fenológicas.

ABSTRACT

The launch of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor aboard of the Terra and Aqua platforms in 1999 and 2002, respectively, with 1-2 day temporal resolution, opened the possibility of using continuous satellite time series to discriminate land use and land cover classes in different parts of the world. The objectives of this study were: a) to analyze the radiometric quality of Enhanced Vegetation Index (EVI) time series (2000-2011) derived from the Terra/Modis sensor of Western Bahia and to identify the most appropriated filter, among those available in the Timesat software, to smooth time series; b) to classify the filtered EVI time series by the spectral angle mapper (SAM) algorithm to map land use and land cover classes of Western Bahia; and c) to characterize the phenology of land use and land cover classes of Western Bahia by means of phenological metrics derived from the EVI time series.

The radiometric quality was evaluated based on the Pixel Reliability data available in the MOD13Q1 product. The performances of three smoothing filters available in the Timesat software (double Logistics, Savitzky-Golay and asymmetric Gaussian) were analyzed using the Graybill's F-test and the Willmot statistics. Spectro-temporal curves representative of Campo sujo (shrub Cerrado), Cerrado ralo (sparse Cerrado), Cerrado típico (Cerrado shrubland), Cerrado denso (dense Cerrado), Seasonal forest, Dry forest, Secondary vegetation, Croplands and Pasturelands were used as reference members in applying the SAM algorithm to classify the time series to obtain land use and land cover map of the study area. The accuracy of the mapping was analyzed by RapidEye satellite images and Kappa statistics. The EVI time series were processed in the Timesat software to extract phenological metrics of rate of regrowth, senescence and total seasonal productivity, minimum and maximum values, as well as the length and amplitude achieved in each weather station. Subsequently, we conducted the cross-tabulations between phenological metrics and land use and land cover classes of the study area.

Five percent of the Modis pixels of Western Bahia were affected by clouds, virtually all of them from the rainy season. The filter with the best performance to smooth Modis EVI time series from this region was the double Logistics. The SAM classifier discriminated the above mentioned classes (Kappa index = 0.8), however, based on previous data available in the literature, there was underestimation of Pasturelands and overestimation of Cerrado shrubland.

The phenological metrics showed vegetative adaptations related to the periodism of the vegetation in Western Bahia. There was considerable heterogeneity in the representation of phenological metrics because the Cerrado vegetation has high diversity in terms of

structure (composed of a mosaic of grasslands, shrublands and forestlands), besides the strong influence of climatic seasonality. These characteristics are reflected in strong differences in the leaf area index, density and spatial distribution of individuals and the water content of leaves, among other parameters. Therefore, the different patterns of metrics found in this study are related to natural and adaptive characteristics of the environment of each phytophysiology present in the study area. In the case of agriculture (mainly dry spell croplands and cultivated pasturelands), the metrics also showed high heterogeneity because of the diversity in terms of type of culture (e.g., soybean, corn, cotton and millet) and soil and plant management (e.g., conventional and no-till planting system).

This study allowed demonstrating the potential of MODIS time series after applying temporal filter for discriminating land use and land cover classes of Western Bahia. We recommend continuing this research analyzing the influence of the rainfall in the EVI time series of the study area. As mentioned before, this region is marked by the strong seasonality.

Keywords: vegetation index; temporal filter; Cerrado; spectro-temporal curves; phenological metrics.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: APRESENTAÇÃO GERAL.....	20
1.1 Apresentação	20
1.2 Questão da pesquisa.....	20
1.3 Hipóteses	21
1.4 Objetivos	21
1.4 Justificativa.....	22
1.5 Estrutura da Tese.....	22
CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO OESTE DA BAHIA.....	24
2.1 Geologia.....	29
2.2 Geomorfologia.....	31
2.3 Clima	33
2.4 Solos	33
2.5 Hidrografia.....	35
2.6 Cobertura vegetal.....	37
Referências Bibliográficas	42
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	44
3.1 O conceito de Cerrado.....	44
3.2 Sensoriamento Remoto para o estudo da vegetação	46
3.3 Índices de Vegetação	49
3.4 Histórico e Características do Sensor MODIS	51
3.5 Séries Multitemporais de Dados de Satélites.....	54
3.6 Qualidade dos dados MODIS para o Oeste da Bahia.....	56
3.7 Métodos de Suavização de Séries Temporais.....	57
3.8 Minimum Noise Fraction (MNF)	61
3.9 Spectral Angle Mapper (SAM)	62
3.10 Fenologia da vegetação	63
Referências Bibliográficas	64

CAPÍTULO 4: DESEMPENHO DO TIMESAT NA SUAVIZAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO REALÇADO (EVI) DO SENSOR MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER (MODIS) DO OESTE DA BAHIA.....	70
4.1 Introdução	72
4.2 Materiais e Métodos	73
4.3 Resultados e Discussão	79
4.3.1 Análise da confiabilidade dos dados do Modis EVI.....	79
4.3.2 Desempenho dos filtros do Timesat	83
4.4 Conclusões.....	92
Referências Bibliográficas	92
CAPÍTULO 5: SÉRIES TEMPORAIS DE EVI DO MODIS PARA O MAPEAMENTO DE USO E COBERTURA VEGETAL DO OESTE DA BAHIA.....	96
5.1 Introdução	98
5.2 Materiais e Métodos	100
5.3 Resultados e Discussão	105
5.4 Conclusões.....	112
Referências Bibliográficas	112
CAPÍTULO 6: CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DA COBERTURA VEGETAL DO OESTE DA BAHIA A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS DE EVI DO SENSOR MODIS.....	116
6.1 Introdução	118
6.2 Materiais e Métodos	120
6.3 Resultados e Discussão	126
6.4 Conclusões.....	132
Referências Bibliográficas	132
CAPÍTULO 7: CONSIDERAÇÕES FINAIS	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Caracterização dos subtipos de Cerrado sentido restrito.....	46
Quadro 3.2 - Características do sensor MODIS.....	52
Quadro 3.3 - Principais produtos do sensor MODIS	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Critério para classificação do índice de desempenho c e do coeficiente de correlação linear r	79
Tabela 4.2 - Classificação (%) dos pixels do MOD13Q1 do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011 nas seguintes categorias: -1 (sem dado), 0 (dado bom), 1 (dado marginal), 2 (neve/gelo) e 3 (cobertos por nuvem).....	80
Tabela 4.3 - Qualidade radiométrica (%) dos pixels de EVI do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011, discriminada segundo cinco parâmetros de qualidade.....	80
Tabela 4.4 - Qualidade radiométrica (%) dos pixels de EVI do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011, discriminada por sazonalidade climática.....	81
Tabela 4.5 - Síntese dos resultados obtidos pelos métodos de filtragem de Logística Dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico.....	91
Tabela 4.6 - Interpretação dos resultados obtidos pelos testes estatísticos de Graybill e Willmott para os filtros de Logística Dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico.....	92
Tabela 5.1 - Matriz de confusão do mapeamento de uso e cobertura vegetal da área de estudo.	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Localização do Oeste da Bahia.....	25
Figura 2.2 - a) Novas áreas desmatadas; b) áreas anteriormente desmatadas e atualmente com pastagem cultivada.....	27
Figura 2.3 - a) Imagem do satélite Rapideye com cicatriz de queimada; b) Fotografia de campo de talhão queimado.....	28
Figura 2.4 - a) Áreas queimadas nas proximidades da Cachoeira do Acaba Vida; b) Queimadas na Serra do Mimo.....	29
Figura 2.5 - Mapa litológico do Oeste da Bahia.....	30
Figura 2.6 - Mapa geomorfológico do Oeste da Bahia.....	31
Figura 2.7 - a) Mapa hipsométrico do Oeste da Bahia; b) Mapa de declividade do Oeste da Bahia.....	32
Figura 2.8 - Balanço hídrico e Climograma do município de Barreiras.....	33
Figura 2.9 - Mapa de solos do Oeste da Bahia, escala de 1:1.000.000. Fonte: Projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1982).....	35
Figura 2.10 - a) Mapa da rede hidrográfica no Oeste da Bahia; b) nascente do rio Grande; c) cidade de Barreiras assentada no entorno do rio Grande.....	36
Figura 2.11 - Localização do bioma Cerrado no Brasil, com destaque para a região Oeste da Bahia.....	38
Figura 2.12 - Mapa de cobertura vegetal e uso do solo do Oeste da Bahia.....	39
Figura 2.13 - Mapa de desmatamento entre os anos de 2009 a 2010.....	40
Figura 2.14 - a) Mapa de unidades de conservação de proteção integral e de uso sustentável existentes no Oeste da Bahia; b) Mapa de áreas prioritárias para conservação e de corredores existentes no Oeste da Bahia.....	41
Figura 3.1 - Comportamento espectral de diferentes espécies vegetais nas faixas do visível e do infravermelho próximo (NIR).....	48
Figura 3.2 - Representação do funcionamento do classificador por ângulos espectrais.....	63
Figura 4.1 - Localização da área de estudo (Mesorregião do Extremo Oeste da Bahia) no estado da Bahia.....	74

Figura 4.2 - Precipitação média quinzenal da área de estudo, representada pela estação pluviométrica do Instituto Nacional de Meteorologia do município de Correntina.....	75
Figura 4.3 - Distribuição espacial de pixels cobertos com nuvens na Mesorregião do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011.....	82
Figura 4.4 - Séries temporais (2000-2011) de índice de vegetação realçado (EVI) do Oeste da Bahia.....	83
Figura 4.5 - Pixels afetados por nuvens e espectro temporal de EVI (2000 a 2011) do cerrado típico	83
Figura 4.6 - Séries temporais (2000-2011) de índice de vegetação realçado (EVI) do Oeste da Bahia.....	84
Figura 4.7 - Resultado do teste de Graybill para os filtros de Logística Dupla, Savitzky-Golay e Assimetria Gaussiana.....	86
Figura 4.8 (parte1) - Resultado do teste de Willmott para os filtros de Logística Dupla, Savitzky-Golay e Assimetria Gaussiana	88
Figura 4.8 (continuação) - Resultado do teste de Willmott para os filtros de Logística Dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico.....	90
Figura 5.1 - Localização da mesorregião do Extremo Oeste da Bahia, com destaque para as sedes e os limites municipais	101
Figura 5.2 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa	102
Figura 5.3 - Exemplo de curvas espectro-temporais de EVI original, EVI filtrado (logística dupla) e EVI filtrado mais MNF.....	102
Figura 5.4 - Curvas espectros-temporais de EVI (2000-2011) representativas das classes identificadas pelo algoritmo SAM.....	104
Figura 5.5 - Composição colorida das componentes principais 3, 4 e 5 derivados do processamento de imagens por MNF (a), primeira componente principal (b) e 276ª componente principal (c)	106
Figura 5.6 - Fotografias registradas em trabalho de campo representativas das fitofisionomias e usos existentes na área de estudo.....	107
Figura 5.7 - Desvio padrão dos espectros-temporais dos pixels identificados em cada classe	108

Figura 5.8 - Mapa de uso e cobertura vegetal do Oeste da Bahia gerado a partir da classificação SAM	110
Figura 6.1 - Mapa de localização do Oeste da Bahia, com destaque para o mapa do índice pluviométrico anual da região.....	120
Figura 6.2 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados nesta etapa da pesquisa.....	122
Figura 6.3 - Curva espectro-temporal de EVI típica de Cerrado ralo do município de São Desidério.....	122
Figura 6.4 - Demonstração da extração das métricas fenológicas a partir da curva espectro-temporal de EVI correspondente ao Cerrado ralo.....	123
Figura 6.5 - Mapa de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia, derivado de séries temporais de EVI do sensor MODIS	125
Figura 6.6 - Assinaturas temporais de EVI representativas das macroclasses consideradas na análise das métricas fenológicas no Oeste da Bahia.....	125
Figura 6.7 - Métricas fenológicas do Oeste da Bahia extraídas da série temporal de EVI do período de 2000-2011	127
Figura 6.8 - Resultado da tabulação cruzada das métricas fenológicas com o mapa uso do solo e cobertura vegetal	128

1 - APRESENTAÇÃO GERAL

1.1 - Apresentação

A região Oeste da Bahia tem sido alvo do desmatamento acelerado. O aumento da intensificação desse processo deu-se a partir do início dos anos de 1980. Apesar disso, é também uma área com características peculiares que conferem grande biodiversidade e heterogeneidade à paisagem. Por isso, é de grande relevância desenvolver pesquisas que identifiquem, caracterizem e monitorem as alterações na paisagem nessa área de estudo.

Em áreas de grande diversidade, tanto no que se refere às características físicas da paisagem, quanto às atividades desenvolvidas, torna-se necessário a utilização de mecanismos, como os dados de satélites e as técnicas de processamento, capazes de permitir o diagnóstico da realidade estudada. Todavia, o uso de imagens de uma única data pode camuflar informações importantes, que necessitam de análises em recortes temporais específicos, capazes de registrar dados mais completos acerca dos alvos imageados.

As séries temporais permitem a análise da paisagem de forma processual, possibilitando identificar eventos específicos no tempo e no espaço. Dados provenientes do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (Modis) têm sido amplamente utilizados por permitirem uma visão sinóptica da realidade pesquisada.

1.2 - Questão da pesquisa

A problemática investigada nesta pesquisa pode ser desmembrada em três questões: Qual a qualidade radiométrica dos dados provenientes do sensor Modis para o Oeste da Bahia? Qual o melhor suavizador para a remoção dos ruídos de dados de EVI do Modis? É possível discriminar e caracterizar a fenologia das fitofisionomias e do uso do solo (agropecuária) no Oeste da Bahia a partir de séries temporais do Modis?

Um dos maiores problemas referentes às séries temporais refere-se aos ruídos inerentes à produção dos dados. No caso da área de estudo, tais ruídos estão associados à interferência da atmosfera. A aplicação de filtros pode minimizar os ruídos temporais presentes nos dados, mas também pode implicar em perdas de informações. Como existe uma gama muito grande de suavizadores, buscou-se identificar o melhor suavizador para a remoção dos ruídos temporais nos dados de EVI do Modis para a mesorregião do Oeste da Bahia

A problemática da discriminação de fitofisionomias, bem como a caracterização da fenologia das coberturas vegetais do Oeste Bahia pode ser contextualizada por ser esta região marcada pelos efeitos da sazonalidade, o que implica em dificuldades quando se trata da identificação de fitofisionomias e classes de uso representativas na área de estudo a partir de imagens monotemporais. Por isso, acredita-se que as assinaturas temporais do sensor Modis, extraídas de dados de EVI, podem permitir melhor separabilidade da vegetação e dos tipos de uso, bem como possibilita compreender o comportamento fenológico das formações vegetais no período referente à série temporal analisada.

1.3 - Hipóteses

- ✓ Os ruídos das séries temporais de EVI do Modis estão associados aos efeitos atmosféricos e podem ser removidos por meio da aplicação de filtros, bem como, se pode avaliar o desempenho dos suavizadores;
- ✓ As curvas espectro-temporais funcionam a contento como membros de referência e, por conseguinte, podem ser utilizadas como assinaturas temporais na classificação de alvos representativos do Oeste da Bahia;
- ✓ As métricas fenológicas, extraídas de séries temporais de EVI, permitem a identificação e análise das fenofases e, portanto, subsidiam a caracterização fenológica das diferentes classes de cobertura vegetal natural e antrópica da área de estudo.

1.4 - Objetivos

O objetivo geral dessa pesquisa consistiu em analisar a potencialidade das séries temporais de EVI do sensor Modis de 2000-2011 para discriminar e caracterizar a fenologia de classes de cobertura vegetal e uso do solo no Oeste da Bahia. Como objetivos específicos, têm-se:

- ✓ Avaliar a qualidade radiométrica das séries temporais do Modis no Oeste da Bahia;
- ✓ Remover os ruídos temporais por meio da aplicação de diferentes métodos de filtragem disponíveis no programa Timesat e identificar qual deles oferece melhor resultados na suavização das curvas de EVI;
- ✓ Discriminar fitofisionomias no Oeste da Bahia por meio de séries temporais de EVI;
- ✓ Caracterizar a fenologia das classes de cobertura vegetal, natural e antrópica do Oeste da Bahia a partir das métricas fenológicas extraídas das séries temporais de EVI.

1.5 - Justificativa

As imagens Modis, por serem de alta resolução temporal e pelo acervo de dados existentes (a série histórica utilizada nesta pesquisa é de 12 anos: 2000-2011), teoricamente permitem a discriminação de fitofisionomias de Cerrado e de outras coberturas de terras representativas na área de estudo, bem como a identificação das alterações ocorridas na paisagem, quer sejam em função dos efeitos da sazonalidade ou da supressão da vegetação nativa. Este último é um processo muito intenso na área de estudo, devido à predominância da agricultura mecanizada, com produção em larga escala.

Diante da dinâmica do comportamento espectral, provocada pelos fatores externos, necessita-se de técnicas capazes de identificar e elucidar estes fenômenos. Todavia, os estágios inicial, intermediário e final da sucessão ecológica são difíceis de serem analisados por meio de imagens ópticas. Esta análise torna-se mais complexa quando as imagens são monotemporais. Por conta da grande biodiversidade florística e da dinâmica no que tange ao uso do solo no Cerrado, o processamento de imagens monotemporais pode deixar lacunas na discriminação dos tipos fitofisionômicos e na identificação das alterações na paisagem. Por outro lado, assinaturas multitemporais podem fornecer os parâmetros inerentes à cobertura vegetal existente na área de estudo para a sua posterior discriminação, bem como se pode detectar o período cuja mudança da paisagem tenha ocorrido. Desta forma, apresenta-se o pressuposto de que a incorporação de assinaturas temporais à assinatura espectral deve melhorar a capacidade de discriminação de alvos na paisagem.

Os resultados alcançados nesta pesquisa também podem despertar uma maior atenção para o estado de conservação da área de estudo, a qual, com o desmatamento e o conseqüente avanço da agricultura mecanizada na região, já apresenta elevado grau de fragmentação da paisagem e perda de biodiversidade. Daí decorre a importância de se discriminar e mapear as fitofisionomias representativas no Oeste da Bahia.

1.6 - Estrutura da tese

No Capítulo 1, fez-se uma apresentação geral, onde são abordadas as questões que foram objeto de investigação, as hipóteses e os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2, consta a caracterização da área de estudo, abordando as características, principalmente, do ponto de vista biofísico da paisagem.

No Capítulo 3, foi realizada a revisão bibliográfica acerca dos principais conceitos e abordagens tratados nesta pesquisa.

O Capítulo 4 compreende o primeiro artigo, no qual se analisou a confiabilidade radiométrica dos dados Modis para o Oeste da Bahia e avaliou-se o desempenho dos suavizadores das séries temporais de EVI para a remoção dos ruídos;

O Capítulo 5 compreende o segundo artigo, que consistiu na utilização de séries temporais de EVI da plataforma Terra Modis, filtradas pelas técnicas de Logística dupla e *Minimum Noise Fraction* (MNF) e classificadas pelo algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) para mapear classes de uso e cobertura vegetal representativas do Oeste da Bahia.

O Capítulo 6 refere-se ao terceiro artigo, no qual realizou-se a caracterização da fenologia das classes de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia a partir da extração das métricas fenológicas.

No capítulo 7 têm-se as considerações finais da tese.

2 - CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO OESTE DA BAHIA

A referida região é caracterizada predominantemente pelo bioma Cerrado, o qual, além do Oeste da Bahia, é encontrado em parte dos estados de Ceará, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Rondônia e São Paulo. O Cerrado ocupa, de forma contínua, os estados de Goiás, Tocantins e o Distrito Federal (RIBEIRO e WALTER, 2008). É importante considerar que o Cerrado se estende para além das fronteiras brasileiras, sendo encontrado também na Bolívia e Paraguai. Paisagens semelhantes são localizadas na Guiana, Suriname, Colômbia e Venezuela, onde recebe o nome de Llanos (AB'SABER, 2003; RIBEIRO e WALTER, 2008).

De acordo com a regionalização do estado da Bahia elaborada pelo IBGE, a Mesorregião do Extremo Oeste da Bahia (Figura 2.1), neste trabalho denominada simplesmente de Oeste da Bahia, é composta pelas microrregiões de Barreiras, Cotegipe e Santa Maria da Vitória, incluindo 24 municípios: Baianópolis, Barreiras, Catolândia, Formosa do Rio Preto, Luís Eduardo Magalhães, Riachão das Neves e São Desidério (**microrregião de Barreiras**); Angical, Brejolândia, Cotegipe, Cristópolis, Mansidão, Santa Rita de Cássia, Tabocas do Brejo Velho e Wanderley (**microrregião de Cotegipe**); Canápolis, Cocos, Coribe, Correntina, Jaborandi, Santa Maria da Vitória, Santana, São Félix do Coribe e Serra Dourada (**microrregião de Santa Maria da Vitória**).

As sedes municipais se concentram predominantemente no extremo leste da região do Oeste da Bahia, reflexo da prática do desenvolvimento das atividades econômicas (pecuária extensiva e agricultura familiar), conduzidas primariamente nestas áreas. Devido aos solos pobres e à carga pejorativa da “indústria da seca” que a mídia fomentava para o Nordeste brasileiro, esta área foi relativamente utilizada pela agricultura em larga escala de forma tardia, pois não se tinha a crença de que, nesta região da Bahia, inserida no Nordeste brasileiro, fosse possível a produção de grãos em larga escala, como já ocorria no Sul do Brasil.

A despeito dos fatos anteriormente abordados, a disseminação do conhecimento sobre esta área, os baixos preços das terras e os incentivos financeiros do governo foram fatores preponderantes para o avanço do cultivo agrícola nesta região (MONDARDO, 2011). As características biofísicas da paisagem do Oeste da Bahia também foram imprescindíveis na expansão da agricultura em larga escala, principalmente com a produção de grãos, pois encontram-se nessa região solos profundos, estação climática bem definida, topografia plana e elevada que proporcionam a mecanização das terras. O Oeste da Bahia integra a

mais recente fronteira agrícola brasileira, denominada de MAPITOBA, composta pelos Cerrados dos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia.

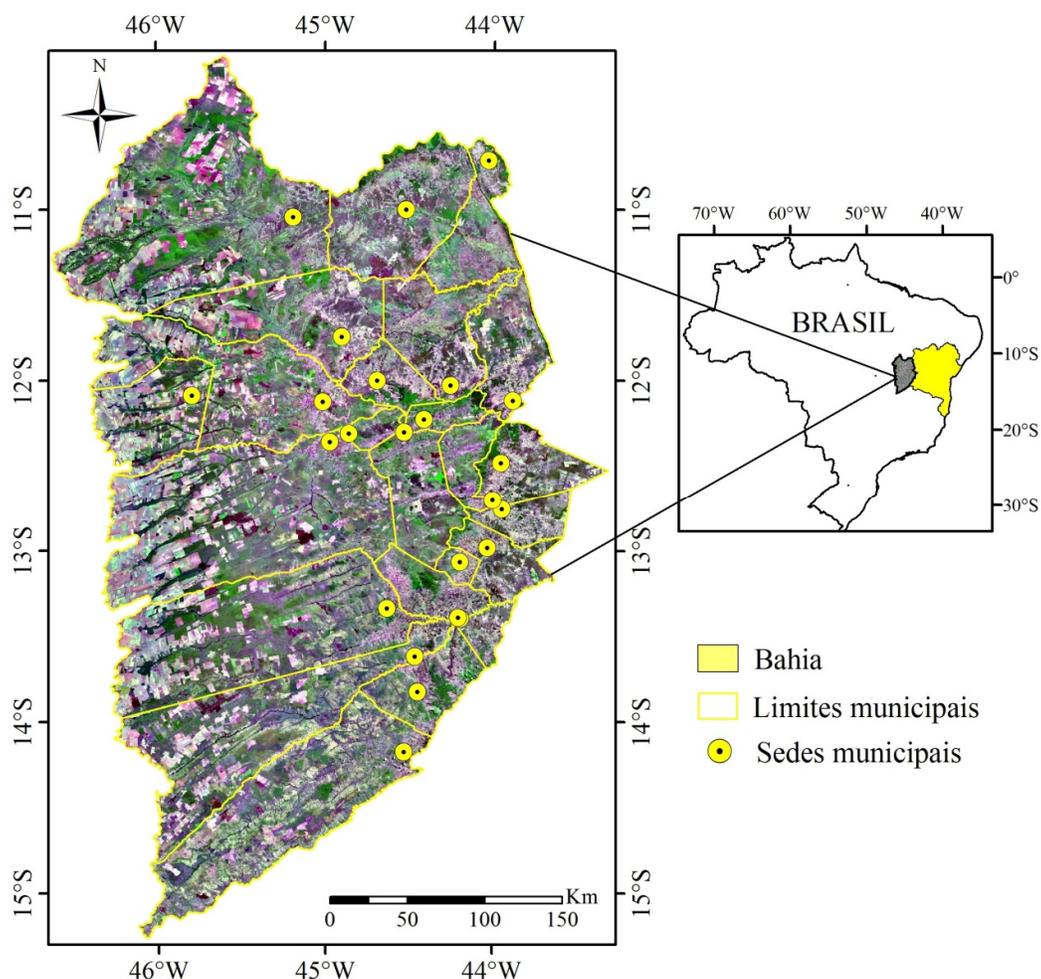


Figura 2.1 - Localização da área de estudo no Estado da Bahia, ilustrada com composição colorida R3G4B5 das imagens do satélite TM/Landsat-5.

Conforme Fernandes (2006), uma combinação de fatores climáticos, topográficos, hidrológicos e pedológicos propiciou condições mesológicas favoráveis ao desenvolvimento de um mosaico de Cerrado, no qual dominam aspectos vegetativos bem marcantes e estreitamente relacionados, subordinados a um intenso processo de escleromorfismo, presente em suas formações florísticas bem caracterizadas.

No domínio do Cerrado, é notável a presença de florestas de galerias, em função da maior disponibilidade de água por drenagem subterrânea do terreno mais alto, de campos úmidos, por causa do encharcamento estacional da superfície do solo, bem como de florestas de interflúvio, devido à rica mineralogia do solo (EITEN, 1993). Ainda segundo este autor, no extremo Oeste da Bahia, algumas veredas contêm buritirana (*Mauritiamartiana*),

em vez de buriti, ou as duas palmeiras concomitantemente. Tal fato está relacionado às condições locais de drenagem, isto é, devido ao grau de aproximação do lençol freático à superfície e ao tempo relativamente longo que permanece nesse nível superficial, estas características influenciam na formação vegetal de fundo de vale. É comum encontrar, em apenas um vale, alternância de segmentos de veredas e florestas.

Nos seus estudos sobre o Cerrado, o autor supracitado afirmou que manchas de florestas mesofíticas ocorrem sobre toda a província deste bioma, em terrenos de interflúvio sobre Latossolos profundos e relativamente menos ácidos, derivados de rochas alcalinas, como basalto, certos tipos de gnaiss e sobre solos derivados de calcários. Por isso, estas florestas não aparecem onde há vasta região de solos pobres ininterruptos, como é o caso de todo o extremo Oeste da Bahia.

O Oeste da Bahia, inserido no Cerrado, corresponde a uma área representativa da ocupação agrícola neste bioma, cujo marco para o desenvolvimento desta atividade deu-se no início da década de 1980 (BRANNSTROM et al., 2008; SANO & PINHATI, 2009). Segundo Ribeiro e Walter (2008), grande parte desse bioma está degradado, a despeito da grande diversidade florística, cujos tipos fitofisionômicos variam de formação campestre a florestal.

Corroborando com a informação de que o bioma Cerrado tem sido amplamente devastado, principalmente pela atividade agropecuária, Ab'Saber (2003) enfatizou que tais atividades têm provocado a fragmentação da paisagem. Estudos como os de Sano et al. (2008) estimaram que cerca de 40% dos 208 milhões de hectares de Cerrado contínuo já foram convertidos em áreas cultivadas, principalmente pelas culturas agrícolas e pastagens. A Bahia tem participação de 27% no bioma Cerrado, sendo que mais de 26% da área total de Cerrado neste estado corresponde às classes de uso (SANO et al., 2008).

Um dos principais fatores para a supressão da vegetação nativa no Oeste da Bahia é o seu relevo plano, popularmente denominado de Chapadão, de interesse prioritário para agricultura, uma vez que permite mecanização intensiva, a despeito dos solos pobres e ácidos, como os Latossolos que predominam na região. O avanço desta atividade deu-se a partir da região centro Oeste do Brasil. No caso do Oeste da Bahia, este processo foi relativamente retardatário, o que implica na compreensão do porquê no final da década de 1990 e início do século XXI se teve intensa devastação nesta região (Figura 2.2).

No período entre 2008 e 2009, o Programa de Monitoramento de Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélites (PMDBBS) do Ministério do Meio Ambiente identificou que, entre os cinco municípios que mais desmataram o Cerrado, quatro deles estavam no Oeste da Bahia, sendo eles Formosa do Rio Preto, Jaborandi, Correntina e São Desidério, ocupando, respectivamente, primeiro, terceiro, quarto e quinto lugares no ranking nacional do desmatamento no Cerrado (BRASIL, 2011a).

A Portaria divulgada no Diário Oficial da União, do dia 22 de março de 2012, apontou na Bahia os municípios que mais desmatam no bioma Cerrado, sendo eles: Barreiras, Cocos, Correntina, Formosa do Rio Preto, Jaborandi, Luís Eduardo Magalhães, Riachão das Neves e São Desidério. De acordo com esta portaria, esses municípios devem ser alvos de medidas e ações prioritárias de monitoramento e controle do desmatamento ilegal, ordenamento territorial e incentivo às atividades econômicas ambientalmente sustentáveis, manutenção de áreas nativas e recuperação de áreas degradadas.



Figura 2.2 - Fotografias de campo ilustrando novas áreas desmatadas (a) e áreas anteriormente desmatadas e atualmente ocupadas com pastagem cultivada (b).

A região Oeste da Bahia é bastante dinâmica, no que tange as alterações na paisagem, quer seja pela supressão da vegetação nativa, intensificada a partir da década de 1980, quer seja pelos efeitos da sazonalidade, cujo período de seca prolongado é responsável pelo estresse hídrico acentuado na grande maioria das fitofisionomias do Cerrado. Tal dinâmica pode ser facilmente observada na paisagem a partir de visitas à área de estudo, bem como via interpretação de imagens de satélites (mesmo sem processamentos digitais sofisticados). O comportamento da vegetação é realçado, por exemplo, por meio de composições coloridas de imagens dos períodos seco e chuvoso, em que se utilizem, no triplete de bandas, os comprimentos de ondas referentes ao vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas.

Além dos efeitos naturais que a estiagem prolongada promove na vegetação, o fogo é recorrente durante a estação seca em grande parte da região do Oeste da Bahia e tem sido utilizado na supressão da vegetação nativa de Cerrado para abrir novas áreas para expansão do agronegócio (Figura 2.3). Felfili et al. (1999) chamaram atenção para os efeitos da sazonalidade no bioma Cerrado, cujo comportamento vegetal é marcado por um estresse hídrico que favorece o avanço do fogo.



Figura 2.3 - Recorte de imagem do satélite Rapideye (composição colorida R3G5B2) mostrando cicatriz de queimada (na vegetação nativa) em formato geométrico e resíduos de biomassa enfileirado (realce amarelo) (a) e fotografia de campo de talhão queimado e resto de matéria orgânica enfileirado (ao fundo) (b).

As queimadas no Oeste Baiano ocorrem em grandes proporções, principalmente nos meses cuja umidade relativa do ar é menor e o índice pluviométrico é próximo de zero. Os meses mais críticos em relação aos incêndios são agosto, setembro e parte do mês de outubro, pois as chuvas geralmente ocorrem a partir da segunda quinzena desse último mês. Porém, boa parte dos incêndios tem causas antrópicas, sejam elas criminosas ou acidentais. Na Figura 2.3, por exemplo, é possível observar o formato geométrico das cicatrizes de queimadas, o que pode ser considerado um indicativo de planejamento das queimadas. Nesses casos, é frequente a construção de aceiros para delimitar as proporções da área que o fogo deve alcançar. Observa-se também a organização, em filas, dos restos de matéria orgânica queimada para serem recolhidos pela máquina.

Esta hipótese é corroborada pelo fato de que, quando as queimadas ocorrem, não é notável a presença de raios na região, os quais, ao incidirem na vegetação, com sinais de deficiência hídrica, promoveriam os incêndios. O entorno das cidades também é constantemente afetado pelo fogo, causando grande mal-estar à população (Figura 2.4).

Para compreender melhor a área de estudo, foi necessário fazer uma caracterização física da paisagem. Todavia, é importante salientar que alguns mapeamentos realizados, a maioria em nível nacional, são em pequena escala cartográfica, o que limitou uma análise mais detalhada sobre o Oeste da Bahia. Apesar desta limitação, serão especificadas, em seguida, as principais características da área de estudo no que tange a Geologia, Geomorfologia, Solos, Clima, Hidrografia e Vegetação. Esta abordagem também deu suporte para as análises dos dados na perspectiva de integração das variáveis da paisagem.



Figura 2.4 - Fotografias de campo mostrando áreas queimadas nas proximidades da Cachoeira do Acaba Vida (a) e queimadas na Serra do Mimo, no entorno da cidade de Barreiras (b).

2.1 - Geologia

Do ponto de vista geológico, a área de estudo apresenta formações diversificadas, porém, com predominância de algumas litologias, conforme se observa na Figura 2.5. Vale ressaltar que a caracterização litológica está bastante generalizada, pois o mapa foi elaborado na escala de 1:1.000.000 pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

A área de estudo é caracterizada predominantemente por rochas sedimentares da Formação Urucuia, cuja litologia é composta por pelitos, arenitos e arenitos conglomeráticos. Nessa unidade se encontram os chapadões, que integram as altitudes mais elevadas da área de estudo, e as menores declividades, onde se desenvolvem a agricultura mecanizada, justamente pela topografia plana que permite a utilização de maquinários capazes de realizar a produção agrícola em larga escala. Nesta unidade também se encontra o cerne desta pesquisa, haja vista que nesta predominam as principais fitofisionomias de Cerrado da área de estudo.

As coberturas detrito-lateríticas, também formadas por rochas sedimentares, é a segunda maior unidade da área de estudo, composta por areias, argilas, lateritas e também apresentam, como subclasse, os sedimentos inconsolidados.

Além das duas principais unidades apresentadas, a área de estudo, conforme caracterização da CPRM (BRASIL, 2003), também possui as seguintes unidades: Três Marias, formada pelos litotipos de arcóseo, siltito e argilito; Rio Preto, formado por xistos grafitosos, filitos grafitosos, xistos, filitos e quartzitos; Canabrinha, com quartzito feldspático, metadiamiclito, metamarga, metassiltito, micaxisto; Granitóide de Mansidão, rocha ígnea, formada por tonalito e granito; Serra da Mamona (metamórfica), composta por

ardósia, metassiltito, mármore, metamarga, metarenito; São Desidério (metamórfica) formada por metassiltito, mármore, metamarga; Paraopeba (sedimentar), composta de calcarenito, dolomito, ritmito, marga, folhelho, argilito, siltito, arcóseo; Depósitos aluvionares recentes (sedimentar), formados por areia, argila; Serra de Santa Helena (sedimentar), formada basicamente de folhelho, siltito; Serra da Saudade (sedimentar), formada por argilito, siltito, arenito; Lagoa do Jacaré (sedimentar), formada por siltito, calcário, calcarenito; Sete Lagoas (sedimentar), composta de argilito, calcário, marga, ritmito, sillexito; e Depósitos aluvionares recentes (sedimentar), formados por areia e argila.

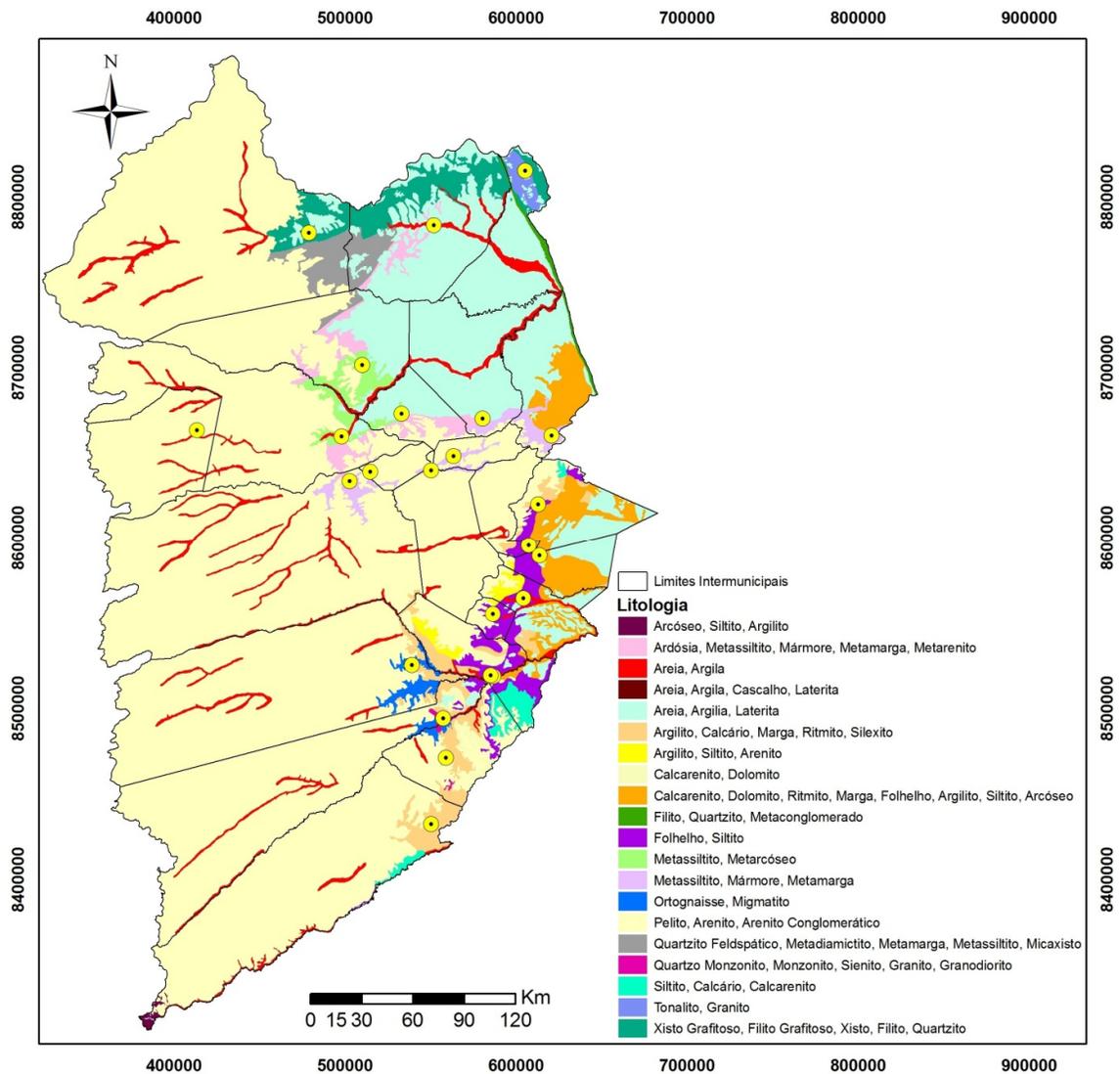


Figura 2.5 - Mapa litológico do Oeste da Bahia. Fonte: BRASIL (2003).

2.2 - Geomorfologia

A base para caracterização da geomorfologia da área de estudo foi o mapa das macrounidades geomorfológicas (Figura 2.6) do projeto RADAMBRASIL, na escala de 1:1.000.000 (BRASIL, 1982), bem como os mapas de hipsometria e declividade (Figura 2.7), elaborados a partir do modelo digital do terreno derivado de imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), reamostrado para 30 m pelo projeto Topodata (VALERIANO e ROSSETTI, 2012).

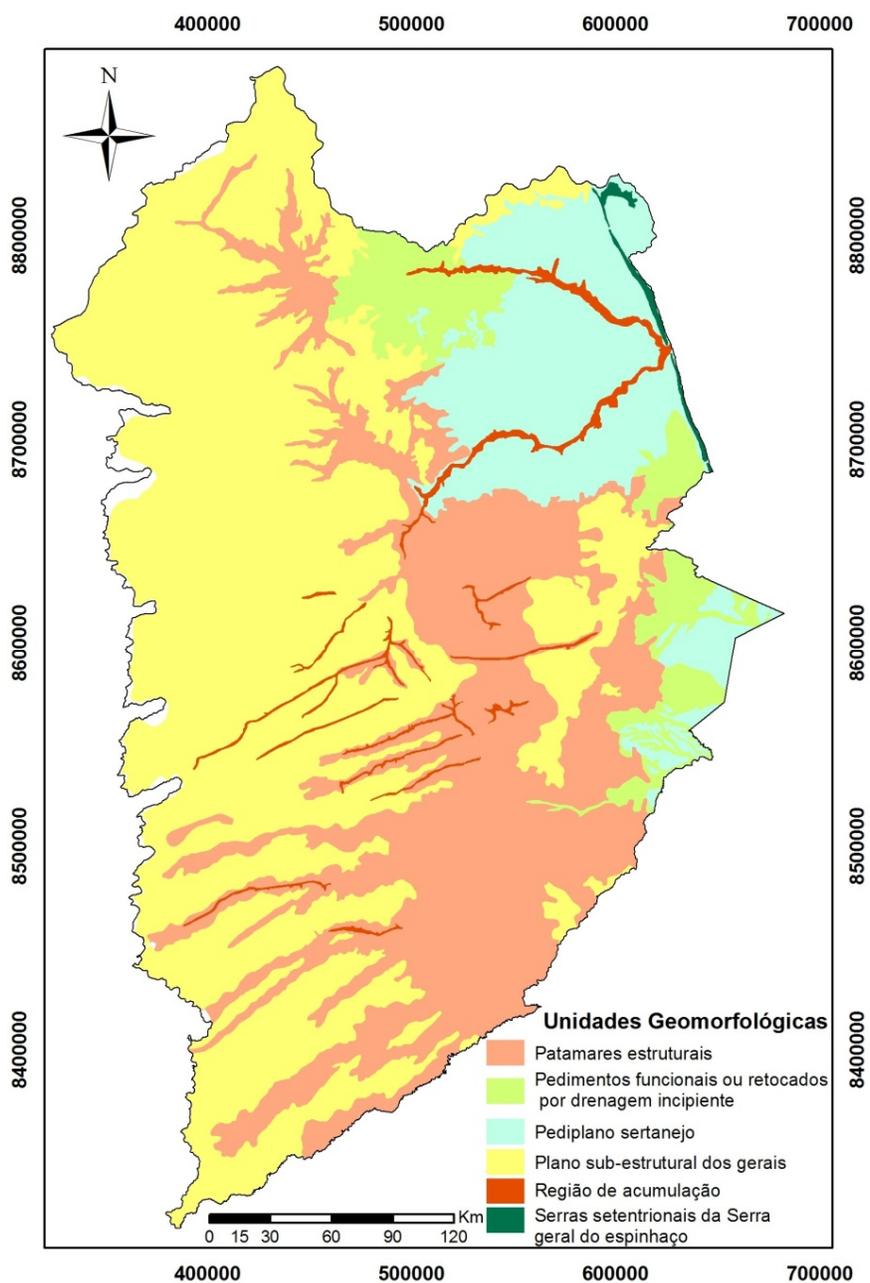


Figura 2.6 - Mapa geomorfológico do Oeste da Bahia. Fonte: BRASIL (1982).

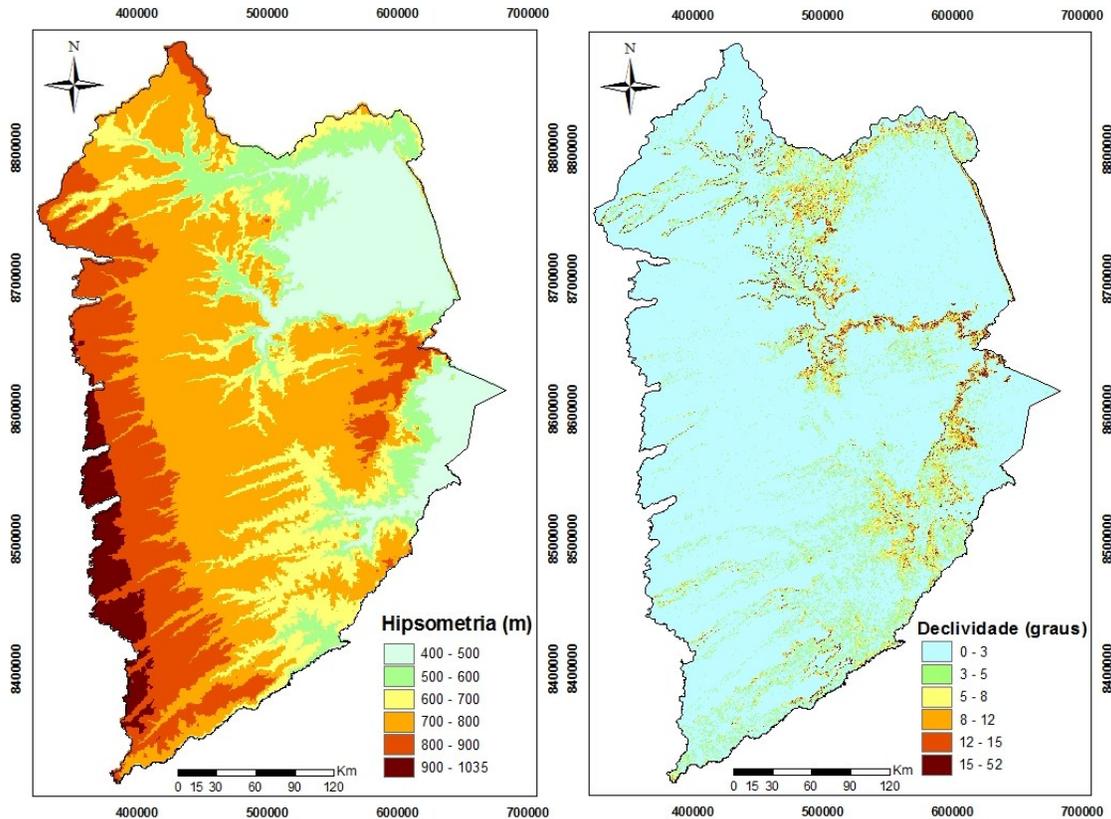


Figura 2.7 - Mapa hipsométrico (a) e mapa de declividade (b) do Oeste da Bahia.

A caracterização mais detalhada das macrounidades geomorfológicas da área de estudo foi realizada pelo projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1982): a) Plano sub-estrutural dos gerais, descrita por relevo aplanado, sustentados por arenitos cretáceos da Formação Urucuia, do Grupo São Francisco, capeados por materiais detríticos e solos lateríticos e também por patamares marginais em sedimentos calcíferos do Grupo Bambuí; b) Patamares estruturais, descritos por colinas, forma de meia laranja, monoclinal, meseta, feições convexas ou tabulares separadas por vales chatos ou agudos, formando uma drenagem dendrítica; c) Pedimentos funcionais ou retocados por drenagem incipiente, caracterizados pelas depressões Periféricas e Interplanálticas; d) Pediplano sertanejo, também formado pelas depressões Periféricas e Interplanálticas; e) Região de acumulação, descrita pelas planícies resultantes das ações fluviais, contendo aluviões, sujeitas a inundações, às vezes contendo terraços; e f) Serras setentrionais da Serra Geral do Espinhaço, caracterizadas por blocos rochosos, topos planos avaulados ou irregulares, apresentando feições estruturais nítidas.

Do ponto de vista topográfico (Figura 2.7a), a área de estudo possui altimetria variando entre 400 e 1000 m, tendo na maior parte da área uma elevação em torno de 700 m, fato entendido pela presença dos chapadões, predominantemente na borda ocidental da

região Oeste da Bahia. Comparativamente, a declividade (Figura 2.7b) é baixa, pois predomina as áreas planas de até 3 graus. As áreas com declividade relativamente acentuada encontram-se nas encostas do Chapadão, isto é, no contato entre esta unidade e as depressões e algumas serras existentes na área de estudo.

2.3 - Clima

Na região Oeste da Bahia, o clima é caracterizado por duas estações bem definidas: uma chuvosa, com duração mais curta, compreendida basicamente entre os meses de novembro e março, e outra seca e mais longa, entre os meses de abril e outubro. De acordo com a classificação climática de Köppen, o Oeste da Bahia compreende o tipo Aw, com inverno seco e chuvas torrenciais no verão (KÖPPEN, 1948). A Figura 2.8 apresenta o balanço hídrico climatológico e o climograma do município de Barreiras como representativos da área de estudo, permitindo observar os períodos de excedente e reposição durante a estação chuvosa e déficit e retirada na estação seca. Características estas que vão influenciar diretamente no comportamento fenológicos das diversas fitofisionomias existentes na área de estudo. As temperaturas são mais elevadas durante o período chuvoso e no período seco têm-se temperaturas amenas. Do ponto de vista ecológico, a estação seca é a mais importante, pois esta ocasiona uma deficiência hídrica que define um limite de tolerância para as espécies vegetais (SILVA et al., 2008).

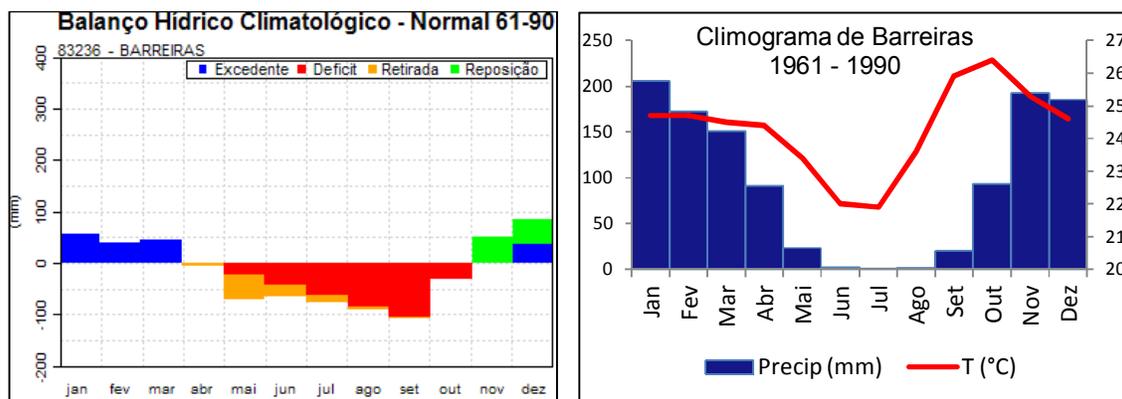


Figura 2.8 - Balanço hídrico do município de Barreiras (a); Climograma do município de Barreiras (b). Fonte: INMET, 2010.

2.4 - Solos

Para Ribeiro e Walter (2008), enquanto no Semiárido a ocorrência dos tipos de vegetação está associada aos fatores climáticos, independentemente das características

dos solos, no bioma Cerrado a flora está mais associada aos fatores edáficos, e não diretamente relacionada à presença de água.

Como se observa no mapa de solos da área de estudo (Figura 2.9), o tipo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo, caracterizado como um solo profundo e bem desenvolvido, ácido e de baixa fertilidade. Os Neossolos Litólicos, Quartzarênicos e Flúvicos também são encontrados na área de estudo, sendo solos rasos e pouco intemperizados. O primeiro encontra-se basicamente na Serra do Boqueirão e normalmente está associado às declividades mais acentuadas. Os Neossolos Quartzarênicos situam-se nas áreas relativamente mais planas, mas também nas encostas das serras e chapadões. Os Neossolos Flúvicos são aqueles relacionados aos canais de drenagem, intrinsecamente associados à dinâmica fluvial. Em menor proporção, também são encontrados os solos dos tipos Cambissolo, Argissolo e Vertisol. É relevante ressaltar que o mapeamento de solos foi elaborado pelo projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1982), na escala de 1:1.000.000 e por isso a caracterização não pode ser detalhada, em função da escala pequena do mapa.

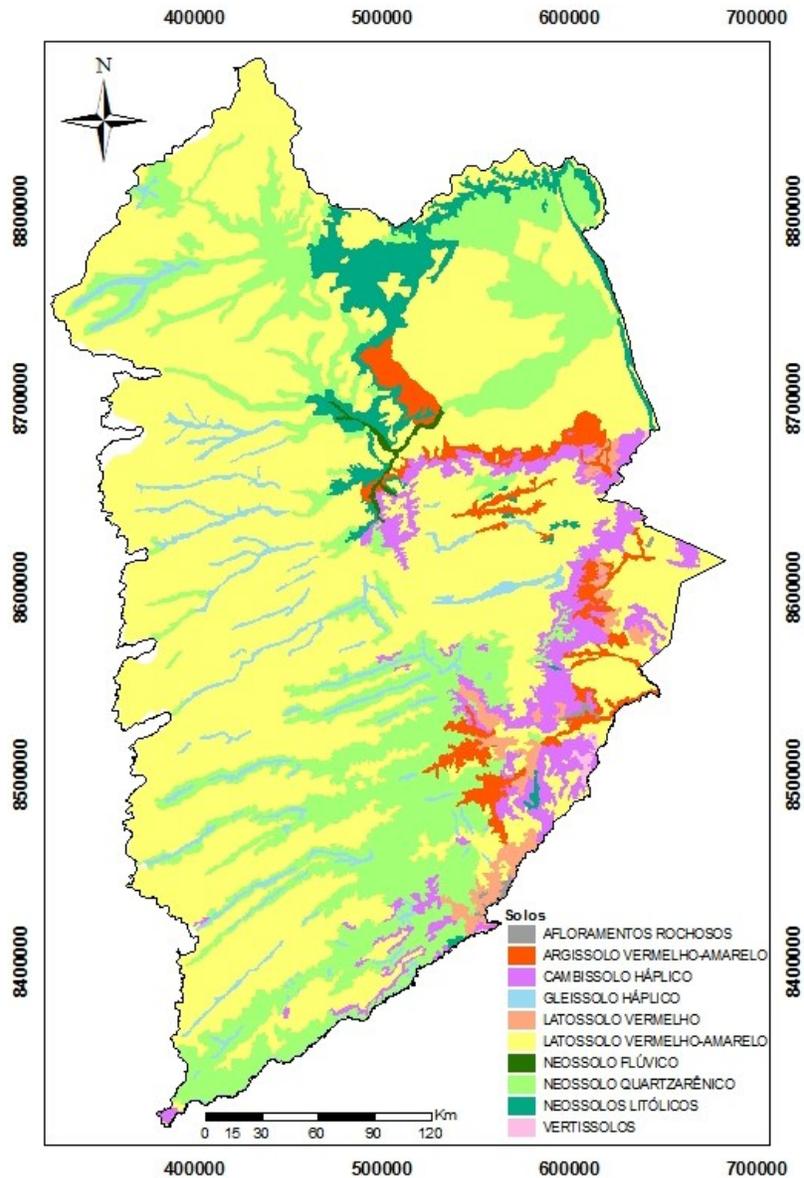


Figura 2.9 - Mapa de solos do Oeste da Bahia, escala de 1:1.000.000. Fonte: BRASIL (1982).

2.5 - Hidrografia

O bioma Cerrado é considerado o “pai das águas” (LIMA, 2011) ou também chamado de “berço das águas” (ARRUDA, 2003), estando o Oeste da Bahia inserido neste contexto. Esta região possui grande densidade hídrica, tendo a maior parte das cidades assentadas às margens de rios, conforme se observa na Figura 2.10, como é o caso Barreiras, São Desidério, Santa Rita de Cássia, entre outras.

O bioma Cerrado contribui com a grande maioria das bacias hidrográficas do Brasil, principalmente pela centralidade (boa parte deste bioma está mais à montante das bacias), altitude e substrato rochoso, permitindo a infiltração nos lençóis freáticos.

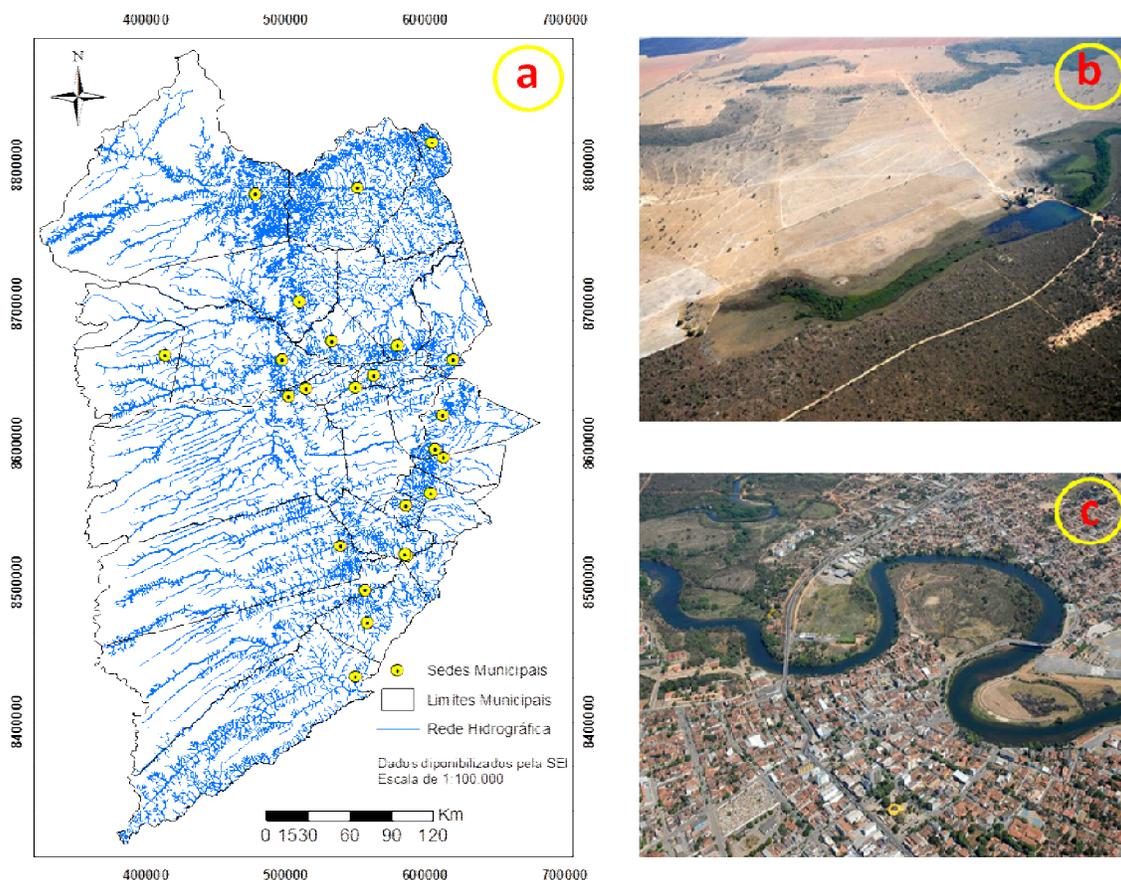


Figura 2.10 - Mapa da rede hidrográfica no Oeste da Bahia (a), ilustração com vista aérea da nascente do rio Grande (esq.) com presença de uma barragem (dir.) (b), e da cidade de Barreiras, assentada às margens do rio Grande (c). Fonte: SRH (2003). Fotos: Projeto Brasil das Águas.

No Oeste da Bahia, a grande quantidade de água disponível está relacionada ao aquífero Urucua que abastece toda região. Por isso, os rios da região não perdem muito a vazão, mesmo durante o longo período de estiagem. Apesar disso, é importante considerar que muitos rios da região encontram-se em estágios de degradação avançados, devido à retirada da mata ciliar para a abertura de novas áreas para culturas agrícolas, construções de barragens, uso intensivo para irrigação e assoreamento das margens.

Outro problema observado é o lançamento de esgoto *in natura* no leito dos rios, já que grande parte das malhas urbanas desta região não possui rede de esgotos. Esta é a realidade da cidade de Barreiras, por exemplo, que se constitui no maior núcleo urbano do Oeste da Bahia (Figura 2.10).

2.6 - Cobertura Vegetal

O bioma Cerrado é composto por diversos tipos fitofisionômicos, os quais compreendem formações florestais, savânicas e campestres. O sentido fitofisionômico adotado nesta pesquisa será o mesmo denominado por Ribeiro e Walter (2008), cujo termo florestal representa áreas com predominância de espécies arbóreas, com formação de dossel contínuo ou descontínuo. A formação savânica equivale às áreas com árvores e arbustos dispersos sobre o estrato gramíneo e sem a formação de dossel contínuo. A denominação campestre, por sua vez, é definida como as áreas onde predominam as espécies herbáceas e arbustivas, com ausência de árvores.

O Cerrado é resultante de um conjunto de fatores (EITEN, 1993; FERNANDES, 2006; RIBEIRO e WALTER, 2008), dentre estes o clima e o solo, este último relacionado às propriedades físico-químicas, à disponibilidade de água, à geomorfologia e à topografia. A distribuição da flora também está associada à latitude, frequência de queimadas, profundidade de lençol freático e aos fatores antrópicos, tais como expansão da fronteira agrícola, retirada seletiva de madeira, queimadas para manejo de pastagem, entre outros.

Segundo Ribeiro e Walter (2008), o termo Cerrado está associado a três acepções distintas: uma refere-se ao bioma predominante no Brasil Central, outra está associada aos diferentes tipos de vegetação do bioma, portanto, o Cerrado *lato sensu* inclui diferentes formações e tipos de vegetação do bioma. Por fim, a terceira acepção do termo é usada para o Cerrado sentido restrito, atrelada aos tipos fitofisionômicos que são encontrados na formação savânica, definidos tanto pela composição da flora quanto pela fisionomia. A Figura 2.11 localiza o bioma Cerrado no Brasil, com destaque para o Oeste da Bahia.

O sistema de classificação proposto por Ribeiro e Walter (2008), permite maior diversidade de classes e, como parte considerável da área de estudo já teve a sua vegetação nativa suprimida, não se encontra a mesma diversidade florística de outrora.

De acordo com o sistema de classificação desenvolvido por Veloso (IBGE, 1991), e abrangente para todos os biomas brasileiros, grande parte da área de estudo seria identificada como Savana arbórea (Sa). Desta forma, optou pelo primeiro sistema de classificação (Ribeiro e Walter, 2008), que proporciona discriminar um número maior de classes, conferindo maior heterogeneidade e especificidade à área de estudo. Na Figura 2.12 é mostrado o mapa de cobertura vegetal natural e antrópica, confeccionado pelo PROBIO (Projeto de Conservação da Biodiversidade Brasileira).

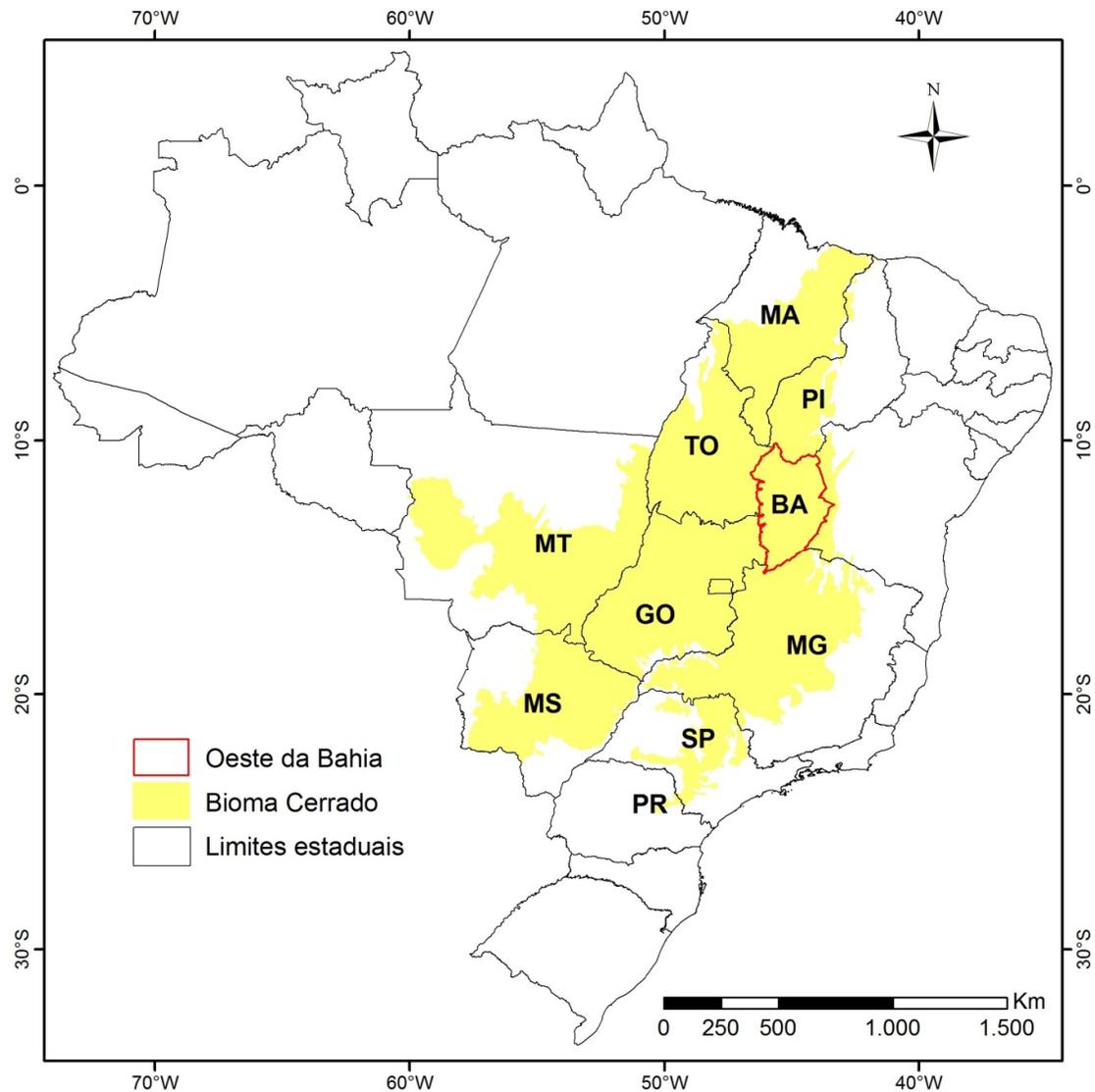


Figura 2.11 - Localização do bioma Cerrado no Brasil, com destaque para a região Oeste da Bahia.

Conforme se pode observar na Figura 2.12, o mapeamento do PROBIO (escala de 1:250.000) utiliza o sistema de classificação proposto pelo IBGE (1991), a despeito de ter-se afirmado que o sistema de classificação adotado na pesquisa foi o sugerido por Ribeiro e Walter (2008). Desta forma, a utilização do mapa de vegetação e uso do solo conforme o primeiro sistema de classificação abordado (IBGE, 1991) deve-se à inexistência deste tipo de mapa mais atual e conforme o segundo sistema.

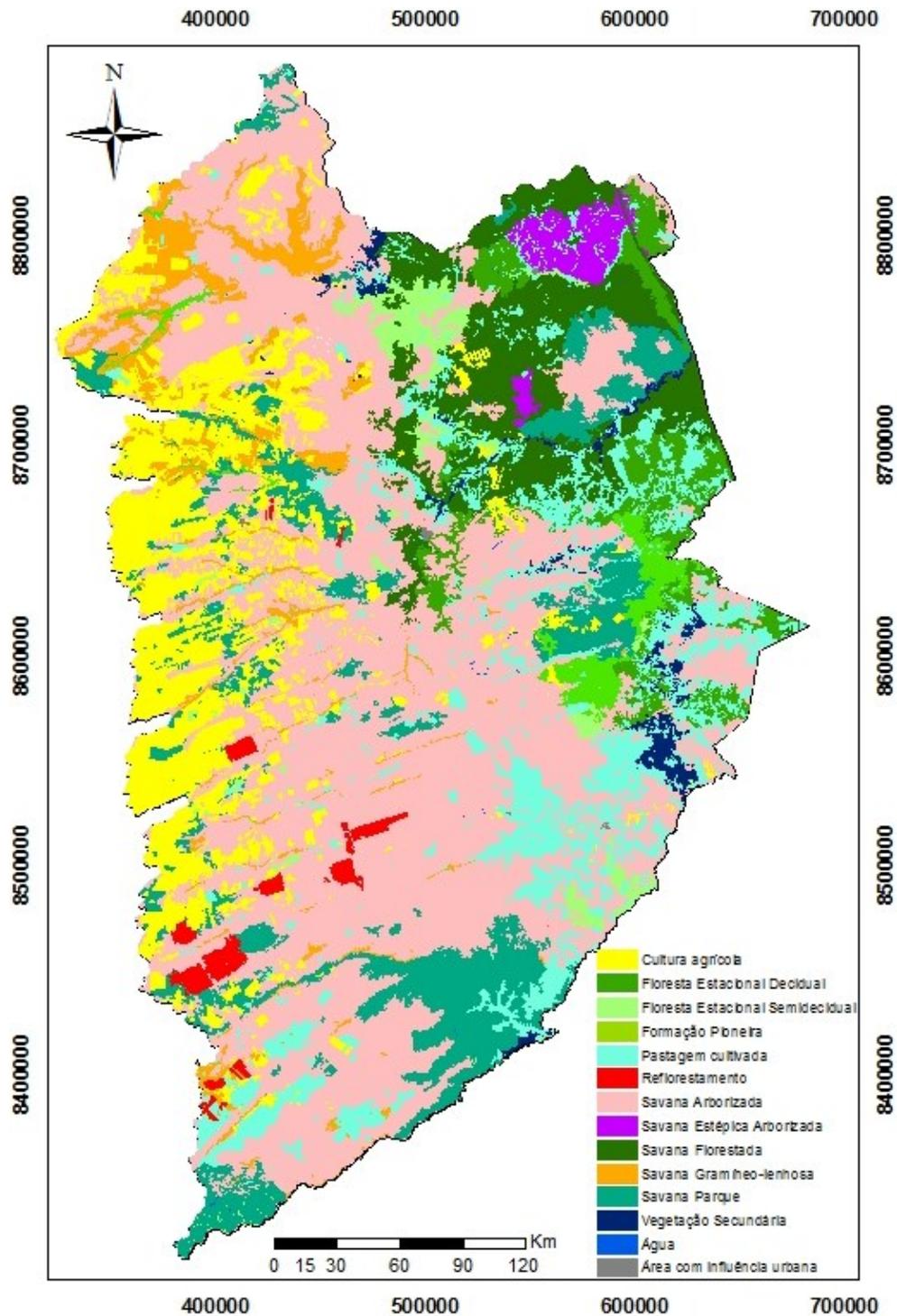


Figura 2.12 - Mapa de cobertura vegetal e uso do solo do Oeste da Bahia. Fonte: PROBIO (2005).

A escala de mapeamento do PROBIO (1:250.000) não permite identificar todas as fitofisionomias e, além disso, este produto já se encontra desatualizado devido à intensa atividade de fragmentação existente na área de estudo. Esta informação pode ser corroborada a partir da comparação dos dados de desmatamento para os anos de 2009 e

2010 do Oeste da Bahia (Figura 2.13). Este mapeamento faz parte do programa de monitoramento do Cerrado brasileiro que a cada ano tem apresentado taxas de supressão da vegetação nativa, cada vez mais alarmantes.

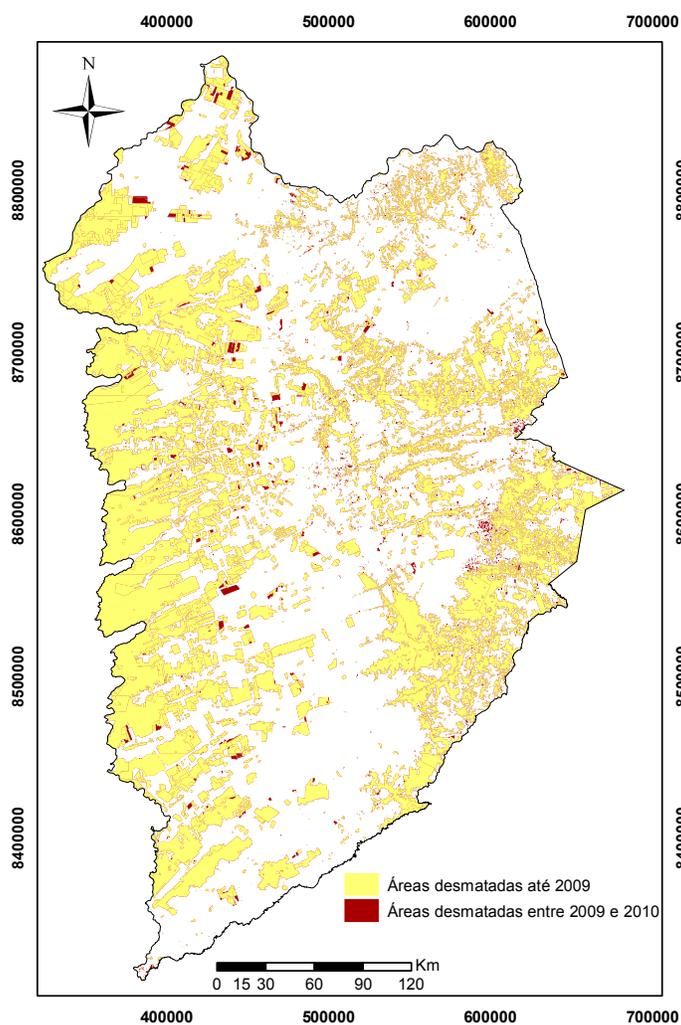


Figura 2.13 - Mapa de desmatamento entre os anos de 2009 a 2010 no Oeste da Bahia. Fonte: BRASIL (2011a).

Diante do estágio atual de degradação e da ameaça iminente à biodiversidade no Oeste da Bahia, faz-se importante as tentativas de preservação. Na Figura 2.14 é possível identificar as unidades de conservação, tanto de uso sustentável quanto de proteção integral, e as áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade e corredores ecológicos.

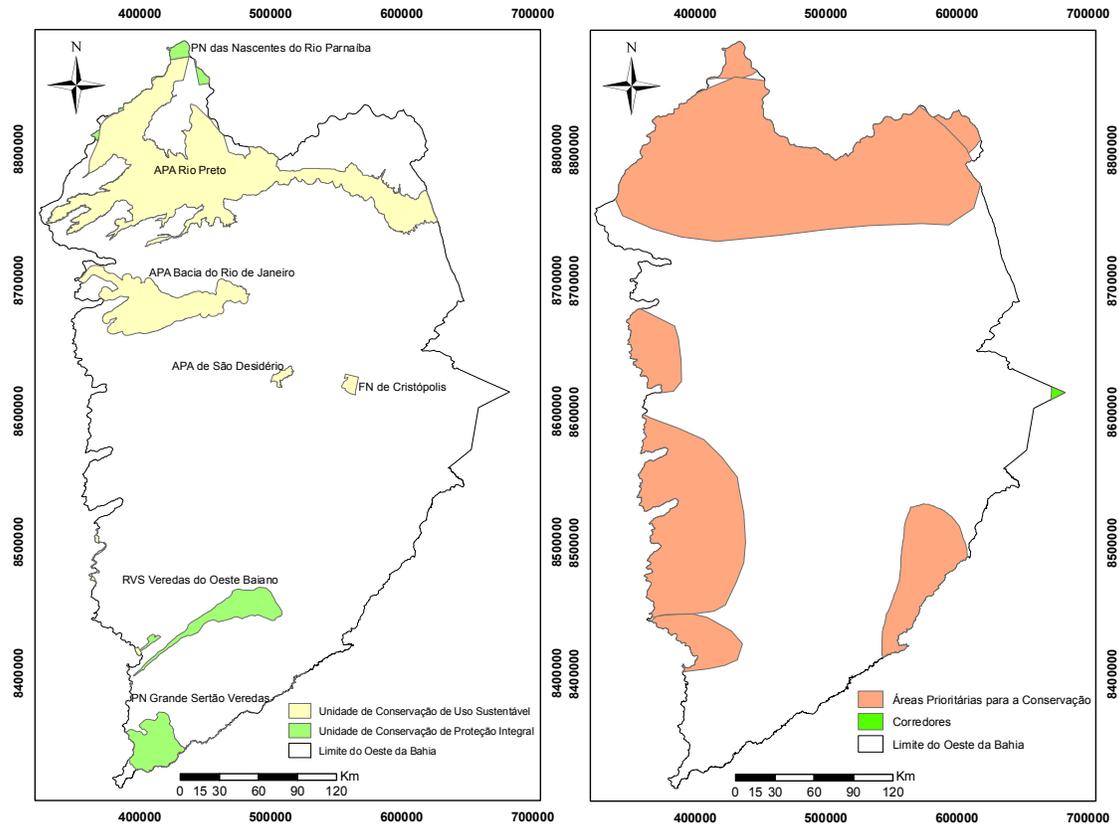


Figura 2.14 - Mapas de unidades de conservação de proteção integral e de uso sustentável no Oeste da Bahia (a) e de áreas prioritárias para conservação e de corredores ecológicos (b) no Oeste da Bahia. Fonte: Ministério do Meio Ambiente.

O município de Formosa do Rio Preto no Oeste da Bahia está inserido, como um todo, na área para o desenvolvimento do projeto Corredor Ecológico da Região do Jalapão. A APA de Formosa do Rio Preto ocupa grande parte deste município e, por esta razão, o mesmo foi contido no projeto (BRASIL, 2011b). Quanto à APA do Rio de Janeiro (ALMEIDA, 2010), na bacia hidrográfica onde a unidade de conservação está inserida, demonstra que, no ano de 1984, esta bacia encontrava-se praticamente ocupada pela vegetação natural do Cerrado (88,2%), enquanto que em 2009 apenas 54,42% correspondia ao Cerrado, expandindo-se as áreas para culturas agrícolas de soja e algodão, principalmente.

Segundo Arruda (2003), o monitoramento para proteção do bioma Cerrado é de grande relevância, devido as suas interligações com outros ecossistemas, bem como a sua biodiversidade (flora e fauna endêmicas).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Cotia, SP: Ateliê, 2003. 159 p.
- ALMEIDA, R. S. **Mudanças no uso e cobertura do solo na Bacia do Rio de Ondas no período de 1984 a 2009**. Barreiras, 2010. 86 p.
- ARRUDA, M. B. **Representatividade ecológica com base na biogeografia de biomas e ecorregiões continentais do Brasil: O caso do bioma Cerrado**. Tese (Doutorado). Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília. 2003. 176 p.
- BRANNSTROM, C.; JEPSON, W.; FILIPPI, A. M.; REDO, D.; XU, Z.; GANESH, S. Land change in the Brazilian savanna (Cerrado), 1986-2002: comparative analysis and implications for land-use policy. **Land Use Policy**, v. 25, p. 579-595, 2008.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD. 23 Brasília; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 660p., 5 mapas (Levantamento de Recursos Naturais, 29), 1982.
- BRASIL. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia: Sistema de Informações Geográficas – SIG e Mapas**, 2003. CD-ROM.
- BRASIL. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite: Monitoramento do bioma Cerrado 2008-2009**. Brasília, Acordo de Cooperação Técnica MMA/IBAMA, 2011a.
- BRASIL. **Atlas do Corredor Ecológico da Região do Jalapão**, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2011b.
- EITEN, G. Vegetação do Cerrado. In: PINTO, M. N. (org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectiva**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília: Edunb: SEMATEC, 1993. 681 p.
- FELFILI, J. M.; SILVA Jr., M. C.; DIAS, B. J.; REZENDE, A. V. Estudo fenológico de *Stryphnodendron adstringens*(Mart.) Coville no Cerrado sensu stricto da Fazenda Água Limpa no Distrito Federal, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 22, n. 1, p. 83-90, 1999.
- FERNANDES, A. **Fitogeografia Brasileira: províncias florísticas**. Fortaleza: Realce, 2006. 202 p.
- IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Manuais Técnicos de Geociências, N.1. Rio de Janeiro, 1991, 92 p.
- INMET. Climograma. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/agro>>. Acesso: 05 de novembro de 2010.
- KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 479 p.
- LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do Cerrado. In: **Ciência e Cultura** [online], v. 63, n.3, p. 27-29, 2011.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Dados georreferenciados**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs/dados-georreferenciados>> Acesso: 6 de junho de 2012.

MONDARDO, M. L. Da dinâmica migratória sulista a expansão do agronegócio: Novas Territorializações no Oeste Baiano. In: MONDARDO, M. L. (Org.). **Espaços Agrários e Meio Ambiente: Bahia, Bahias**. Ponto da Cultura: Rio de Janeiro, 2011.

PROBIO. Projeto de Conservação da Biodiversidade Brasileira, 2005. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=14>> Acesso: 5 de junho de 2012.

Projeto Brasil das águas. Disponível em <<http://www.brasildasaguas.com.br>> Acesso: 6 de junho de 2012.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. Embrapa Cerrados: Planaltina, v. 1, Cap. 6, p. 151-199, 2008.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO J. L.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n.1, p. 153-156, 2008.

SANO, E. E.; PINHATI, F. S. C. Espaço rural do oeste baiano: identificação de áreas agrícolas sob sistema de plantio direto por meio de dados obtidos por câmera digital e satélite CBERS-2 CCD. **Geografia**, v. 34, n. 1, p. 117-129, 2009.

SILVA, F. A. M.; ASSAD, E.D.; EVANGELISTA, B. A. As principais fitofisionomias do Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.), **Cerrado. Ecologia e Flora**. Planaltina, Embrapa Cerrados, v. 1, Cap. 3, p. 69-88, 2008.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.

SRH - Superintendência de Recursos Hídricos. **SIG Bahia**, 2003. CD-ROM.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - O conceito de Cerrado

No Cerrado, houve uma combinação de fatores climáticos, topográficos, hidrológicos e pedológicos que propiciou condições mesológicas favoráveis ao desenvolvimento de um mosaico, no qual dominam aspectos vegetativos bem marcantes e estreitamente relacionados, subordinados a um intenso processo de escleromorfismo, presente em suas formações florísticas bem caracterizadas (FERNANDES, 2006). O conceito de Cerrado, segundo Ribeiro e Walter (2008), tem sido utilizado para designar tanto tipos de vegetação, quanto para definir formas de vegetação. Estes autores, com base em Eiten (1979), explicam que o tipo de vegetação é algo mais complexo, compreende a fisionomia, a flora e o ambiente; por forma de vegetação, compreende apenas a fisionomia. Nesta pesquisa, será definido o conceito de Cerrado enquanto tipos de vegetação, pois se considera também as variáveis da paisagem, nas quais as fitofisionomias estão inseridas.

Para Ribeiro e Walter (2008), os principais tipos fitofisionômicos do Cerrado são: formações florestais, que compreendem os tipos Mata ciliar, Mata de galeria, Mata seca e Cerradão; formações savânicas, que englobam Cerrado sentido restrito, Parque de cerrado, Palmeiral e Vereda; formações campestres, que se subdividem em Campo sujo, Campo limpo e Campo rupestre. Tal classificação teve como critérios a fisionomia (a forma), definida pela estrutura, formas de crescimento predominante e fatores estacionais. Também são considerados, em segunda ordem, os fatores edáficos e a composição florística. A escolha por este sistema de classificação decorreu-se em função deste permitir a identificação de um maior número de tipos de vegetação, em detrimento dos demais, que para a área de estudo predominaria menor diversidade de classes.

De acordo com Ribeiro e Walter (2008), o Cerrado sentido restrito é constituído pelos estratos arbóreo e arbustivo-herbáceo, com distribuição aleatória de árvores, cuja densidade configura-se de forma diferenciada, não possibilitando, desta maneira, a constituição de dossel contínuo. Conforme tais características, associadas principalmente à densidade e à estrutura arbóreo-arbustiva, o Cerrado sentido restrito pode ser subdividido em quatro tipos: Cerrado denso, Cerrado típico, Cerrado ralo e Cerrado rupestre. Características como árvores baixas, inclinadas, tortuosas com ramificações irregulares e retorcidas, geralmente com evidências de queimadas, são inerentes ao Cerrado sentido restrito. A rebrota de algumas espécies, após o fogo ou o corte, é possível porque elas têm uma parte

subterrânea denominada de xilopódios, uma espécie de batata, sendo um processo relativamente rápido a partir das primeiras chuvas, o que torna a vegetação em pouco tempo exuberante e verde (RIBEIRO e WALTER, 2008).

Devido às características de adaptação ao fogo, as plantas lenhosas possuem cascas grosseiras, como cortiça espessa, entremeada por sulcos ou fendas. As folhas são coriáceas e rígidas, características estas associadas ao período de estresse hídrico causado às plantas em função dos efeitos da sazonalidade, bastante marcantes no Cerrado, principalmente no Oeste da Bahia em que o período de seca é mais prolongado em relação ao do centro Oeste do Brasil. As plantas arbóreas, por sua vez, são mais adaptadas ao período de estiagem, devido às suas características, como raízes profundas.

De acordo com a literatura, o Cerrado restrito está assentado no Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo, este último predominante na área de estudo. Todavia, pode ser encontrado em menor proporção em Cambissolos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Litólicos, Plintossolos Pétricos e até mesmo em Gleissolos.

Inúmeros fatores influenciam a diversidade de densidade arbórea do Cerrado sentido restrito (RIBEIRO e WALTER, 2008), tais como características edáficas, acidez, fertilidade, condições hídricas e profundidade do solo. Estes condicionantes são potencializados mediante a recorrência de queimadas e intensa ação antrópica existentes nas áreas onde ocorrem estas fisionomias vegetais. Obviamente, as consequências destas ações, juntamente com estes fatores naturais, vão interferir na estrutura e densidade da vegetação.

Ao comparar a anisotropia observada entre as superfícies vegetadas, Moraes et al. (2011) verificaram que a floresta apresenta menor variação do que o Cerrado sentido restrito, o que justificam pelo fato de maior uniformidade de rugosidade observada em uma floresta primária, em detrimento do Cerrado sentido restrito, que apresenta indivíduos de porte herbáceo, arbustivo e arbóreo, portanto dossel descontínuo.

Estudos conduzidos, por exemplo, por Carvalho (2005), demonstraram que o Cerrado sentido restrito possui grande variação do dossel, desde o estrato herbáceo ao porte arbóreo-arbustivo, conforme explicitado anteriormente. Esta tipologia apresenta fitofisionomias muito distintas, não apenas no que tange ao porte, mas à disposição, organização e arranjo dos indivíduos na comunidade, bem como na altura (estrutura vertical) e densidade (estrutura horizontal) de seus indivíduos.

Em virtude da complexidade dos fatores condicionantes é que o Cerrado sentido restrito origina as subdivisões fisionômicas (RIBEIRO e WALTER, 2008). O Cerrado denso, o Cerrado típico e o Cerrado ralo refletem variações na forma de agrupamentos e espaçamento entre os indivíduos lenhosos, seguindo um gradiente decrescente na ordem citada em termos de densidade. O Cerrado rupestre, por sua vez, apresenta como principal diferença entre os demais o substrato, pois ocorre tipicamente em solos rasos, normalmente

associados a afloramentos rochosos, e por isso apresenta espécies adaptadas a este ambiente, o que ajuda a diferenciá-lo dos demais. O Quadro 3.1 associa os subtipos de Cerrado sentido restrito às características de densidade, altura e solos.

Quadro 3.1 - Caracterização dos subtipos de Cerrado sentido restrito.

SUBTIPOS	DENSIDADE (%)	ALTURA (m)	SOLOS
Cerrado denso	50 a 70	5 a 8	Latossolos Vermelho Latossolos Vermelho-Amarelo Cambissolos
Cerrado típico	20 a 50	3 a 6	Latossolos Vermelho Latossolos Vermelho-Amarelo Cambissolos Neossolos Quartzarênicos Neossolos Litólicos Plintossolos Pétricos
Cerrado ralo	5 a 20	2 a 3	Latossolos Vermelho-Amarelo Cambissolos Neossolos Quartzarênicos Neossolos Litólicos Plintossolos Pétricos Gleissolos
Cerrado rupestre	5 a 20	2 a 4	Neossolos Litólicos

3.2 - Sensoriamento remoto para o estudo da vegetação

A cobertura vegetal pode ser uma das variáveis da paisagem considerada mais dinâmica, haja vista que esta é bastante vulnerável à ação dos fenômenos climáticos, ao fogo e à ação antrópica, de modo geral. Sendo assim, para o estudo e monitoramento da vegetação, faz-se necessário a utilização das Geotecnologias, como o sistema de informações geográficas, o geoprocessamento e o sensoriamento remoto. Os produtos derivados deste último, como as imagens de satélites, nas mais variadas resoluções (espacial, temporal, espectral e radiométrica) são importantes para o desenvolvimento de pesquisas referentes à vegetação. Por isso, o sensoriamento remoto tem sido utilizado no contexto nacional e internacional para estudos relacionados a esta temática, tornando-se condição *sine qua non* quando se trata, por exemplo, de mapeamento da cobertura vegetal.

O entendimento do processo de interação da energia eletromagnética com os alvos é de fundamental relevância para a proposição de novos sensores e com melhores configurações para a aquisição de novos dados (HUETE et al., 2002; JENSEN, 2009). Desta forma, o uso do sensoriamento remoto tem sido de singular relevância para a discriminação, caracterização e mapeamento da vegetação nas mais diferentes escalas cartográficas e

geográficas. Tais estudos têm dado suporte, por exemplo, ao monitoramento da supressão da vegetação nativa nos importantes biomas brasileiros, como o Cerrado, Caatinga, Amazônia e Mata Atlântica.

Desde o início do sensoriamento remoto, este tem sido diretamente aplicado aos estudos de vegetação. Um grande marco foi durante a Segunda Guerra Mundial, quando a criação do filme infravermelho permitiu discriminar camuflagens de cobertura vegetal, possibilitando a descoberta de esconderijos e armadilhas de tropas inimigas. Este foi um dos pressupostos básicos do avanço da pesquisa, que mais tarde proporcionou melhor compreensão de que todos os alvos na natureza emitem uma resposta espectral própria, conforme a interação da energia eletromagnética com a sua composição físico-química (NOVO, 2008; JENSEN, 2009).

Na atualidade não é diferente, grande parte dos estudos referente à vegetação está associada à utilização de dados e informações advindos do sensoriamento remoto. Talvez esta relação intrínseca do sensoriamento remoto com a vegetação deva-se ao fato da radiação eletromagnética interagir apenas cerca de 50 μm na superfície (JENSEN, 2009). Como a vegetação consiste no alvo natural associado imediatamente à superfície terrestre, as aplicações com dados e informações derivados do sensoriamento remoto à cobertura vegetal tornou-se potencialmente elevada.

A vegetação sadia, isto é, fotossinteticamente ativa, apresenta de modo geral baixa reflectância na faixa do visível e reflete significativamente no infravermelho próximo. Especificamente, a vegetação apresenta, nos comprimentos de ondas do visível, absorção nas bandas do azul e do vermelho, em função da presença da clorofila. Por esta mesma razão, a vegetação sadia emite um pico de reflectância no comprimento de onda corresponde á faixa do verde. Assim, pode-se afirmar que o comportamento espectral da vegetação na faixa do visível está diretamente associado à presença de pigmentos fotossinteticamente ativos como a clorofila e os carotenos (NOVO, 2008; JENSEN, 2009). No infravermelho próximo (NIR), a vegetação reflete bastante, devido à sua estrutura celular, cuja necessidade de refletir é muito alta em função da absorção ocorrida na faixa anterior (visível) do espectro eletromagnético. No infravermelho de ondas curtas (SWIR), a vegetação, devido à presença de água em sua estrutura, registra duas feições de absorção bastante expressivas, as quais ocorrem nos comprimentos de ondas de 1,4 e 1,9 μm (PONZONI, 2001; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009; JENSEN, 2009;). O comportamento espectral da vegetação nas faixas do visível do NIR do espectro eletromagnético é claramente observado na Figura 3.1.

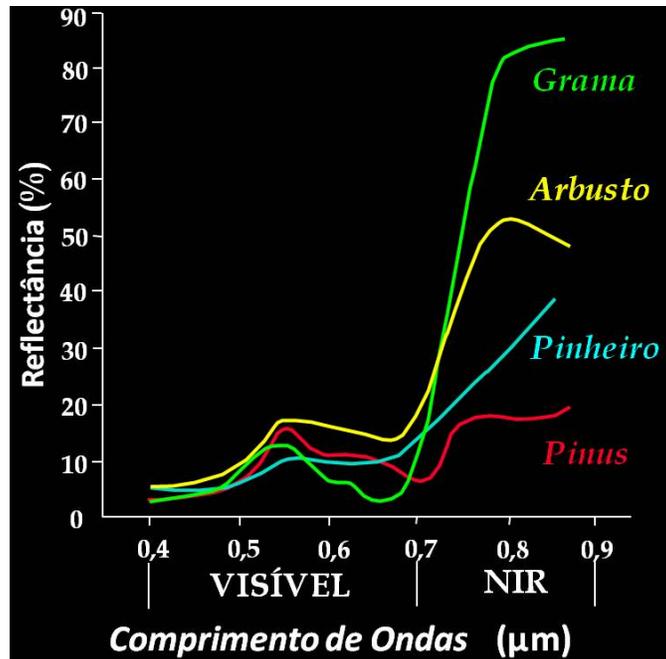


Figura 3.1 - Comportamento espectral de diferentes espécies vegetais nas faixas do visível e do infravermelho próximo (NIR).

Autores como SAKAMOTO et al. (2005) e ARAÚJO FILHO et al. (2007) afirmaram que o acervo de dados de sensoriamento remoto, principalmente as imagens de satélites nas mais diferentes resoluções espectrais, temporais e espaciais, têm dado importantes subsídios para o estudo da vegetação. Técnicas de espectrorradiometria de imageamento, por exemplo, foram utilizadas para indicar áreas degradadas que deveriam ser recuperadas. Estas permitiram discriminar o grau de regeneração da vegetação existente na área de estudo (BAPTISTA e LEITE, 1997).

Apesar dos avanços no estudo da vegetação, principalmente por meio de imagens de satélites, as pesquisas no Cerrado ainda precisam avançar, diante da rica diversidade desse bioma. Todavia, quando se trata da importante parcela de cerrado ainda existente no Oeste da Bahia, tais estudos são analogamente mais escassos.

Sendo o uso do sensoriamento importante para o estudo da vegetação, torna-se imprescindível discutir determinados processos a ele relacionados, como a aquisição, o processamento e análise dos produtos resultantes. Apesar da grande maioria das técnicas de processamento digital de imagens considerar os alvos naturais como isotrópicos, isto é, com comportamento lambertiano, cuja refletância dá-se uniformemente em todas as direções, na natureza os alvos são anisotrópicos (MIESCH et al., 2002; NOVO, 2008; CUI et al., 2009). A radiância solar espectral originada de um alvo natural está diretamente relacionada com os ângulos zenitais e azimutais de iluminação e observação e dependem das características físicas, químicas e biológicas do alvo (MORAES et al., 2011).

Por isso, a importância de se considerar este diferencial quando se trata da análise de dados de satélites. Os índices de vegetação são exemplos de processamentos, cujos dados que normalmente se originam dos alvos são considerados isotrópicos.

3.3 - Índices de vegetação

Conforme discriminado o comportamento espectral da vegetação, a tentativa de pesquisadores foi a de desenvolver razões entre bandas capazes de demonstrar as características de reflectância e absorção da vegetação no espectro eletromagnético, o que permitiria a caracterização e, conseqüentemente, a discriminação de distintas fitofisionomias. Tais razões entre bandas foram posteriormente denominadas de índices de vegetação.

A Razão Simples (*Simple Ratio*) foi o primeiro índice de vegetação (COHEN, 1991), cujo raciocínio para sua implementação consistiu na razão entre o fluxo radiante refletido no infravermelho próximo (ρ_{NIR}) e o fluxo radiante refletido no vermelho (ρ_{RED}), como descrito por Birth e McVey (1968), posto que a vegetação apresenta baixa reflectância no comprimento de onda do vermelho e elevada reflectância no infravermelho próximo (Eq. 3.1).

$$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \quad (3.1)$$

onde: SR = Razão Simples; ρ_{NIR} = fluxo radiante refletido no infravermelho próximo; e ρ_{RED} = fluxo radiante refletido no vermelho.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi proposto por Rouse et al. (1973), descrito pela Eq. 3.2, o qual foi implementado de forma relativamente mais complexa. Este, de acordo com Jensen (2009), apresentou maior capacidade de discriminar mudanças sazonais e interanuais na vegetação, assim como a redução dos ruídos multiplicativos provocados pelas diferenças de iluminação solar e sombras de nuvens, atenuações atmosféricas e variações topográficas. Desta forma, pode-se afirmar que o NDVI satura mediante aos altos valores de índice área foliar e também é sensível à mudança de dossel.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (3.2)$$

onde: $NDVI$ = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; ρ_{NIR} = fluxo radiante refletido no infravermelho próximo; e ρ_{RED} = fluxo radiante refletido no vermelho.

O NDVI é um dos índices mais utilizados no mundo, pois apresenta boa correlação entre os valores identificados e a biomassa fotossinteticamente ativa. O desenvolvimento de índices de vegetação está atrelado à cobertura de satélite em determinadas faixas espectrais. Quando se trata de satélites multiespectrais, estes consistem em registrar informações em faixas específicas do espectro eletromagnético. Neste caso, o índice poderá ser implementado se houver as bandas nos comprimentos de ondas necessários. Desta forma, alguns índices de vegetação estão associados a determinados sensores ou foram desenvolvidos para sensores específicos. Este é o caso, por exemplo, do EVI (*Enhanced Vegetation Index*) que em português corresponde ao Índice de Vegetação Realçado (Eq. 3.3), desenvolvido para ser aplicado aos dados do MODIS, acoplado à plataforma Terra, mas também aos dados de outros sensores.

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 * \rho_{RED} - C_2 * \rho_{BLUE} + L} \quad (3.3)$$

onde: ρ_{NIR} = fluxo radiante refletido no infravermelho próximo; ρ_{RED} = fluxo radiante refletido no vermelho; ρ_{Blue} = fluxo radiante refletido no azul; L = fator de ajuste do solo; C_1 e C_2 = coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis na atmosfera; G = fator de ganho; sendo: $C_1 = 6$; $C_2 = 7,5$; $L = 1$; e $G = 2,5$.

O EVI, proposto por Huete et al. (2002), foi desenvolvido como alternativa para minimizar algumas limitações do NDVI em relação à saturação por meio dos efeitos da atmosfera e do solo (JUSTICE et al., 1998). Todavia, este índice possui em sua fórmula (Eq. 3.3) a banda do azul, a qual não é comum a todos os satélites com sensores multiespectrais. Desta forma, foi proposta uma modificação do EVI, recebendo a denominação de EVI2 (Eq. 3.4), sendo retirada a banda do azul, mediante a justificativa de que alguns sensores não possuem banda nesse comprimento de onda (por exemplo, o ASTER acoplado à plataforma Terra). A forma encontrada para disseminar a aplicação do EVI consistiu na retirada da banda do azul, criando-se então o EVI2, conforme especificado na Eq. 3.4.

$$EVI2 = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C * \rho_{RED} + L} \quad (3.4)$$

onde: ρ_{NIR} = fluxo radiante refletido no infravermelho próximo; ρ_{RED} = fluxo radiante refletido no vermelho; L = fator de ajuste do solo; C = coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis na atmosfera; G = fator de ganho. Os valores assumidos para C, L e G são 2,4; 1 e 2,5, respectivamente.

A despeito das limitações apresentadas tanto pelo NDVI quanto pelo EVI, ambos têm apresentado resultados satisfatórios no estudo da vegetação e no monitoramento agrícola, por serem capazes de evidenciar mudanças na paisagem, como a supressão da vegetação, ou no comportamento espectral, devido às alterações nos padrões biofísicos, como estresse hídrico causado, por exemplo, pelos efeitos da sazonalidade.

O bioma Cerrado apresenta intensa fragmentação, conforme discutido anteriormente, principalmente pela atividade agrícola mecanizada. Por isso, os produtos do sensor MODIS referentes aos índices de vegetação, tais como NDVI e EVI, são de grande relevância, devido à alta resolução temporal com que os dados são produzidos e, conseqüentemente, devido ao acervo de dados disponível gratuitamente (COUTO Jr. et al., 2011).

O NDVI é considerado por Huete et al. (2002) como sendo um índice sensível aos pigmentos fotossintetizantes (clorofila), enquanto o EVI é mais sensível às variações da arquitetura da planta (estrutura do dossel). De acordo com Carvalho Jr. et al. (2006), o EVI também minimiza as interferências relativas às variações provenientes do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, observados nos dados multitemporais. Este índice é adequado para ambientes de Cerrado, pois apresenta fitofisionomias mais abertas e por isso tem-se maior interferência do solo exposto ou do estrato herbáceo.

3.4 - Histórico e características do sensor Modis

Na plataforma Terra, um dos principais instrumentos acoplados é o Modis, o qual apresenta alta resolução temporal, disponibilizando dados a cada 1 a 2 dias e composições a cada 8 ou 16 dias. Este sensor registra imagens da superfície terrestre com uma resolução radiométrica de 12 bits e em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Possui resolução espacial de 250 m para duas bandas, 500 m para outras cinco bandas e 1 km para as demais 29 bandas (SOARES et al., 2007). O Quadro 3.2 especifica as características do sensor Modis.

Na plataforma Terra também se encontram outros relevantes sensores, como o MISR (*Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), CERES (*Clouds and the Earth's Energy System*) e MOPITT (*Measurement of Pollution in the Troposphere*) (SOARES et al., 2007).

Quadro 3.2 - Características do sensor Modis.

Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
1	620 - 670 nm	250 m	1 a 2 dias	2330 x 5000 km	12 bits
2	841 - 876 nm				
3	459 - 479 nm	500 m	1 a 2 dias	2330 x 5000 km	12 bits
4	545 - 565 nm				
5	1230 - 1250 nm				
6	1628 - 1652 nm				
7	2105 - 2155 nm				
8	405 - 420 nm				
9	438 - 448 nm	1000m	1 a 2 dias	2330 x 5000 km	12 bits
10	483 - 493 nm				
11	526 - 536 nm				
12	546 - 556 nm				
13	662 - 672 nm				
14	673 - 683 nm				
15	743 - 753 nm				
16	862 - 877 nm				
17	890 - 920 nm				
18	931 - 941 nm				
19	915 - 965 nm				
20	3660 - 3840 nm				
21	3929 - 3989 nm				
22	3929 - 3989 nm				
23	4020 - 4080 nm				
24	4433 - 4498 nm				
25	4482 - 4549 nm				
26	1360 - 1390 nm				
27	6535 - 6895 nm				
28	7175 - 7475 nm				
29	8400 - 8700 nm				
30	9580 - 9880 nm				
31	10780 - 11280 nm				
32	11770 - 12270 nm				
33	13185 - 13485 nm				
34	13485 - 13785 nm				
35	13785 - 14085 nm				
36	14085 - 14385 nm				

Fonte: Earth Observing System. <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/terra.htm>>.

Uma das vantagens oferecidas pelas imagens Modis é a disponibilidade de dados pré-processados, como imagens georreferenciadas e com correções atmosféricas, o que agiliza a etapa de processamento e análise, além de diversos produtos (ex. índices de vegetação, temperatura, etc.). Tal fato faz dos produtos deste sensor bastante convidativos para diversos segmentos de usuários, que muitas vezes atuam apenas na etapa de análise e interpretação dos dados.

Outra característica importante do Modis é que, devido ao seu amplo campo de visada, são geradas imagens que permitem fazer estudos sinópticos da paisagem. Barker et al. (1992) elencaram como sendo as principais características deste sensor a ampla cobertura espacial e espectral; a continuidade nas tomadas de medidas, em faixas espectrais mais estreitas que as disponíveis em outros sensores até então, permitindo a complementação de outras informações; o fato de ser a primeira ferramenta dos satélites integrantes do EOS (*Earth Observing System*) a ser utilizado no monitoramento de mudanças globais.

Desta forma, os dados obtidos pelo Modis possibilitam realizar o monitoramento contínuo e sinóptico da paisagem, os quais permitem estudos em escala regional. A disponibilização de dados previamente tratados facilita o processamento de grande quantidade de dados, a exemplo das séries temporais de EVI. As imagens Modis, a despeito da resolução espacial moderada, possibilitam a realização de estudo em média escala de detalhe, compensando também pela elevada resolução temporal.

O sensor Modis tem produzido dados coerentes, conforme as suas resoluções, para a análise espectro-temporal em escala geográfica regional, o que anteriormente era realizado principalmente com o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). O Modis foi lançado justamente para suprir as lacunas referentes ao monitoramento por satélite a médio e longo prazo.

É importante salientar que o conceito de resolução espacial é relativo. Por exemplo, quando se compara o Modis ao NOAA/AVHRR, diz-se que este tem baixa resolução espacial ao contrário do primeiro. Todavia, quando se compara o sensor Modis com o Landsat, considera-se que o primeiro possui baixa resolução espacial. Desta forma é preciso atentar para este conceito, pois na maioria das vezes pode-se denotar uma definição relativa.

A acurácia do georreferenciamento das imagens Modis também influi na derivação de séries temporais com precisão (WOLFE et al., 2002). Desta forma, é possível estimar parâmetros biofísicos da vegetação por meio de dados Modis (ADAMI et al., 2008). Devido a tais características, os dados provenientes deste sensor são geralmente utilizados para estimar parâmetros biofísicos da vegetação, monitoramento da cobertura vegetal do planeta

e para identificar mudanças decorrentes de variações fenológicas (JUSTICE et al., 2002; ADAMI et al., 2008).

Um diferencial do Modis foi apontado por Piromal et al. (2008) que afirmaram uma melhoria significativa na geometria de aquisição de dados e a variedade de produtos derivados dos dados brutos do Modis, o que possibilita inúmeros estudos por pesquisadores das mais diferentes áreas do conhecimento.

O produto MOD13Q1 possui resolução temporal de 16 dias, com cenas compostas por pixels de valor máximo neste período. Este produto é integrado pelos seguintes dados: NDVI, NDVI *Quality*, EVI, EVI *Quality*, refletância aparente no vermelho, refletância aparente no infravermelho-próximo, refletância aparente no infravermelho-médio, refletância aparente no azul, ângulo zenital de visada médio, ângulo solar zenital médio e ângulo de azimute relativo médio. O Quadro 3.3 descreve os principais produtos obtidos a partir do sensor Modis.

Quadro 3.3 - Principais produtos do sensor MODIS.

MÓDULOS	PRODUTOS
Produtos relacionados ao Balanço de Energia	
MOD 09	Refletância aparente no vermelho e no infravermelho-próximo e controle de qualidade
MOD 11	Temperatura de superfície da Terra e emissividade
MOD 43	Função de distribuição de refletância bidirecional
MOD 10 e 29	Cobertura de neve e extensão de gelo na superfície do mar
Produtos relacionados à vegetação	
MOD 13	Grades de índices de vegetação e controle de qualidade
MOD 15	Índice de área foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa
MOD 17	Fotossíntese e produtividade primária
Produtos relacionados à cobertura terrestre	
MOD 12	Cobertura da Terra
MOD 14	Anomalias termais, fogo e queima de biomassa
MOD 44	Conversão da cobertura vegetal

Fonte: Elaborado com base em Justice et al. (2002).

3.5 - Séries multitemporais de dados de satélites

As séries temporais de imagens de satélite possibilitam a construção de acervos de dados relevantes para o desenvolvimento de pesquisas que necessitem de uma abordagem

temporal, tais como detecção de mudanças temporais no uso do solo, monitoramento ambiental, variabilidade sazonal, caracterização fenológicas da vegetação e monitoramento de safras. Esta importância não se restringe apenas às imagens propriamente ditas, mas também aos produtos derivados do processamento das mesmas, como é o caso dos índices de vegetação.

Vários estudos têm utilizado dados multitemporais objetivando conhecer melhor as alterações que podem ocorrer na paisagem em um curto intervalo de tempo, mediante ocorrência de eventos efêmeros ou em condições específicas. Anjos et al. (2013), por exemplo, utilizaram dados do Modis para realizar a caracterização espectro-temporal de pastagens cultivadas em três municípios de Minas Gerais e encontrou resultados satisfatórios. Pesquisas como a de Rosendo e Rosa (2005) também já havia utilizado dados deste mesmo sensor por meio dos índices NDVI e SAVI, para identificar alvos nos períodos seco e chuvoso na bacia do rio Araguari, no Estado de Minas Gerais.

Estudos da vegetação por meio de séries temporais de imagens de satélites também têm proporcionado a compreensão de que dados resultantes de processamento digital de imagens podem estar associados à anisotropia do alvo analisado, isto é, à capacidade de refletir em diferentes intensidade em ângulos distintos. Desta forma a interpretação destes dados pode não estar associada a alteração fisiológica ou morfológica na vegetação (LIESENBERG, 2005). Não diferentemente dos demais alvos da superfície terrestre, a vegetação apresenta um comportamento anisotrópico e tais características, inerentes a este alvo, podem gerar equívocos na análise e interpretação dos dados, os quais podem ser potencializados, principalmente, quando, além da anisotropia da capacidade de reflectância dos alvos, estão associados os erros em relação à geometria de iluminação do Sol.

Estudos como os de Ratana et al. (2005) e França e Sano (2011) têm demonstrado que a análise integrada de dados multitemporais apresenta melhor capacidade de discriminação de coberturas vegetais naturais e/ou antrópicas. França e Sano (2011), por exemplo, utilizaram a somatória de reflectâncias obtidas de imagens com várias datas de passagem para aumentar a capacidade de discriminação de diferentes classes de cobertura vegetal do Cerrado.

Outras pesquisas também enfatizaram o uso de assinaturas multitemporais de imagens para discriminar cobertura de terras do Cerrado (RATANA et al., 2005; ROSENDO e ROSA, 2005; CARVALHO Jr., et al., 2006, 2008). Todavia, é comum encontrar maior número de trabalhos de mapeamento de cobertura de terras que utilizam imagens multiespectrais de uma única data de passagem.

Um sistema de consulta aos dados multitemporais do Modis EVI de todo o país foi desenvolvido pelo Laboratório de Floresta e Agricultura do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (FREITAS et al., 2011) e está disponível na rede mundial de

computadores. A disponibilidade de dados em elevada escala temporal deve-se ao diferencial desse sensor que revisita as áreas da superfície terrestre a cada um ou dois dias. Tais dados permitem gerar curvas espectros-temporais para cada pixel, atualmente disponíveis para o período de 2000 a 2013 (coleção 5). De forma semelhante o Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás (UFG), disponibiliza um grande acervo de dados para todo o Brasil de vários produtos do Modis e também já recortados conforme o limite do bioma Cerrado.

Para Justice et al. (2002), as imagens que integram as séries multitemporais do Modis são de boa qualidade no que tange as características da resolução espacial e radiométrica, bem como em relação à geometria. Os autores supracitados também salientaram que a alta resolução temporal deste sensor possibilita realizar diferentes aplicações que estejam intrinsecamente relacionadas com a questão temporal, como por exemplo, fenômenos capazes de modificar a paisagem em um curto intervalo de tempo, como o fogo ou desmatamentos.

Desta forma, pode-se afirmar que a resolução temporal do sensor Modis o torna peculiar para determinados estudos, pois o pequeno intervalo de tempo para visitar uma mesma área geográfica permite maior probabilidade de obter imagens sem cobertura de nuvens. Outra característica importante desse sensor é que tais imagens, devido à sua moderada resolução espacial, permitem a realização de estudos sinópticos da paisagem. De acordo com Carvalho Jr. et al. (2006), as séries multitemporais do Modis, associadas aos dados de precipitação, têm sido bastante utilizadas, principalmente para a discriminação de uso do solo e cobertura vegetal.

A despeito das vantagens apresentadas pelas séries temporais de dados de satélites, o uso destas implica em lidar com grande quantidade de dados, elevada capacidade de processamento e armazenamento, além da utilização de algoritmos específicos para extração de informações.

3.6 - Qualidade dos dados Modis para o Oeste da Bahia

O sensor Modis, acoplado às plataformas Terra e Aqua, gera uma série de dados que são disponibilizados por meio de produtos prontos para serem utilizados (*ready-to-use*, termo em inglês). Um desses produtos é o *Pixel Reliability* que permite uma avaliação da confiabilidade dos dados produzidos. Os principais condicionantes que reduzem a confiabilidade dos dados são os fatores atmosféricos (nuvens, geleiras e neve), sombra e ângulo de imageamento.

Por ser o Oeste da Bahia predominantemente plano e caracterizado por duas estações bem definidas, acredita-se que os dados produzidos pelo sensor Modis para esta

região são de boa qualidade. No período de estiagem, que compreende a estação mais longa, a cobertura de nuvens é pouco frequente. Desta forma, pode-se deduzir que os dados produzidos pelo Modis são confiáveis, haja vista que a interferência de nuvens corresponde ao ruído mais comum provocado pelas condições atmosféricas na geração de imagens de satélites. O fato da área de estudo ser caracterizada pelo clima tropical continental proporciona condições para que os dados produzidos pelo Modis tenham alta confiabilidade, posto que os principais condicionantes para reduzir a confiança dos dados seriam nuvens, geleiras e neves.

Segundo Colditz et al. (2008), as imagens de qualidade (*VI Quality* e *Pixel Reliability*) fornecem informações significativas para análise de dados, sendo que as imagens de *Pixel Reliability* são atualmente o único meio para execução de máscaras de nuvens para a coleção C5 (versão 4) dos dados Modis.

Dados de *Quality Assurance* e *Pixel Reliability* foram utilizados por Moraes e Rocha (2011) para avaliar os pixels para mapeamento e monitoramento de cana-de-açúcar e obtiveram resultados satisfatórios. Tais dados mostraram-se de grande importância para separação de pixels bons (sem sombras ou nuvens), agregando confiabilidade quanto à qualidade da sua utilização.

3.7 - Métodos de suavização de séries temporais

A necessidade premente de monitoramento da dinâmica de uso e cobertura vegetal tem impulsionado o avanço na utilização de dados de séries temporais, visando minimizar as lacunas de informações contínuas que retardam a compreensão dos processos e eventos no tempo e no espaço. Desta forma, as séries temporais de dados de satélites têm sido utilizadas como importante fonte de informação, inclusive na supressão de lacunas geradas devido à baixa ou moderada resolução espacial, pois mormente estes sensores são responsáveis pela maioria das séries temporais. Apesar disso, deve-se considerar a presença iminente de ruídos nestes dados, o que requer o processamento de suavização a partir das técnicas de filtragens para eliminação de ruídos distintos, tais como pulsos e picos, ruídos estes que podem estar associados às interferências da atmosfera (nuvens, geleiras, intempéries, etc.).

Estudos em escalas regionais têm recorrido constantemente aos dados Modis por estes permitirem a minimização nos custos operacionais e na demanda de tempo, possibilitarem a realização de estudos com a frequência exigida pela sistematização de modo a caracterizar ciclos fenológicos anuais ou mais curtos, evidenciando a dinâmica das transições entre diferentes usos e coberturas das terras. Por exemplo, Clark et al. (2010) realizaram o mapeamento da cobertura anual de terras por meio de séries temporais de

dados Modis, com pixel de 250 m, na ecorregião do Chaco Seco na Argentina, Bolívia e Paraguai. Bradley et al. (2007) trataram dados de séries temporais de NDVI para estudar as mudanças interanuais na fenologia em diferentes tipos de cobertura do solo no Oeste dos Estados Unidos. O monitoramento da colheita de cana-de-açúcar foi desenvolvido por Aguiar (2007) por meio de dados de NDVI que integram a série temporal.

A despeito da grande valia das séries temporais essas mormente são contaminadas por ruídos, o que implica no uso de filtros para removê-los ou minimizá-los (SANTANA et al., 2010). Autores como Zhang et al. (2003) utilizaram funções logísticas para filtrar dados de EVI com o objetivo de desenvolver uma metodologia para monitorar a fenologia da vegetação, a partir de séries temporais do Modis, identificando quatro fases distintas durante o ciclo anual. Bradley et al. (2007) trataram dados de séries temporais de NDVI para estudar as mudanças interanuais na fenologia em diferentes tipos de cobertura do solo.

Os suavizadores de ruídos temporais utilizados na realização dos procedimentos de filtragens desta pesquisa estão implementados no software livre Timesat, o qual permite iterativamente que ajustes suaves de funções matemáticas sejam aplicados em séries temporais de dados de satélite ruidosos (JÖNSSON e EKLUNDH, 2002).

Os desenvolvedores do Timesat (JÖNSSON e EKLUNDH, 2004) implementaram três algoritmos baseados no método dos mínimos quadrados, sendo eles: Logística dupla, baseada em função harmônica e polinomial, filtragem adaptativa através do Savitzky-Golay e a função Gaussiana assimétrica.

A Logística dupla corresponde a uma função harmônica polinomial (Eq. 3.5). Nesta $g(t, x)$ determinam a forma da base da função, sendo que o parâmetro x_1 determina a posição do ponto de inflexão esquerdo, enquanto x_2 fornece a taxa de variação. Similarmente, x_3 determina a posição do ponto de inflexão do lado direito, enquanto x_4 fornece a taxa de variação nesse ponto. Nesta função, os parâmetros utilizados são restritos, por isso garantem uma forma suave às séries temporais (JÖNSSON et al., 2004).

$$g(t; x_1, \dots, x_4) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_1 - t}{x_2}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_3 - t}{x_4}\right)} \quad (3.5)$$

Savitzky-Golay é um método de filtragem adaptativa, baseado em média móvel, cujo valor da janela é pré-estabelecido conforme a natureza do ruído. Este é um método considerado mais flexível, em relação à suavização dos espectros temporais, quando comparado aos demais implementados no Timesat. Devido a esta característica do Savitzky-Golay, Ramme (2008), após utilizar este método, realizou ajustes de correções na fase de pós-processamento dos dados.

O método da média móvel preserva a área e a posição média do pico de um ciclo, mas altera a extensão e a altura do mesmo. Para minimizar esta limitação do algoritmo de média móvel, pode-se fazer a aproximação do valor dos dados subjacentes, não pela média da janela, mas pelo valor obtido pelo ajustamento polinomial a partir do método dos mínimos quadrados, sendo então a extensão e a altura preservadas. A implementação deste filtro é dada pela Eq. 3.6 (JÖNSSON e EKLUNDH, 2004; SILVA 2012).

$$\sum_{j=-n}^n |c_j y_i + j| \quad (3.6)$$

Os filtros de média móvel e Savitzky-Golay foram empregados por Ramme (2008) em dados de NDVI com o objetivo de relacionar o perfil espectro-temporal do índice de vegetação com o ciclo vegetativo da cana-soca. De acordo com este autor, o filtro de média móvel provoca distorções na forma de curva, que são mais significativas no período de colheita da cana, devido a uma queda no valor do NDVI que ocorre gradualmente conforme os talhões de cana-soca são colhidos. Em contrapartida, o filtro Savitzky-Golay foi menos sensível às variações bruscas do perfil temporal do NDVI, no entanto, ruídos de intensidade significativa ainda influenciam um pouco na forma da curva.

A função Gaussiana assimétrica (Eq. 3.7) é um método mais restritivo, por isso é menos sensível ao ruído, o que possibilita a sua utilização quando se trata da necessidade de se fazer ajustes mais incisivos nos dados. As funções locais são ajustadas aos dados que se encontram nos intervalos em torno do valor mínimo e máximo. Os parâmetros lineares C_1 e C_2 determinam o nível de base e a amplitude. Os parâmetros não-lineares x_1 , x_2 , ..., x_p determinam a forma da função de base de $g(t, x)$.

$$f(t) - f(t; c, x) = c_1 + c_2 g(t; x)$$

$$g(t; x_1, x_2, \dots, x_5) = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{t - x_1}{x_2} \right)^{x_3} \right] & \text{if } t > x_1 \\ \exp \left[- \left(\frac{x_1 - t}{x_4} \right)^{x_5} \right] & \text{if } |t| < x_1 \end{cases} \quad (3.7)$$

Nesta função do tipo Gaussiana, x_1 determina a posição do máximo ou mínimo, no que diz respeito às variáveis independentes no tempo t , enquanto que x_2 e x_3 determinam largura e achatamento (curtose) da função da metade direita (Eq. 3.7). Da mesma forma, x_4 e x_5 determinam largura e nivelamento da metade esquerda (JÖNSSON et al., 2004).

As séries temporais de índices de vegetação fornecem grande potencial para discriminação de fitofisionomias, análise do ciclo vegetativo, identificação de interferência na

cobertura vegetal, como desmatamento, queimadas e alternância do tipo de cultura. Para tanto, é necessário a aplicação de filtros para suavização das curvas por meio da remoção dos ruídos, de modo a garantir interpretações fidedignas à realidade analisada a partir dos dados de sensoriamento remoto.

Apesar disso, autores como Esquerdo et al. (2013) ressaltaram o cuidado que se deve ter ao se utilizar métodos de filtragens, haja vista que alguns destes podem camuflar um evento importante no ciclo vegetativo ou mesmo algum tipo de intervenção humana relativo a determinada classe analisada. Os ruídos são representados pelas feições bruscas, deformações e *outliers* que aparecem no perfil temporal. Eles são provenientes, em sua maioria, das condições meteorológicas tais como nuvens, sombra de nuvens, nevoeiros, ventanias e chuvas. As fumaças e também eventuais limitações do sensor podem afetar a qualidade do dado. Existe uma tendência de subestimação dos valores de EVI devido à interferência da atmosfera, o que faz com que se tenham mais ruídos com valores baixos. Desta forma, é importante que a suavização da curva seja feita de tal maneira que fique ajustada na parte inferior, de modo a retirar os ruídos negativos.

A análise harmônica e Spline foram empregadas para suavizar curvas espectrais originadas de dados de NDVI do sensor AVHRR do satélite NOAA por Bradley et al. (2007). A transformada de Wavelet (ondeletas) foi utilizada para analisar a relação sinal ruído em séries temporais de NDVI do Modis por Lu et al. (2007). Este método também foi utilizado por Freitas et al. (2011) para remover os ruídos da série temporal de EVI2 implementada em uma plataforma semelhante a do Google Earth. No filtro proposto por Wardlow et al. (2006), os valores do índice de vegetação afetados por ruídos foram identificados e, quando necessário, substituídos pelo menor valor adjacente.

Séries temporais de 1982 a 2005 do satélite AVHRR foram utilizadas por Heumann et al. (2007) para estudar as mudanças fonológicas no Sahel e Sudão da África. Estes pesquisadores utilizaram o software Timesat para estimar os parâmetros fonológicos. O algoritmo de Logística dupla foi aplicado por Beck et al. (2006) para monitorar a dinâmica vegetal nas altas latitudes utilizando dados de NDVI do Modis. Este algoritmo demonstrou melhor desempenho quando os resultados foram comparados com os das funções Gaussiana assimétrica e transformada de Fourier de segunda ordem.

Os métodos de suavização de ruídos de Logística dupla, Gaussiano assimétrico e Savitzky-Golay foram utilizados por Silva (2012) para filtrar dados de NDVI dos satélites SPOT 4 e SPOT 5, sensores Vegetation-1 e Vegetation-2, respectivamente, de quatro áreas de cultivo de videiras em Portugal. A qualidade do ajustamento das curvas espectro-temporais foi avaliada pelo coeficiente de determinação R^2 . Os parâmetros extraídos com o programa Timesat foram utilizados com o objetivo de descrever o ciclo vegetativo da vinha através de filtros ajustados e a partir destes comparar os estados fonológicos resultantes do

modelo com os dados *in situ*. A autora supracitada ressaltou a necessidade de trabalho adicional com vista a avaliar a aplicabilidade do modelo da previsão desenvolvido com os índices da vegetação extraídos, para que outros sensores do EOS forneçam a informação significativa sobre a produtividade do vinho previsto em parcelas pequenas de vinícolas. Também previu, neste trabalho, a carência de se utilizar as mesmas técnicas para outros índices de vegetação.

Hird e McDermid (2009) afirmaram que poucos são os trabalhos que avaliam o desempenho dos métodos de filtragens e que a grande maioria se restringe a avaliação qualitativa, isto é, visual e não quantitativa. Por isso, estes autores testaram e compararam vários filtros, dentre eles os implementados no Timesat e chegaram a conclusão que, dentre os filtros utilizados, o de Logística dupla e o Gaussiano assimétrico demonstraram maior potencial para a remoção do ruído geral, conforme resultado do erro médio quadrático.

Se os dados forem pouco afetados por ruídos, isto é, tiverem curvas suaves, o filtro Savitzky-Golay pode ser um método indicado, porém, se os ruídos forem expressivos na série temporal, deve-se recorrer aos métodos de Logística dupla ou Gaussiano assimétrico (JÖNSSON e EKLUNDH, 2003).

3.8 - *Minimum Noise Fraction (MNF)*

A técnica estatística *Minimum Noise Fraction (MNF)* (GREEN et al., 1988), baseada na análise de componentes principais, é utilizada para suavizar dados multicanais, como os hiperespectrais (LINN, et al., 2010). A MNF reduz a dimensionalidade espectral dos dados, sem deteriorar a relação sinal/ruído, minimizando as redundâncias com a eliminação das informações de menor variância e altamente correlacionadas. Assim, a MNF também reduz a demanda computacional para os processamentos subsequentes (KRUSE et al., 2003).

A aplicação desse método aos dados de satélites consiste em condensar os dados de maior variância em um número menor de imagens. Esta etapa é definida como transformação MNF, a qual roda uma estatística que resulta no gráfico de autovalores (*eigen values*). Selecionam-se as componentes que concentram as informações e a partir dessas realizam-se os reescalamentos da informação e do ruído por meio da transformação inversa da MNF (BAPTISTA, 2012), sendo que os de autovalores elevados são considerados coerentes e representativos da dimensionalidade espectral dos dados e os de autovalores menores e de menor variância são descartados, pois estão associados aos ruídos.

Para as séries temporais de dados de satélites, a técnica MNF desempenha a mesma função quando utilizada em dados hiperespectrais, alterando-se apenas quanto à natureza do dado, o que implica em alguns cuidados adicionais quando da sua utilização. A

MNF tende a suavizar as curvas espectro-temporais afetadas por ruídos, concentrando as informações nas primeiras componentes. Este procedimento apresentou eficiência na atenuação dos ruídos presentes em séries temporais, demonstrando resultados satisfatórios na discriminação de distintos padrões temporais encontrados no bioma Cerrado (CARVALHO Jr. et al., 2006; COUTO Jr. et al., 2011).

3.9 - Spectral Angle Mapper (SAM)

Uma das principais maneiras de se extrair informações a partir de dados de sensoriamento remoto é por meio das classificações automáticas, utilizando os classificadores supervisionados e não-supervisionados. Todavia, quando se trata de grande quantidade de dados, caso dos sensores hiperespectrais, faz-se necessária a utilização de algoritmos mais robustos, por exemplo, o *Spectral Feature Fitting* e o *Spectral Angle Mapper*. Ambos os classificadores foram criados, inicialmente, voltados para dados hiperespectrais, mas têm sido utilizados de forma bastante diversificada em dados multiespectrais.

O método SAM, embora desenvolvido para lidar com dados resultantes da espectroscopia de imageamento (hiperespectrais), tem sido empregado também em outros tipos de dados como gamaespectrométricos (CARRINO et al., 2011), dados de relevo para extrair assinaturas geomorfométricas (VASCONCELOS et al., 2012), discriminação de alvos minerais na faixa do infravermelho termal (ROWAN e MARS, 2003) e estudos em ambientes aquáticos (KUTSER et al., 2006; LOBO et al., 2009a).

O SAM se baseia em espectros de referência para identificar pixels nas imagens que apresentam comportamento espectralmente semelhante. O algoritmo SAM (Eq. 3.8) considera o ângulo de similaridade entre os membros de referência (KRUSE et al., 1993), cuja premissa consiste que, quanto menor for o ângulo correspondente ao arco-cosseno (em radianos) entre os espectros, maior a probabilidade deles pertencerem a mesma classe (Figura 3.2). Nessa investigação de similaridade angular é necessário que as informações espectrais, tanto do pixel de referência quanto do pixel teste são transformadas em vetores *n-dimensional*, cujo *n* representa o número de bandas.

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^{i=b} R_i E_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=b} (E_i)^2 \sum_{i=1}^{i=b} (R_i)^2}} \quad (3.8)$$

onde α = função do arco-cosseno; quanto menor for α , maior será a similaridade entre as curvas; R = espectro de referência; e E = espectro teste.

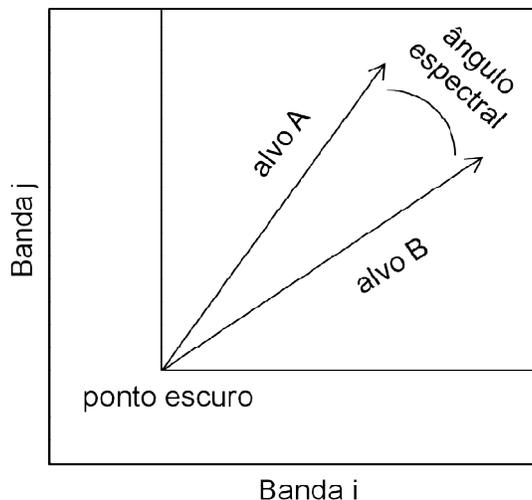


Figura 3.2 - Representação do funcionamento do classificador por ângulos espectrais. Fonte: Elaborada com base em Lobo (2009a).

Por ser um classificador que se baseia em espectros de referência previamente selecionados, os pixels representativos de cada classe devem ser identificados de forma bastante criteriosa. Geralmente recorrem-se às bibliotecas espectrais para selecionar os membros de referência, mas no caso do bioma Cerrado ainda não existe uma biblioteca espectral disponível, com espectros representativos das suas fitofisionomias. Esta situação se agrava quando se trata da análise de séries temporais, pois os alvos na natureza variam espectralmente e também temporalmente, o que implica em dificuldades na definição de assinaturas espectro-temporais de dados representativos dos alvos que se visam investigar.

Todavia, quando não há bibliotecas de referência, é possível construí-la, como fez Lobo (2009b) a partir de uma coleção de espectros representativos de diferentes tipos de água, criando-se um conjunto de espectros de referência.

3.10 - Fenologia da vegetação

A fenologia é definida como o estudo da ocorrência de eventos biológicos, a influência de fatores bióticos e abióticos nestes eventos e a relação entre as fenofases (fases caracterizadas por estes eventos) entre as mesmas espécies ou espécies diferentes (LIETH, 1974; TALORA e MORELLATO, 2000). A análise das variações fenológicas em nível regional e sua interligação com os diferentes componentes do meio geográfico (clima, solo, relevo, geologia, etc.) formam parte das informações necessárias para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas em escala global (ANDERSON e SHIMABUKURO, 2007).

Estudos de fenologia ressaltam que, além dos fatores climáticos, processos endógenos da planta e pressões seletivas bióticas podem influenciar na periodicidade das fenofases (TALORA e MORELLATO, 2000). Pesquisas desenvolvidas para avaliar padrões fenológicos da vegetação no interior da Mongólia, usando séries temporais de NDVI derivadas do sensor AVHRR, alertam que mudanças na temperatura e precipitação podem influenciar nas fenofases, tais como o período de crescimento de vegetação, taxa de acumulação de biomassa (rebrotas) e período e taxa de senescência da vegetação (LEE et al., 2002).

No caso das fitofisionomias do Cerrado, um dos principais fatores climáticos que influencia as ocorrências e distribuições espacial e temporal das fisionomias é a precipitação (BECERRA et al., 2009). Esses autores acrescentaram ainda que a distribuição espacial e a estrutura vertical da vegetação são influenciadas por fatores bióticos e abióticos.

Dados de sensoriamento remoto aplicados ao estudo do ciclo fenológico, e a associação dos efeitos da sazonalidade a esse, pode ser a chave para a discriminação e caracterização de classes de uso e cobertura vegetal, visto que as séries temporais permitem identificar e analisar a sazonalidade climática, o que implica na variabilidade intra e interanual (NORA e MARTINI, 2010). Imagens de alta resolução temporal permitem a extração de séries temporais e a consequente realização de estudos mais sinópticos e contextualizados no tempo. Assim, é possível monitorar a fenologia da vegetação em grandes escalas geográficas e produzir informações acuradas em tempo relativamente rápido.

O uso de séries temporais permite a compreensão de todo o ciclo fenológico, haja vista que as propriedades fenológicas são analisadas ao longo de um determinado período de tempo, podendo também ser extraídas a partir de séries temporais. Imagem de satélite de uma única data implica em probabilidade grande de erro na análise fenológica. O mesmo não ocorre quando se utilizam séries temporais. Dados fenológicos derivados de séries temporais do Oeste da Bahia podem fornecer importantes subsídios para a definição de época mais apropriada para extrair informações biofísicas e espectrais, pois as fitofisionomias apresentam comportamento associado aos efeitos da sazonalidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M.; FREITAS, R. M.; PADOVANI, C. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; MOREIRA, M. A. Estudo da dinâmica espaço-temporal do bioma Pantanal por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 10, p. 1371-1378, 2008.

ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da cobertura terrestre: fenologia e alterações antrópicas. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.). **Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007, v. 1, p. 185-206.

ANJOS, V. S.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S.; ROSA, R. Caracterização espectro-temporal de pastagens do Triângulo Mineiro utilizando dados MODIS EVI2 (2000-2010). **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 1, p. 205-215, 2013.

ARAÚJO FILHO, M. C.; MENESES, P. R.; SANO, E. E. Sistema de classificação de uso e cobertura da terra com base na análise de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.59, p.171-179, 2007.

BARKER, J. L.; HARDEN, M. K.; ANUTA, E. A.; SMID, J. E.; HOUGHT, D. **MODIS spectral sensivity study: requirements and characterization**. Washington: Nasa, Out. 1992, 84p.

BAPTISTA, G. M. M.; LEITE, L. L. **Adoção da técnica de espectrorradiometria de reflexão como indicativo de recuperação de áreas degradadas**. p. 297-308. In: Contribuição ao conhecimento ecológico do cerrado. Brasília: Universidade de Brasília, Departamento de ecologia, 1997. 325p.

BAPTISTA, G. M. M. Processamento de dados hiperespectrais. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**, p. 221-238, Brasília, 2012. On-line (UnB/CNPq).

BECERRA, J. A. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVALÁ, R. C. S. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 125-134, 2009.

BECK, P. S. A.; ATZBERGER, C.; HOGDA, K. A.; JOHANSEN, B.; SKIDMORE, A. K. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 321-334, 2006.

BIRTH, G. S.; MCVEY, G. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. **Agronomy Journal**, v. 60, p. 640-643, 1968.

BRADLEY, B. A.; JACOB, R. W.; HERMANCE, J. F.; MUSTARD, J. F. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 2, p. 137-145, 2007.

CARRINO, T. A.; SILVA, A. M.; BOTELHO, N. F.; SILVA, A. A. C. Discriminação de áreas de espesso regolito do leste do estado do Amazonas usando estatística multivariada, algoritmo hiperespectral e modelagem de dados espaciais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 155-172, 2011.

CARVALHO, A. P. F. **Estudo de características foliares de espécies de lenhosas de Cerrado e sua relação com os espectros de refletância**. Dissertação de mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005, 126 p.

CARVALHO JÚNIOR, O. A. HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F. Identificação regional da floresta estacional decidual na bacia do Rio Paranã a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 319-332, 2006.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; SAMPAIO, C. S.; SILVA, N. C.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 505-517, 2008.

CLARK, M. L.; AIDE, T. M.; GRAU, H. R.; RINER, G. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco

ecoregion of South America. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 1, p. 2816-2832, 2010.

COHEN, W. B. Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing**, v. 57, n. 2, p. 195-202, 1991.

COLDITZ, R. R.; CONRAD, C.; WEHRMANN, T.; SCHMIDT, M., DECH, S. Analysis of the quality of collection 4 and 5 vegetation index time series from MODIS. In: STEIN, A.; SHI, W.; BIJKER, W. (Org.) **Quality Aspects in Spatial Data Mining**. Boca Raton, Florida: Editora CRC Press, 2008, p. 161-173.

COUTO JUNIOR, A. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E.; SANTANA, O. A.; SOUZA, V.; ENCINA, J. I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 699-705, 2011.

CUI, Y.; MITOMI, Y.; TAKAMURA, T. An empirical anisotropy correction model for estimating land surface albedo for radiation budget studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 1, p. 24-39, 2009.

EOS. Earth Observing System. **Satélites de monitoramento**. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/terra.htm>> Acesso em: 01 de maio de 2012.

EITEN, G. Vegetação do cerrado. In: PINTO, M. N. (org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectiva**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília: Edunb: SEMATEC, 1993. 681 p.

EITEN, G. Delimitation of the cerrado concept. **Vegetatio**, v. 36, n. 3, p. 169-178, 1979.

ESQUERDO, J. C. D. M.; COUTINHO, A. C.; ANTUNES, J. F. G. Uso combinado de dados NDVI/MODIS dos satélites Terra e Aqua no monitoramento multi-temporal de áreas agrícolas. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu-PR, 2013. **Anais**. p. 431-437, 2013.

FERNANDES, A. **Fitogeografia Brasileira: províncias florísticas**. Fortaleza: Realce, 2006. 202 p.

FRANÇA, A. M. S.; SANO, E. E. Mapeamento de áreas de Campo Limpo Úmido no Distrito Federal a partir de fusão de imagens multiespectrais. **Sociedade & Natureza**, v. 23 n. 2, p. 197-209, 2011.

FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, p. 57-64, 2011.

GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, B.; CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 65-74, 1988.

HEUMANN, B.; SEAQUIST, J.; EKLUNDH, L.; JONSSON, P. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 4, p. 385-392, 2007.

HIRD, J.; MCDERMID, G. J. Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 1, p. 248-258, 2009.

HUETE A.; DIDAN K.; MIURA T.; RODRIGUEZ P.; GAO X.; FERREIRA L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução de José Carlos Ephifanio (coord.) *et al.* São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 8, p. 1824-1832, 2002.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction from time-series of satellite sensor data. In: **Frontiers of Remote Sensing Information Processing**, CHEN, C.H. (Ed.), p. 487-500. (World Scientific Publishing), 2003.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT: a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 1, p. 833-845, 2004.

JUSTICE, C O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p.1228-1247, 1998.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3-15, 2002.

KRUSE, F. A., LEFKOFF, A. B., DIETZ, J. B. Expert system-based mineral mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, using the Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 309-336, 1993.

KRUSE, F. A. Preliminary results - hyperspectral mapping of coral reef systems using EO-1 Hyperion, Buck Island, U.S. Virgin Islands. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 12., 2003, Pasadena, USA. **Proceedings...** Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2003. p. 157-173.

KUTSER, T.; VAHTMÄE, E.; METSAMAA, V. Spectral library of macroalgae and benthic substrates in Estonian coastal waters. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Biology and Ecology**, v. 55, n. 4, p. 329-340, 2006.

LEE, R.; YU, F.; PRICE, K. P.; ELLIS, J.; SHI, P. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 12, p. 2505-2512, 2002.

LINN, R. M. **Avaliação dos modelos de mistura espectral (MESMA) e SMA aplicados aos dados hiperespectrais Hyperion/EO-1 adquiridos na planície costeira do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008, 157p.

LINN, R. M.; ROLIM, S. B. A.; GALVÃO, L. S. Assessment of the multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) model applied to the Hyperion/EO-1 hyperspectral data

of the coastal plain of Rio Grande do Sul, Brazil. In: ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Viena. **Anais...** v. XXXVIII, Part 7A, 2010.

LIESENBERG, V. **Análise multi-angular de fitofisionomias do Bioma Cerrado com dados MISR/TERRA**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005, 120p.

LIETH, H. Introduction to phenology and the modeling of seasonality. In: LIETH, H. (ed.), **Phenology and seasonality modeling**. Berlin: Springer Verlag, p. 3-19, 1974.

LOBO, F. L. **Biblioteca espectral: determinação de espectros de referência para a classificação de tipos de água das áreas alagáveis da Amazônia**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009a, 132p.

LOBO, F. L.; NOVO, E.; BARBOSA, C.; YUNES, J. S. Mapping potential cyanobacterial bloom using Hyperion/EO-1 data in Patos Lagoon estuary. **Acta Limnologica Brasiliensis**, v. 21, p. 299-308, 2009b.

LU, X.; LIU, R.; LIU, J.; LIANG, S. Removal of noise by wavelet method to generate high quality temporal data of terrestrial MODIS products. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 10, p. 1-11, 2007.

MIESCH, C.; BRIOTTET, X.; KERR, Y. Bidirectional reflectance of a rough anisotropic surface. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.15, p. 3107-3114, 2002.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V. Imagens de coeficiente de qualidade (Quality) e de confiabilidade (Reliability) para seleção de pixels em imagens de NDVI do sensor MODIS para monitoramento da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 547-552, 2011.

NORA, E. L. D.; MARTINI, D. Z. Análise da dinâmica sazonal de fitofisionomias do bioma Mata Atlântica com base em índices de vegetação do sensor MODIS/TERRA. **Ambiência**, v. 6, n. 1, p. 97-108, 2010.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2008.

PIROMAL, R. A. S.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; KRUG, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 1, p. 77-84, 2008.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 127p.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento Remoto. Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: Editora Universidade de Brasília/Embrapa Cerrados, 2001, 262p.

RAMME, F. L. P. **Perfis temporais NDVI e sua relação com diferentes tipos de ciclos vegetativos da cultura da cana-de-açúcar**. Campinas-SP, 2008. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas.

RATANA, P.; HUETE, A. R.; FERREIRA, L. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. **Earth Interactions**, v. 9, p. 1-22, 2005.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. Embrapa Cerrados: Planaltina, v. 1, Cap. 6, p. 151-199, 2008.

ROSENDO, J. S.; ROSA, R. A utilização de sensores com resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na bacia do rio Araguari - MG. **Sociedade & Natureza**, v. 17, n. 33, p. 91-104, 2005.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **Proceedings of the Third ERTS Symposium**, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309-317, 1973.

ROWAN, L. C.; MARS, J. C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 350-366, 2003.

SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M.; TORITANI, H.; SHIBAYAMA, M.; ISHITSUKA, N.; OHNO, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p. 366-374, 2005.

SANTANA, O. A.; CARVALHO Jr., O. A.; PIMENTEL, C. M. M.; GOMES, R. A. T.; OLIVEIRA, S. N. Modelagem de espectros temporais NDVI-Modis, no período de 2000 a 2008, na bacia do rio Paracatu, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 1, p. 47-60, 2010.

SILVA, L. A. P. T. **Utilização de técnicas de detecção remota em viticultura**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Ciências Agrárias, Universidade dos Açores. 2012, 50p.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e Descrição. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Coord.). **O Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007, 425p.

TALORA, D. C.; MORELLATO, P. C. Fenologia de espécies arbóreas em floresta de planície litorânea do sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**. v. 23, p.13-26, 2000.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO Jr., O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO Jr., A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 171-186, 2012.

WARDLOW, B. D.; KASTENS, J. H.; EGBERT, S. L. Using USDA crop progress data and MODIS time-series NDVI for regional-scale evaluation of greenup onset date. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n. 11, p. 1225-1234, 2006.

WOLFE, R. E.; NISHIHAMA, M.; FLEIG, A. J.; KUYPER, J. A.; ROY, D. P.; STOREY, J. C.; PATT F. S. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 31-49, 2002.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 471-475, 2003.

4- DESEMPENHO DO TIMESAT NA SUAUIZACÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO REALÇADO (EVI) DO SENSOR *MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER* (MODIS) NO OESTE DA BAHIA

Artigo submetido à revista Journal of Applied Remote Sensing

4- DESEMPENHO DO TIMESAT NA SUAVIZAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO REALÇADO (EVI) DO SENSOR *MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER* (MODIS) DO OESTE DA BAHIA

RESUMO

Com o lançamento do sensor Modis (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo das plataformas Terra e Aqua em 1999 e 2002, respectivamente, com resolução temporal de 1-2 dias, ampliou-se a possibilidade de utilizar séries temporais contínuas de imagens orbitais para discriminar classes de cobertura vegetal natural e antrópica em diferentes regiões da Terra. Este estudo teve como objetivos principais analisar a qualidade radiométrica das séries temporais do índice de vegetação realçado (EVI) do sensor Terra Modis no Oeste da Bahia e identificar o filtro mais apropriado, dentre os disponíveis no programa Timesat, para suavizar as referidas séries temporais. O período analisado foi 2000 a 2011 (total de 276 cenas). A qualidade radiométrica foi analisada com base nos dados do *Pixel Reliability*, disponível no produto MOD13Q1. Os desempenhos dos três filtros de suavização disponibilizados no Timesat (Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico) foram analisados por meio de teste F de Graybill e pela estatística de Willmot. Cinco por cento dos pixels do Modis do oeste da Bahia estiveram cobertos por nuvens, praticamente todos eles provenientes da estação chuvosa. Para a suavização de séries temporais do Modis EVI dessa região pelo programa Timesat, recomenda-se o método da Logística dupla.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Cobertura vegetal; Confiabilidade do pixel; Graybill; Willmot.

ABSTRACT

The launch of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Modis) sensor aboard the Terra and Aqua platforms in 1999 and 2002, respectively, with temporal resolutions of 1-2 days, opened the possibility of using long time series of satellite images to monitor land use and land cover classes from different regions of the Earth. The main objectives of this study were two-fold: to analyze the radiometric quality of the time series of enhanced vegetation index (EVI) products derived from the Terra Modis sensor in western Bahia State, Brazil, and to identify the most appropriate filter to smooth Modis EVI time series of the study area, among those available in the public domain, Timesat algorithm. The 2000-2011 time

period was considered (a total of 276 scenes). The radiometric quality was analyzed based on the pixel reliability dataset available in the MOD13Q1 product. The performances of the three smoothing filters available within Timesat (double logistic, Savitzky-Golay and asymmetric Gaussian) were analyzed using the Graybill's F-test and Willmott statistics. Five percent of the Modis pixels from the study area were cloud-affected, almost all of which were from the rainy season. The double logistic filter presented the best performance.

Keywords: Remote sensing, vegetation cover, pixel reliability, Graybill, Willmott.

4.1 - INTRODUÇÃO

Alguns estudos têm utilizado imagens ópticas de satélites similares às séries do Landsat (resolução espacial ~ 20-30 metros e resolução temporal ~ 16-30 dias) para mapear a cobertura vegetal natural e antrópica do oeste da Bahia (MENKE et al., 2009; SILVA et al., 2010; SANO et al., 2011). Esses estudos têm-se baseado na análise de imagens monotemporais, isto é, uma única data de passagem para cada ano considerado. Tal abordagem apresenta certa dificuldade na discriminação das classes de cobertura vegetal dessa região por causa da acentuada sazonalidade climática e elevada dinâmica espaço-temporal de uso agrícola. Outros estudos no Cerrado (RATANA et al., 2005; NASCIMENTO e SANO, 2010; HERMUCHE e SANO, 2011) têm mostrado que o uso simultâneo de um conjunto de imagens obtidas em diferentes épocas do ano possui maior potencial para discriminar classes de cobertura vegetal representativas desse bioma.

Com o advento do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (Modis), séries temporais desse sensor começaram a ser utilizadas, por exemplo, em estudos de fenologia e discriminação de culturas agrícolas (SAKAMOTO et al., 2005; XAVIER et al., 2007; COUTO Jr. et al., 2012, 2013), discriminação de fitofisionomias do Cerrado (RATANA et al., 2005; CARVALHO Jr. et al., 2008) e estimativa de parâmetros biológicos de vegetação (XIAO et al., 2011). Esse sensor opera com 36 bandas espectrais, resoluções espaciais de 250, 500 e 1.000 metros, periodicidade de 1-2 dias e foi lançado a bordo das plataformas Terra e Aqua em 1999 e 2002, respectivamente (JUSTICE et al., 2002, SOARES et al., 2007), e continua em operação. Vários produtos *ready-to-use* (prontos para serem utilizados) desse sensor são disponibilizados gratuitamente na rede mundial de computadores, tais como reflectância de superfície (MOD09); temperatura de superfície (MOD11); índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI e índice de vegetação realçado – EVI (MOD13); e produtividade primária líquida (MOD17).

Uma das dificuldades relacionadas com o uso de séries temporais do Modis é a possível baixa qualidade radiométrica dos pixels. Um determinado pixel do Modis pode

apresentar forte interferência de cobertura de nuvens e/ou elevado ângulo de visada, reduzindo a sua qualidade radiométrica. A qualidade radiométrica dos produtos do Modis pode ser avaliada por meio de protocolos (ROY et al., 2002). Para os índices de vegetação do Modis, a qualidade radiométrica pode ser analisada por meio dos dados denominados *Pixel Reliability*, disponíveis nos produtos MOD13Q1 (Terra) e MOD13A1 (Aqua) (COLDITZ et al., 2008).

Outra dificuldade é a presença de ruídos nas séries temporais, os quais podem ser minimizados por meio de técnicas de suavização. Diversos autores têm proposto diferentes algoritmos. Por exemplo, Carvalho Jr. et al. (2006) e Couto Jr. et al. (2012) propuseram o uso combinado de filtro mediana e fração mínima de ruído (MNF). Bradley et al. (2007) empregaram a análise harmônica e *spline* para suavizar curvas espectrais originadas de dados de NDVI do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR). Lu et al. (2007) utilizaram a transformada de Wavelet para analisar a relação sinal/ruído em séries temporais de NDVI do Modis. Este método também foi utilizado por Freitas et al. (2011) para remover ruídos de séries temporais do índice de vegetação realçado-2 (EVI2). No filtro proposto por Wardlow et al. (2006), os valores dos índices de vegetação afetados por ruídos são identificados e, quando necessário, substituídos pelo menor valor adjacente.

Embora essas técnicas apresentem bom desempenho na suavização de séries temporais do Modis, elas apresentam certa dificuldade de implementação, principalmente para aqueles que não possuem conhecimento e experiência em linguagens de programação ou em programas computacionais de estatística, haja vista que o processamento das séries temporais compreende uma grande massa de dados e demanda de tempo. Uma alternativa é o uso do programa computacional Timesat (JÖNSSON e EKLUNDH, 2004), de domínio público, e que vem sendo utilizado por diversos pesquisadores (BECK et al., 2006; HEUMANN et al., 2007; HIRD e MCDERMID, 2009; Silva, 2012). Os objetivos desse estudo foram: analisar a qualidade radiométrica de séries temporais do MOD13Q1 do Oeste da Bahia; e analisar o desempenho do algoritmo Timesat na suavização de séries temporais do índice de vegetação realçado (EVI) do sensor Terra Modis para a área de estudo.

4.2 - MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo selecionada foi a Mesorregião do Extremo Oeste da Bahia (Figura 4.1), doravante chamada apenas Oeste da Bahia, localizada aproximadamente entre as coordenadas 10,05° e 15,30° de latitude sul e entre 43,25° e 46,70° de longitude oeste, caracterizada pelo clima tropical continental (Aw na classificação de Köppen). O Oeste da Bahia abrange uma área de aproximadamente 117 mil km², situa-se na margem esquerda do rio São Francisco, tendo como afluentes principais os rios Grande, Preto, Corrente e

Carinhanha (NOU e COSTA, 1994), além de ser uma região marcada pelos efeitos da sazonalidade climática. A área selecionada é formada por três microrregiões e 24 municípios: Baianópolis, Barreiras, Catolândia, Formosa do Rio Preto, Luís Eduardo Magalhães, Riachão das Neves e São Desidério (microrregião de Barreiras); Angical, Brejolândia, Cotegipe, Cristópolis, Mansidão, Santa Rita de Cássia, Tabocas do Brejo Velho e Wanderley (microrregião de Cotegipe); e Canápolis, Cocos, Coribe, Correntina, Jaborandi, Santa Maria da Vitória, Santana, São Félix do Coribe e Serra Dourada (microrregião de Santa Maria da Vitória).

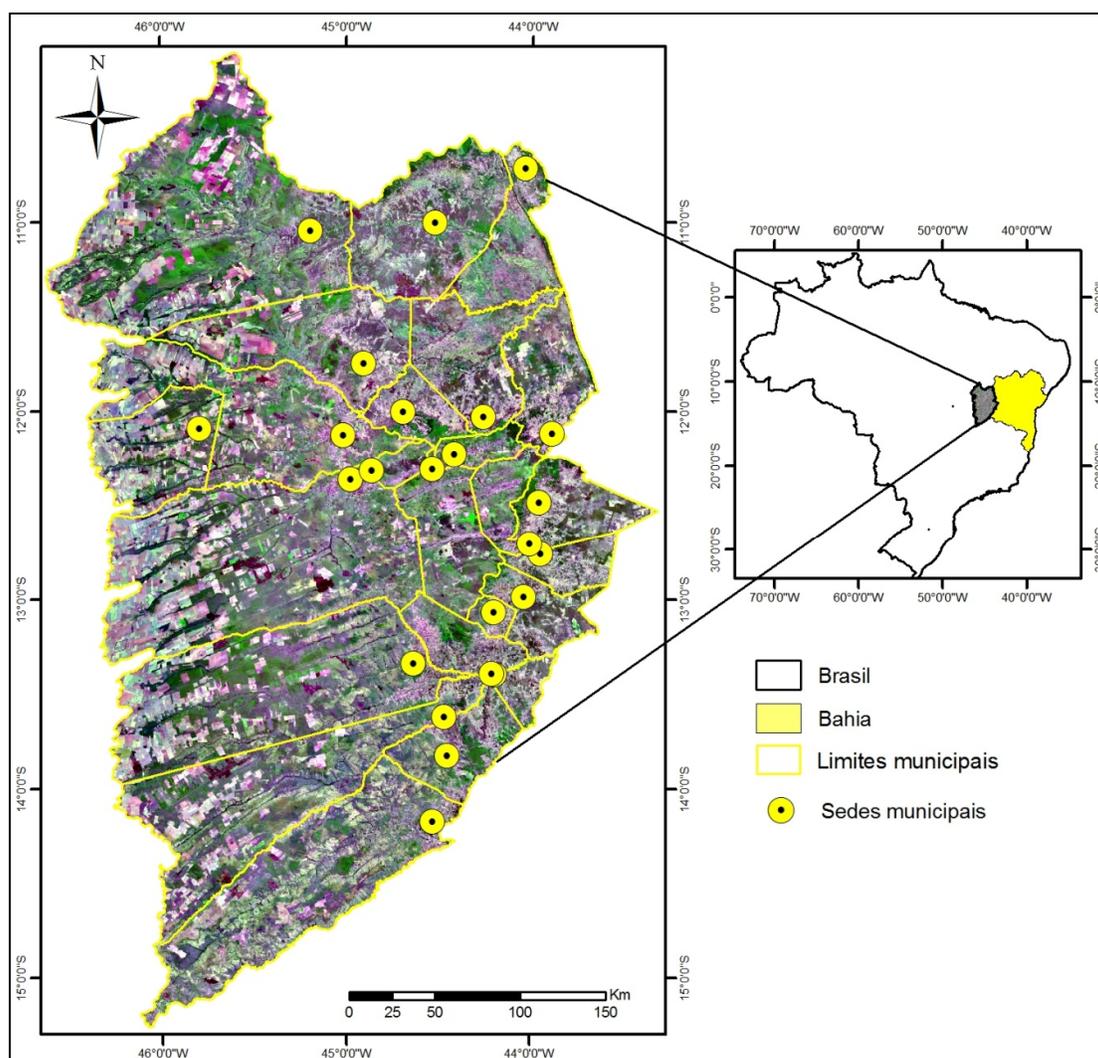


Figura 4.1 - Localização da área de estudo (Mesorregião do Extremo Oeste da Bahia) no estado da Bahia. A imagem da figura corresponde ao mosaico de imagens do satélite Landsat TM de 2008, composição colorida das bandas 3, 4 e 5 (canais azul, verde e vermelho, respectivamente).

O Oeste da Bahia está inserido no contexto do bioma Cerrado, o qual, segundo Fernandes (2006), é resultado de uma combinação de fatores climáticos, topográficos, hidrológicos e pedológicos que propiciou condições mesológicas favoráveis ao desenvolvimento de um mosaico de fitofisionomias, cujos aspectos vegetativos são bem marcantes e estreitamente relacionados, subordinados a um intenso processo de escleromorfismo, presente em suas formações florísticas bem caracterizadas. Conforme reportado por Asner (1998), a vegetação de Cerrado apresenta espectros com intensa variação entre os períodos de seca e de chuva, tanto em nível de constituintes biofísicos como bioquímicos. De acordo com os dados de precipitação da estação pluviométrica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no município baiano de Correntina (código da estação: 83286; latitude = -13,33°; longitude = -44,61°; elevação = 550 metros; período dos dados obtidos: 31 de janeiro de 1977 a 31 de março de 2013), a precipitação média anual situa-se em torno de 994 mm, com duas estações climáticas bem definidas (Figura 4.2): estação seca, que vai de meados de abril a final de setembro; e a estação chuvosa, que vai de início de outubro a meados de abril. A precipitação nos meses de junho, julho e agosto tem sido inferior a 1 mm.

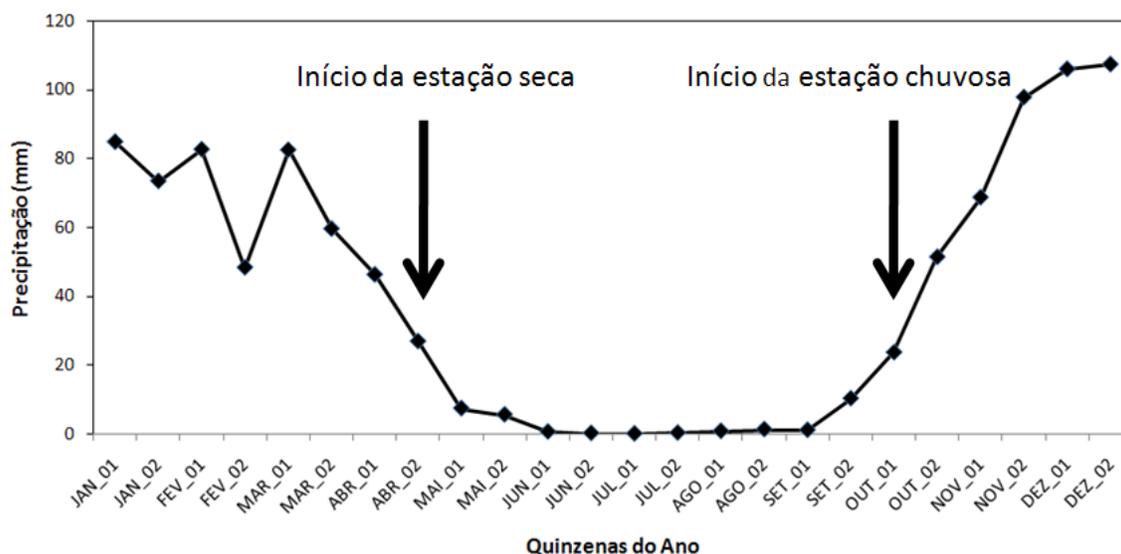


Figura 4.2 - Precipitação média quinzenal da área de estudo, representada pela estação pluviométrica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no município de Correntina. Período dos dados: 31 de janeiro de 1977 a 31 de março de 2013. Eixo X: JAN_01 = 1ª quinzena de janeiro; JAN_2 = 2ª quinzena de janeiro. Precipitação média anual = 994 mm.

Esse estudo foi baseado na análise dos produtos *Pixel Reliability* e *EVI* do MOD13Q1, coleção 5 (versão 4), *tile* h13v10, derivados dos dados diários de reflectância de

superfície (nível 2G de pré-processamento). Esses dados são disponibilizados com resolução espacial de 250 metros e periodicidade de 16 dias e foram obtidos da página eletrônica da Agência Espacial Norte-Americana (NASA) (<http://reverb.echo.nasa.gov>). Os dados, originalmente disponibilizados com a projeção sinusoidal e no formato *Hierarchical Data Format* (HDF), foram convertidos para o sistema de coordenadas geográficas por meio do programa *MODIS Reprojection Tool* (MRT). O período selecionado compreendeu uma série temporal de 12 anos: 2000 a 2011. Cada série anual é composta de 23 imagens, com exceção do ano de 2000, que é composto por 20 imagens (imagens do Terra/Modis começaram a ser disponibilizados a partir de fevereiro de 2000). Como o Timesat exige que a quantidade de imagens de cada ano da série temporal seja a mesma, as três primeiras cenas do ano de 2000 foram representadas pela cena de 16 de fevereiro desse mesmo ano. Desta forma, a série temporal analisada envolveu um total de 276 imagens.

Os dados de *Pixel Reliability* fornecem indicativos sobre a qualidade radiométrica dos índices de vegetação disponíveis (EVI e NDVI) no produto MOD13 (COLDITZ et al., 2008). Cada pixel é classificado em cinco categorias: -1 (sem dado), 0 (dado bom), 1 (dado marginal), 2 (neve/gelo) e 3 (nuvem). As imagens do *Pixel Reliability* foram recortadas para a área de estudo e os dados foram exportados para a planilha Microsoft Excel™ e analisados estatisticamente, discriminados por ano e por períodos seco e chuvoso. O EVI (HUETE et al., 2002) foi desenvolvido para realçar as respostas espectrais relacionadas com cobertura vegetal por meio de minimização dos efeitos de solos e atmosfera. Sua equação é dada por (Eq. 4.1):

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 * \rho_{RED} - C_2 * \rho_{BLUE} + L} \quad (4.1)$$

onde: ρ_{NIR} = fluxo radiante refletido no infravermelho próximo; ρ_{RED} = fluxo radiante refletido no vermelho; ρ_{Blue} = fluxo radiante refletido no azul; L = fator de ajuste do solo; C_1 e C_2 = coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis na atmosfera; G = fator de ganho; sendo: $C_1 = 6$; $C_2 = 7,5$; $L = 1$; e $G = 2,5$.

Em seguida, foram selecionados pontos representativos das seguintes classes de cobertura vegetal natural e antrópica nos municípios de Luís Eduardo Magalhães e Barreiras, com suporte de imagens do satélite TM/LANDSAT-5 (órbitas/pontos: 219-68, 219-69, 220-68, 220-69, 221-68; mosaico de imagens do mês de junho de 2010) e verificação de campo realizada em maio de 2012: Campo sujo, Cerrado ralo, Cerrado típico, Cerrado denso, Floresta estacional (semidecidual), Vegetação secundária, Cultura agrícola (de sequeiro, isto é, sem irrigação) e Pastagem cultivada. As quatro primeiras classes

correspondem a formações savânicas, são compostas por um mosaico de espécies arbustivas, arbóreas e campestres, com elevada sensibilidade à sazonalidade climática (RIBEIRO e WALTER, 2008). A Floresta estacional é composta principalmente por espécies arbóreas, podendo as copas das árvores cobrir mais de 90% da paisagem durante a estação chuvosa. A Vegetação secundária corresponde às áreas que foram desmatadas, mas que atualmente encontram-se em estágio regenerativo. A Cultura agrícola e a Pastagem cultivada representam os principais tipos de cobertura vegetal antrópica da região, tanto em termos de ocupação em área como em termos econômicos. As principais culturas agrícolas são a soja, o milho, o algodão e o milheto. A *Brachiaria* é a espécie de pastagem cultivada predominante na região de estudo.

Os pixels, cujas curvas espectro-temporais foram extraídas, localizam-se em áreas homogêneas e representativas das classes discriminadas e analisadas nessa pesquisa. As coordenadas geográficas dos oito pontos selecionados foram inseridas na plataforma de visualização instantânea de séries temporais desenvolvida por Freitas et al. (2011) e disponível na página eletrônica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os pixels que apresentavam misturas espectrais nítidas entre duas ou mais classes de cobertura vegetal nas imagens de satélite de alta resolução espacial (disponibilizadas no programa Google Earth™) foram desconsiderados e substituídos por outro pixel adjacente e “puro”.

As séries temporais de EVI dos pixels selecionados foram suavizadas pelos três métodos de remoção de ruídos disponíveis no programa Timesat: Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico. A Logística dupla corresponde a uma função harmônica polinomial e os parâmetros utilizados são restritos, por isso garantem uma forma suave às séries temporais (JÖNSSON et al., 2004). Savitzky-Golay é um método de filtragem adaptativa, baseado em média móvel e cujo valor da janela é pré-estabelecido conforme a natureza do ruído. Este método é considerado mais flexível em relação à suavização dos espectros temporais quando comparado aos demais filtros implementados no Timesat. O filtro Gaussiano assimétrico corresponde a um método mais restritivo, por isso é menos sensível ao ruído, o que possibilita a sua utilização quando há necessidade de se fazer ajustes mais incisivos nos dados.

Foram testados alguns parâmetros no Timesat objetivando eliminar os ruídos, representados pelos valores discrepantes (*outliers*, *hikes* e *drops*), de forma empírica, pois não há na literatura padronização destes valores, uma vez que eles dependem da natureza e intensidade de cada ruído (RAMME, 2010; SILVA, 2012). Os parâmetros utilizados para os três métodos foram: série temporal = 12 anos; quantidade de imagens por ano = 23; limite da amplitude (*cut-off*) = 0; *spike* = 3; adaptação = 3; e número de interações = 3.

As curvas temporais resultantes dos três métodos foram comparadas visualmente e estatisticamente, objetivando selecionar o método que realizou a melhor filtragem. As curvas extraídas da série temporal de EVI filtrado foram analisadas para avaliar a remoção dos ruídos. Para tanto, dois testes estatísticos foram realizados: o primeiro consistiu no teste F, proposto por Graybill (1976), o qual foi aplicado para testar a hipótese de igualdade dos três métodos de suavização.

O segundo teste utilizado foi o de Willmott (WILLMOTT, 1982), empregado para identificar o quanto cada curva espectro-temporal suavizada pelos métodos de Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico se aproxima da sua realidade terrestre, isto é, representa melhor a correspondente curva original de EVI. Para esse teste, foram considerados o coeficiente de correlação r (Eq. 4.2), o índice de Willmott d (Eq. 4.3) e o índice de desempenho c . A precisão dada pelo coeficiente de correlação entre os dados observados e os dados modelados oferece noções da dispersão das estimativas em relação à regressão linear dos dados (CAMARGO e SENTELHA, 1997; ANTONINI et al., 2010). O índice d de concordância de Willmott, resultante de uma aproximação matemática, avalia a exatidão e o afastamento dos valores simulados em relação aos valores observados. O valor zero significa nenhuma concordância e o valor 1 (um), concordância perfeita (WILLMOTT, 1982).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2) \sqrt{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)}} \quad (4.2)$$

onde: n = número total de observações; P_i = valor estimado; O_i = valor observado; e O = medida dos valores observados.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (4.3)$$

O índice c , proposto por Camargo e Sentelha (1997), é calculado multiplicando-se os índices r e d . Os valores resultantes do índice de desempenho c e do coeficiente de correlação r são interpretados por Camargo e Sentelha (1997) e Santos (2007), respectivamente (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Critério para classificação do índice de desempenho c e do coeficiente de correlação linear r .

ÍNDICE DE DESEMPENHO c	CLASSIFICAÇÃO	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO r	CLASSIFICAÇÃO (CORRELAÇÃO)
$> 0,85$	Ótimo	$r = 1,0$	Perfeita positiva
0,76 a 0,85	Muito bom	$0,8 \leq r < 1,0$	Forte positiva
0,66 a 0,75	Bom	$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada positiva
0,61 a 0,65	Mediano	$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca positiva
0,51 a 0,60	Sofrível	$0,0 \leq r \leq 0,1$	Muito fraca positiva
0,41 a 0,50	Ruim	$r = 0,0$	Nula
$\leq 0,40$	Péssimo	$-0,1 < r < 0,0$	Muito fraca negativa
		$-0,5 < r \leq -0,1$	Fraca negativa
		$-0,8 < r \leq -0,5$	Moderada negativa
		$-1,0 < r \leq -0,8$	Forte negativa
		$r = -1,0$	Perfeita negativa

Fonte: adaptada de Camargo e Sentelha (1997) e Santos (2007).

4.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 - Análise da confiabilidade dos dados do Modis EVI

Os resultados da análise da confiabilidade dos pixels em termos de sua qualidade radiométrica geral são indicados na Tabela 4.2. O ano de 2007 foi o que apresentou a melhor qualidade: 93% dos pixels foram classificados como bons, enquanto que 2009 foi o ano que apresentou o pior desempenho: 79% dos pixels classificados como bons. Na média, 83% dos pixels do Oeste da Bahia foram considerados bons, 12% foram considerados marginais e 5% apresentaram problemas de cobertura de nuvens. Houve indicação de que a qualidade radiométrica dos valores de EVI está diretamente relacionada com a sazonalidade climática: 99% dos valores de EVI provenientes da estação seca apresentaram qualidade boa, enquanto que, para a estação chuvosa, esse índice caiu para 71% (Tabela 4.3); 97,2% dos dados considerados marginais ocorreram na estação chuvosa, enquanto na estação seca, o índice foi de 2,8% (Tabela 4.4); e 97,1% dos pixels cobertos

por nuvem pertenceram à estação chuvosa, enquanto, na estação seca, a porcentagem foi de 2,9%.

Tabela 4.2 - Classificação (%) dos pixels do MOD13Q1 do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011 nas seguintes categorias: -1 (sem dado), 0 (dado bom), 1 (dado marginal), 2 (neve/gelo) e 3 (cobertos por nuvem).

ANO	CONFIABILIDADE (%)				
	-1	0	1	2	3
2000	0	79	10	0	11
2001	0	85	10	0	4
2002	0	83	12	0	5
2003	0	86	12	0	2
2004	0	84	10	0	6
2005	0	82	13	0	5
2006	0	80	14	0	6
2007	0	93	7	0	0
2008	0	85	8	0	6
2009	0	78	18	0	5
2010	0	86	11	0	3
2011	2	79	14	0	5
MÉDIA	0	83	12	0	5

Tabela 4.3 - Qualidade radiométrica (%) dos pixels de EVI do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011, discriminada segundo cinco parâmetros de qualidade: -1 = sem dados; 0 = dado bom; 1 = dado marginal; 2 = neve/gelo; e 3 = cobertura de nuvens.

PARÂMETRO	ESTAÇÃO SECA	ESTAÇÃO CHUVOSA
-1	0,0	0,3
0	98,9	71,3
1	0,8	20,2
2	0,0	0,0
3	0,3	8,2
TOTAL	100	100

Tabela 4.4 - Qualidade radiométrica (%) dos pixels de EVI do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011, discriminada por sazonalidade climática, conforme os parâmetros de qualidade: -1 = sem dados; 0 = dado bom; 1 = dado marginal; 2 = neve/gelo; e 3 = cobertura de nuvens.

PARÂMETRO	ESTAÇÃO SECA	ESTAÇÃO CHUVOSA	TOTAL
-1	0	100,0	100
0	52,0	48,0	100
1	2,8	97,2	100
2	0	100	100
3	2,9	97,1	100

Na Figura 4.3 é mostrada a distribuição espacial dos pixels cobertos por nuvens para o período de 2003 a 2011. Apenas aquelas cenas com maior porcentagem de pixels cobertos por nuvens de cada ano foram incluídas nessa figura. Dependendo do ano, a cobertura de nuvens pode ser muito intensa (por exemplo, a imagem do dia juliano 305 do ano 2000) ou pouco intensa (por exemplo, a imagem do dia juliano 337 do ano 2005), conforme se observa na Figura 4.3.

De uma forma geral, na maioria dos casos, a porção oeste da área de estudo parece ser um pouco mais afetada do que a porção leste. Essa situação torna-se mais séria quando o foco é o monitoramento da produção agrícola, uma vez que as áreas agrícolas mais extensas situam-se na porção oeste da área de estudo (SANO et al., 2011).

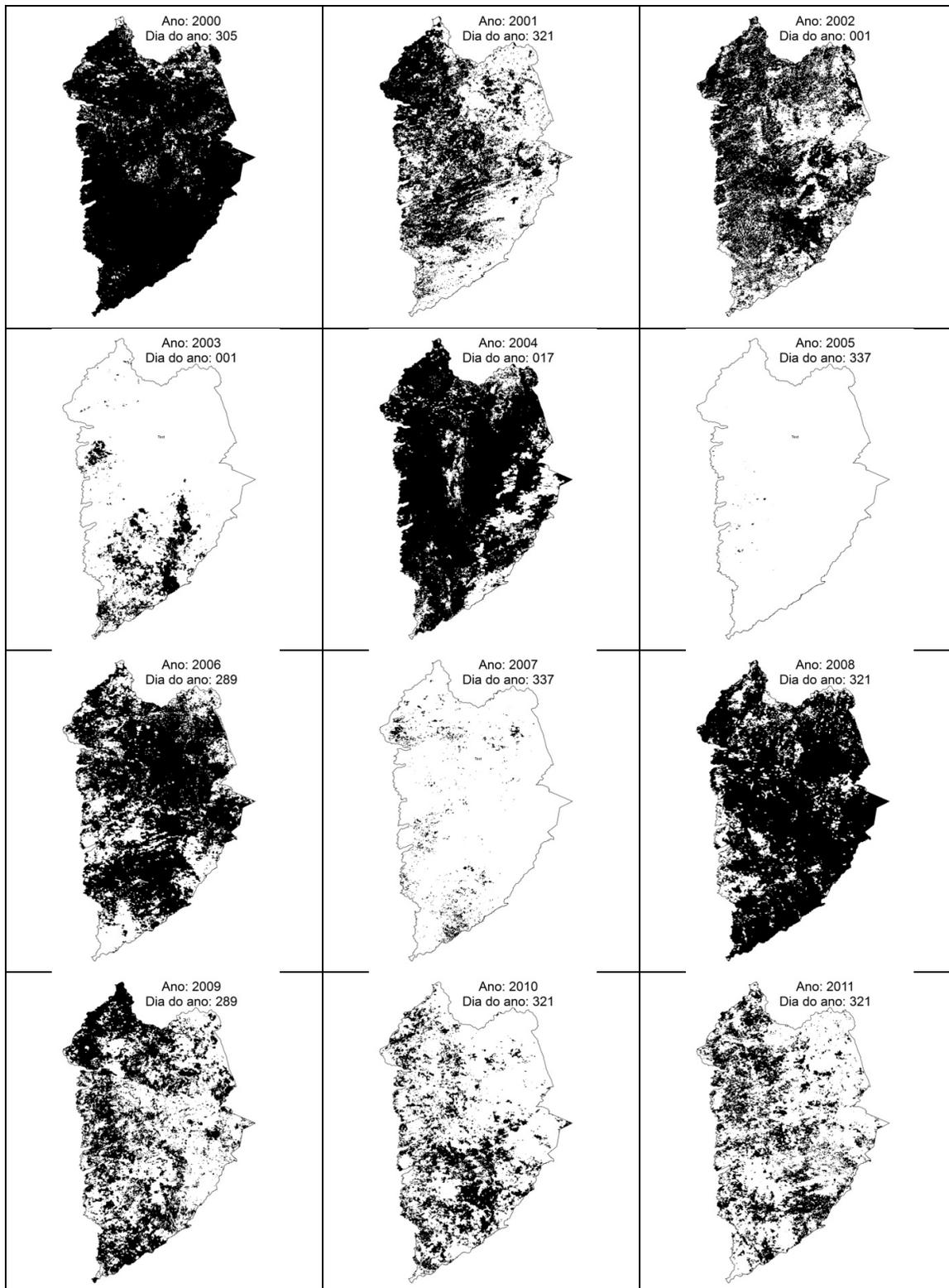


Figura 4.3 - Distribuição espacial de pixels cobertos com nuvens (em preto) na Mesorregião do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011 (uma cena por ano, selecionada com base na porcentagem mais alta de pixels cobertos com nuvens).

4.3.2 - Desempenho dos filtros do Timesat

A título de ilustração, na Figura 4.4 são mostradas as séries temporais típicas do Oeste da Bahia do Cerrado típico, da Floresta estacional, da Cultura agrícola e da Pastagem cultivada. Todas as quatro classes apresentam, em diferentes intensidades, interferência da sazonalidade climática. A Pastagem cultivada e o Cerrado típico apresentaram os valores mais baixos de EVI, enquanto a Floresta estacional e, principalmente, a Cultura agrícola apresentaram as maiores variações sazonais nos valores de EVI. Outro aspecto nítido na Figura 4.4, assim como na Figura 4.5, é a presença de ruídos nos valores de EVI, indicando a necessidade de suavizar as séries temporais do MOD13.

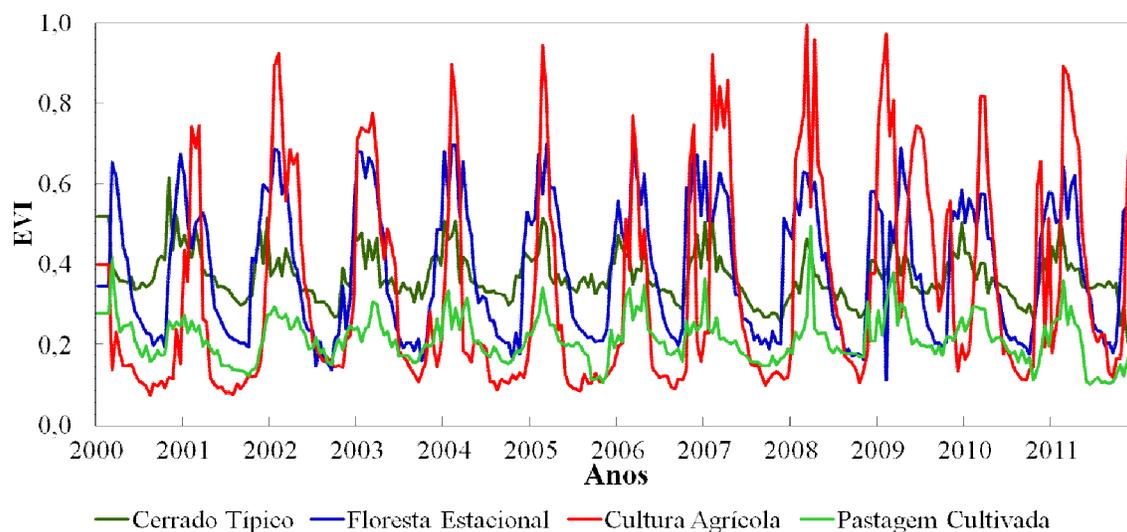


Figura 4.4 - Séries temporais (2000-2011) de índice de vegetação realçado (EVI) do oeste da Bahia, representativas de Cerrado típico, Floresta estacional, Cultura agrícola e Pastagem cultivada.

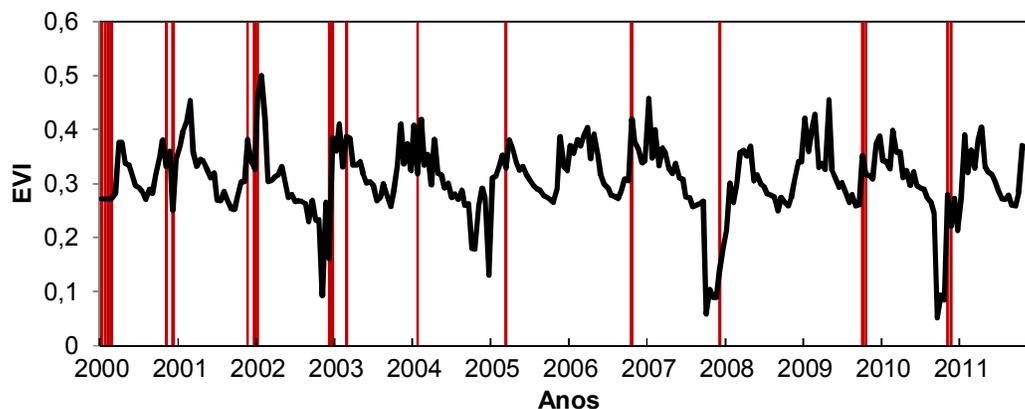


Figura 4.5 - Pixels afetados por nuvens (barras vermelho) e espectro temporal de EVI (2000 a 2011) do Cerrado típico (em preto)

Na Figura 4.6, também a título de ilustração, é mostrado o desempenho dos três filtros do Timesat na suavização de séries temporais de Campo sujo e Cultura agrícola. Analisando-se visualmente essas curvas, pode-se deduzir que, para o Campo sujo, a Logística dupla e o Savitzky-Golay apresentaram suavizações satisfatórias, enquanto o Gaussiano assimétrico apresentou uma suavização exagerada para os dados da estação chuvosa (valores mais elevados de EVI). Contudo, para a classe Cultura agrícola, o filtro Gaussiano assimétrico apresentou suavização considerável e o filtro de Logística dupla provocou um “alisamento” maior no espectro temporal, principalmente nos anos de 2004, 2006, 2009 e 2010. De acordo com Eklundh e Jönsson (2012), esse resultado é inerente ao método de filtragem.

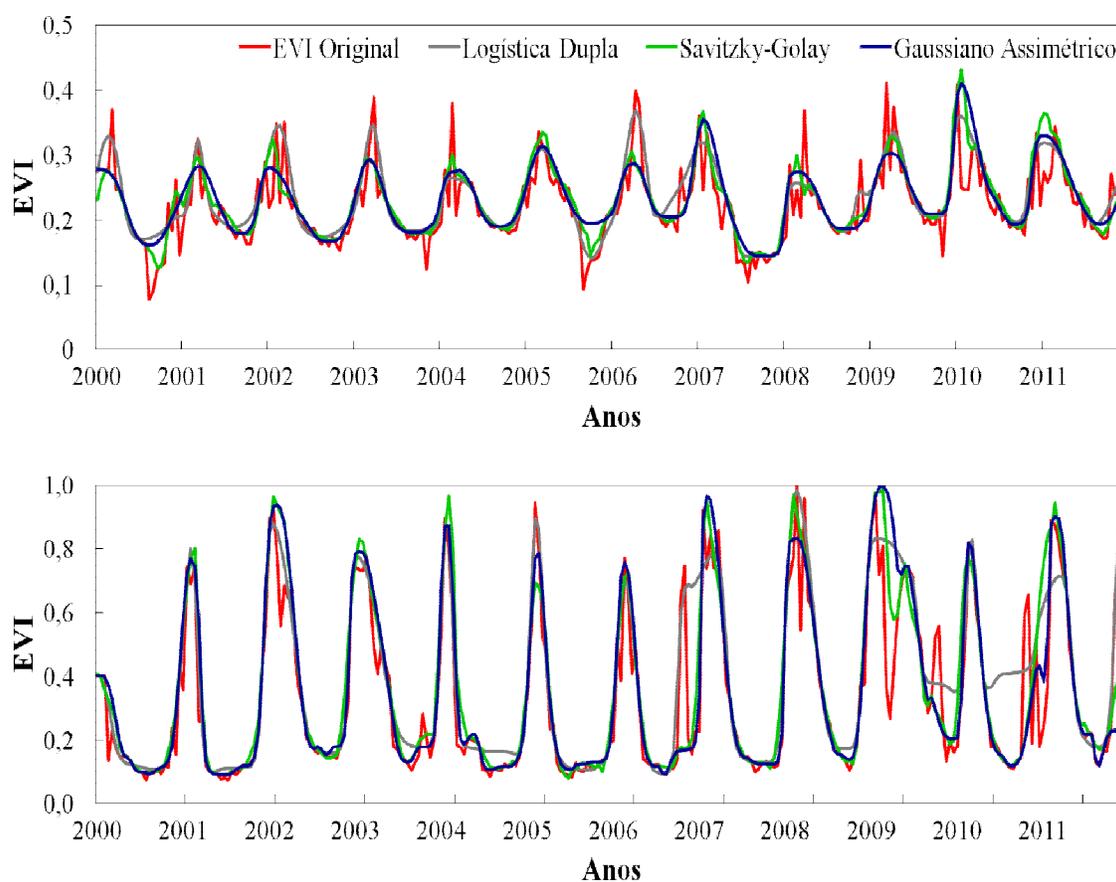


Figura 4.6 - Séries temporais (2000-2011) de índice de vegetação realçado (EVI) do oeste da Bahia, representativas de Campo sujo (a) e Cultura agrícola (b), suavizadas pelos filtros Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico.

Baseado na análise dessa última figura, pode-se dizer que existe indicação de que o desempenho de um determinado filtro é dependente da classe temática considerada. De forma geral, o desempenho de um filtro específico pode ser classificado como insatisfatório quando há perda evidente de informação original, o que pode ser observado na redução drástica de valores mais altos de EVI na estação chuvosa (Campo sujo; Gaussiano assimétrico) ou na junção de dois cultivos sucessivos na mesma estação chuvosa (por exemplo, plantio de milho logo após a colheita de soja ou plantio de milho safrinha logo após o plantio de soja) (Cultura agrícola; Logística dupla). Por outro lado, pode-se dizer ainda que a escolha do filtro com melhor desempenho baseado apenas na análise visual de gráficos de dispersão é uma tarefa complexa. Tal situação se repete para as outras classes.

Na Figura 4.7 são mostrados os resultados estatísticos e os diagramas de dispersão relativos ao teste F de Graybill, cuja hipótese testada consistiu na igualdade das curvas suavizadas pelos diferentes métodos de filtragem. Para o Campo sujo (Figura 4.7a), as três retas mostraram-se diferentes. Os métodos de Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico apresentaram as correlações mais elevadas ($R^2 = 0,63$ e $0,60$, respectivamente) em relação ao método de Logística dupla ($R^2 = 0,55$). Para o Cerrado ralo (Figura 4.7b), as três retas são similares entre si. O índice de concordância foi ligeiramente maior para o método de Logística dupla ($R^2 = 0,72$). Para o Cerrado típico, os três modelos diferiram entre si. A correlação mais elevada ($R^2 = 0,77$) foi obtida para o método de Logística dupla (Figura 4.7c).

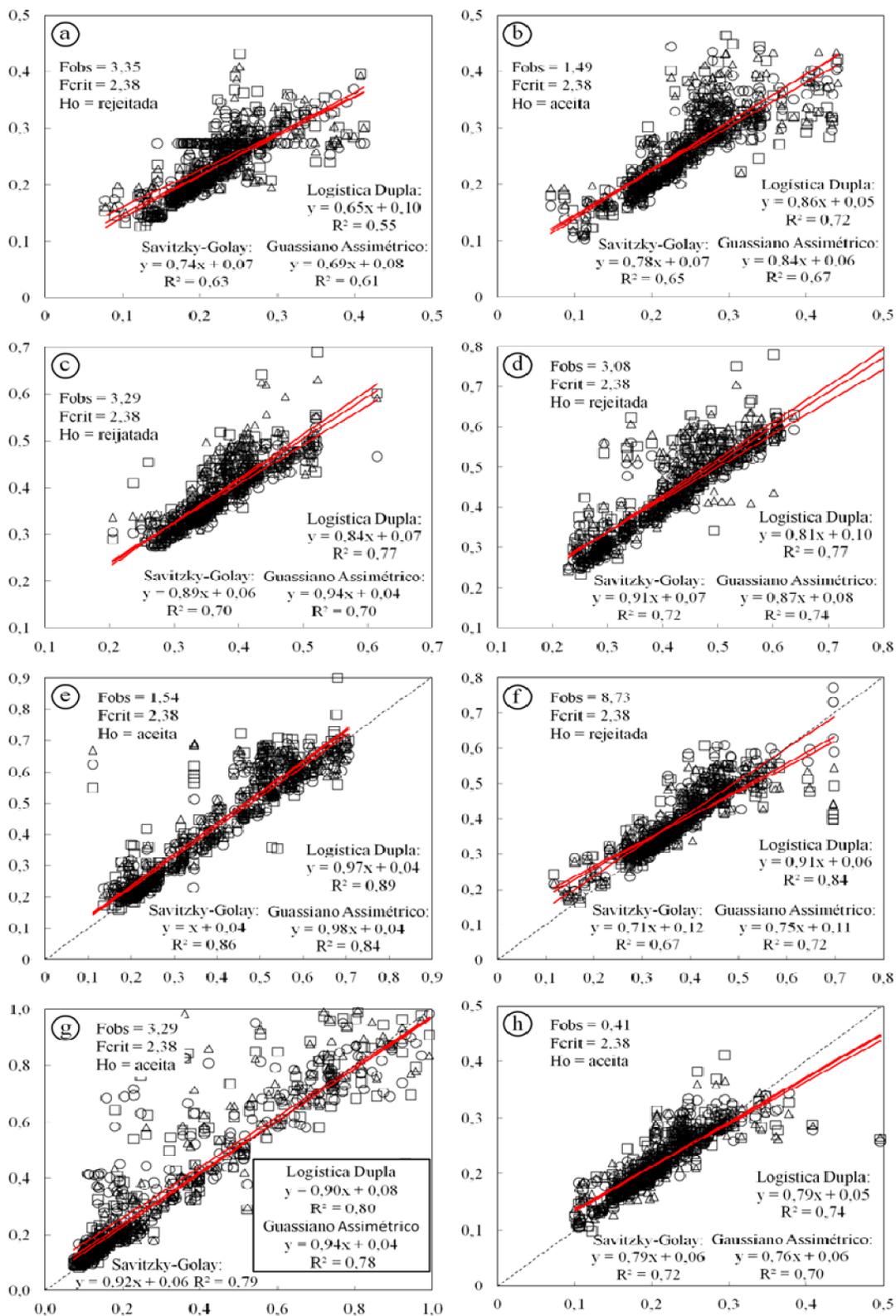


Figura 4.7 - Resultado do teste de Graybill para os filtros de Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico para as classes de Campo sujo (a), Cerrado ralo (b), Cerrado típico (c), Cerrado denso (d), Floresta estacional (e), Vegetação secundária (f), Cultura agrícola de sequeiro (g); e Pastagem cultivada (h).

O teste F de Graybill para o Cerrado denso (Figura 4.7d) apontou diferenças na comparação das retas resultantes dos três métodos de suavização, sendo a correlação ($R^2 = 0,77$) mais elevada obtida pelo método de Logística dupla. As retas foram similares para a Floresta estacional, sendo que a correlação ($R^2 = 0,89$) mais elevada foi observada para o método de Logística dupla (Figura 4.7e). Para a Vegetação secundária, as retas demonstraram ser diferentes entre si, sendo a maior correlação ($R^2 = 0,84$) obtida para o método de Savitzky-Golay (Figura 4.7f). Para a Cultura agrícola, os resultados da suavização foram similares, sendo a correlação ($R^2 = 0,80$) mais elevada observada para o método de Logística dupla (Figura 4.7g). Finalmente, as retas foram similares para a classe de Pastagem cultivada (Figura 4.7h). A maior correlação ($R^2 = 0,74$) resultou novamente do método de Logística dupla.

O teste Willmott aplicado aos dados de EVI representativos do Campo Sujo demonstrou que o método de Logística dupla (Figura 4.8: a1) apresentou um índice de desempenho de 0,75, o que é interpretado de acordo com a Tabela 4.1 como “muito bom”. Em contrapartida, os métodos de Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico (Figura 4.8: a2 e a3, respectivamente) apresentaram valores pouco menores para este índice, cujos resultados foram classificados como “bom”. O coeficiente de correlação de Pearson e o índice de Willmott foram mais elevados para o método de Logística dupla ($r = 0,84$), considerado de correlação forte positiva e a concordância foi elevada ($d = 0,90$). Para o Cerrado ralo, os três métodos utilizados (Figura 4.8: b1, b2 e b3) apresentaram o índice de desempenho c considerado “bom” (Logística dupla = 0,75; Savitzky-Golay = 0,71 e Gaussiano assimétrico = 0,71). Quanto ao coeficiente de correlação, o resultado correspondeu à correlação forte positiva para os três métodos (Logística dupla = 0,85; Savitzky-Golay = 0,81 e Gaussiano assimétrico = 0,81). Todavia, para o método de Logística dupla, tanto o índice de desempenho quanto a correlação apresentaram valores relativamente maiores, o que revela maior precisão para este método.

O resultado do teste Willmott para a classe Cerrado típico revelou um índice de desempenho de 0,73 para Logística dupla, 0,66 para Savitzky-Golay e 0,65 para Gaussiano assimétrico (Figura 4.8: c1, c2 e c3, respectivamente). A maior correlação foi para o método de Logística dupla, cujo valor foi de 0,87. Para os outros dois métodos, a correlação foi de 0,83, porém, os valores destas para os três métodos são considerados de correlação forte positiva. O índice de desempenho que apresentou maior confiança foi o da Logística dupla ($d = 0,83$).

Os suavizadores das curvas de EVI para o Cerrado denso (Figura 4.8: d1, d2 e d3) demonstraram índice de desempenho maior para Logística dupla ($c = 0,75$), valor este interpretado como “bom”. Apesar de relativamente menores, os resultados deste índice para os métodos de Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico também foram considerados “bons”.

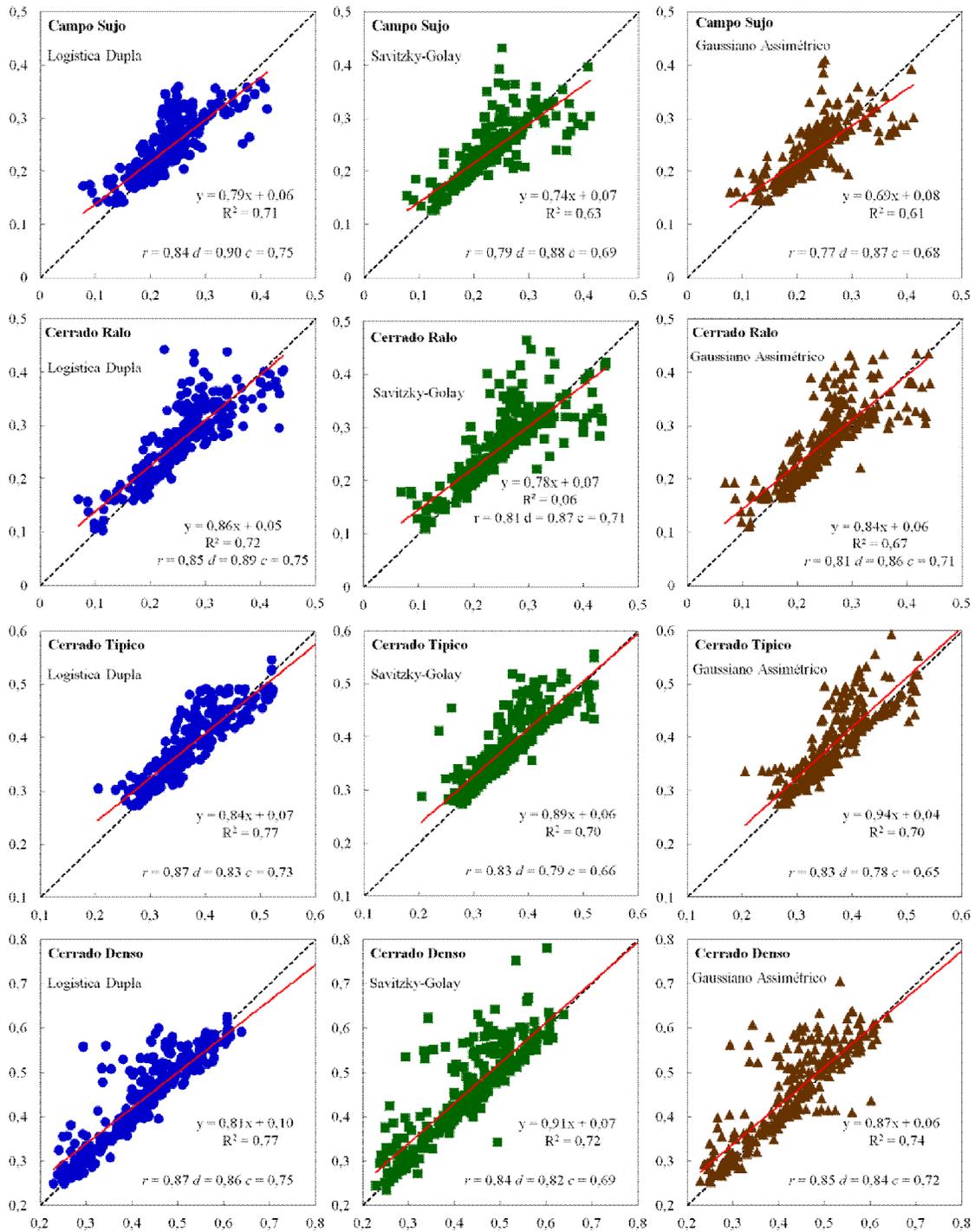


Figura 4.8 (parte 1) - Resultado do teste de Willmott para os filtros de Logística Dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico, respectivamente, para as classes de Campo sujo (a1, a2 e a3); Cerrado ralo (b1, b2 e b3); Cerrado típico (c1, c2 e c3) e Cerrado denso (d1, d2 e d3).

O coeficiente de correlação de Pearson e o índice de concordância de Willmott também foram relativamente maiores para os dados modelados pela função de Logística dupla, fatores estes que implicam em precisão e exatidão relativamente maiores para este método.

A exatidão inferida por meio do índice de concordância de Willmott variou de forma semelhante para os três métodos de filtragens utilizados para suavizar das curvas de EVI na classe de Floresta estacional (Figura 4.8: e1, e2 e e3). Os valores de d foram de 0,92 para o método de Logística dupla e de 0,89 para Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico. Apesar disso, o índice de desempenho foi mais expressivo para o método de Logística dupla que obteve um valor de 0,87, interpretado como “ótimo”, e de 0,82 e 0,83 para Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico, respectivamente, considerados como “muito bons”. Quanto à precisão, o coeficiente r para os três métodos foi superior a 0,9, o que demonstrou correlação forte positiva.

Para a Vegetação secundária (Figura 4.8: f1, f2 e f3), a precisão avaliada pelo coeficiente de correlação foi mais elevada para o método de Logística dupla, mas para os três métodos esta foi considerada como tendo correlação forte positiva, pois para todos os métodos foi superior a 0,82, destacando que, para a Logística dupla, foi de 0,91. A exatidão por meio do coeficiente de Willmott também foi elevada para os três métodos utilizados, com destaque para o filtro de Logística dupla. Quanto ao índice de desempenho c , o método de Logística dupla apresentou resultado “muito bom”, enquanto os suavizadores Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico apresentaram resultados considerados como “bons” (Figura 4.8: f1, f2 e f3).

Os índices e coeficientes resultantes dos três métodos de suavização indicaram alta concordância entre os dados modelados e os observados para a classe Cultura agrícola (Figura 4.8: g1, g2 e g3). A precisão definida pela correlação de Pearson foi forte positiva para os todos os três suavizadores, indicando baixa dispersão. A exatidão inferida por meio do coeficiente de Willmott foi de 0,91 para todos os métodos. O índice de desempenho pouco variou, sendo considerado “muito bom” nos três filtros utilizados.

Para a classe Pastagem cultivada (Figura 4.8: h1, h2 e h3), os três métodos de filtragem apresentaram valores bastante aproximados para todos os coeficientes e índices. Todavia, os maiores resultados referentes à precisão, exatidão e índice de desempenho foram encontrados para o método de Logística dupla ($r = 0,86$; $d = 0,92$; e $c = 0,79$), fato que destaca este filtro em relação aos demais.

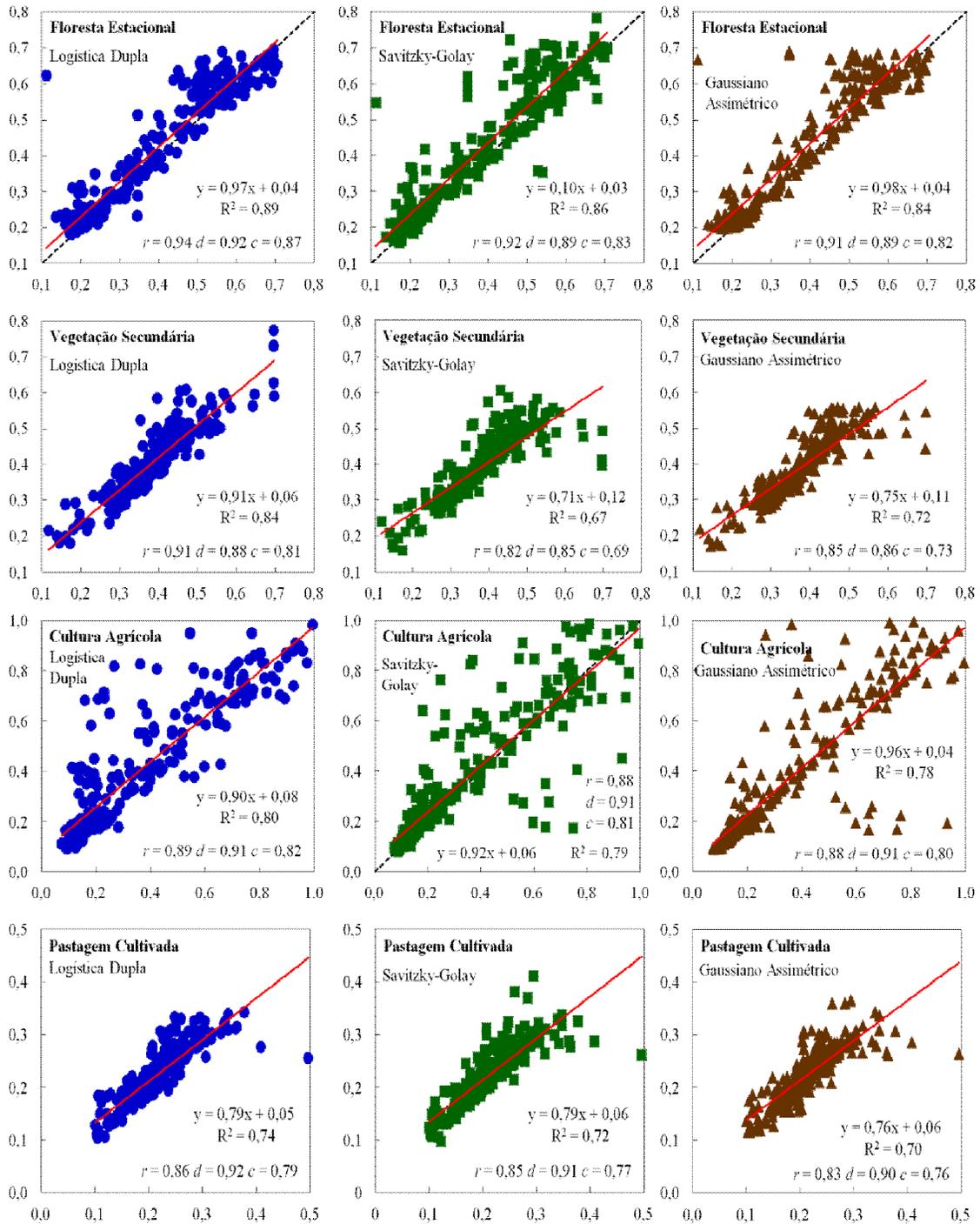


Figura 4.8 (continuação) - Resultado do teste de Willmott para os filtros de Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico, respectivamente, para as classes de Floresta estacional (e1, e2 e e3); Vegetação secundária (f1, f2 e f3); Cultura agrícola (g1, g2 e g3) e Pastagem cultivada (h1, h2 e h3).

No caso das classes naturais, a variação nos resultados apresentados pelos três suavizadores foi relativamente grande, ao contrário do que aconteceu com as classes antrópicas (Cultura agrícola e Pastagem cultivada), cujos valores encontrados pelos índices e coeficientes apresentaram diferenças relativamente pequenas (Tabela 4.5). Independentemente da classe de cobertura vegetal analisada e do tipo de filtro, houve uma tendência geral dos suavizadores superestimarem valores mais baixos de EVI (\sim EVI < 0,3, Figura 4.8). Talvez a única exceção foi a Floresta estacional (e1, e2 e e3), onde a superestimativa foi verificada para todo o intervalo do EVI. Os resultados dos testes Graybill e Willmott para os espectros representativos das classes analisadas estão sintetizados na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 - Síntese dos resultados obtidos pelos métodos de filtragem de Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico. r = coeficiente de correlação; d = índice de Willmott; c = índice de desempenho.

CLASSES/ FILTROS	LOGÍSTICA DUPLA			SAVITZKY- GOLAY			GAUSSIANO ASSIMÉTRICO		
	r	d	c	r	d	c	r	d	c
Campo sujo	0,84	0,90	0,75	0,79	0,88	0,69	0,77	0,87	0,68
Cerrado ralo	0,85	0,89	0,75	0,81	0,87	0,71	0,81	0,86	0,71
Cerrado típico	0,87	0,83	0,73	0,83	0,79	0,66	0,83	0,78	0,65
Cerrado denso	0,87	0,86	0,75	0,84	0,82	0,69	0,85	0,84	0,72
Floresta estacional	0,94	0,92	0,87	0,92	0,89	0,83	0,91	0,89	0,82
Vegetação secundária	0,91	0,88	0,81	0,82	0,85	0,69	0,85	0,86	0,73
Cultura agrícola	0,89	0,91	0,82	0,88	0,91	0,81	0,88	0,91	0,80
Pastagem cultivada	0,86	0,92	0,79	0,85	0,91	0,77	0,83	0,90	0,76

Tabela 4.6 - Interpretação dos resultados obtidos pelos testes estatísticos de Graybill e Willmott para os filtros de Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico.

CLASSE	GRAYBILL	WILLMOTT		
		LOGISTICA DUPLA	SAVITZKY- GOLAY	GAUSSIANO ASSIMÉTRICO
Campo sujo	Diferente	Muito bom	Bom	Bom
Cerrado ralo	Semelhante	Muito bom	Bom	Bom
Cerrado típico	Diferente	Bom	Bom	Bom
Cerrado denso	Diferente	Muito bom	Bom	Bom
Fl. estacional	Semelhante	Ótimo	Muito bom	Muito bom
Veg. secundária	Diferente	Muito bom	Bom	Bom
Cultura agrícola	Semelhante	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Pastagem cultivada	Semelhante	Muito bom	Muito bom	Muito bom

4.4 - CONCLUSÃO

Cinco por cento dos pixels do Modis do Oeste da Bahia no período de 2000 a 2011 estiveram cobertos por nuvens, praticamente todos eles provenientes da estação chuvosa. O teste de Graybill indicou que 50% das classes apresentaram espectro-temporais semelhantes e 50% diferentes. Salienta-se que os resultados que apontaram para rejeição da hipótese nula também foram considerados no teste de Willmott. Nesse os coeficientes de correlação, concordância e desempenho foram mais elevados para o filtro de Logística dupla. Por isso na suavização de séries temporais do MODIS EVI dessa região pelo programa TIMESAT, recomenda-se o método da Logística dupla.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UFBA e à UEFS, instituições de vínculo da primeira autora durante a pesquisa, pela viabilização desse estudo. Os autores são gratos ainda à Embrapa Cerrados, pelo apoio logístico e ao seu servidor Heleno Bezerra pelo apoio ao trabalho de campo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fornecimento de bolsa de pesquisa ao segundo autor.

REFERÊNCIAS

- ASNER G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, p. 234-253, 1998.
- BECK, S. A.; ATZBERGER, C.; HOGDA, K. A.; JOHANSEN, B.; SKIDMORE, A. K. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 321-334, 2006.
- BRADLEY, B. A.; JACOB, R. W.; HERMANCE, J. F.; MUSTARD, J. F. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 2, p. 137-145, 2007.
- CAMARGO, Â. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO Jr., O. A.; HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F. Identificação regional da floresta estacional decidual na bacia do Rio Paranã a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 319-332, 2006.
- CARVALHO Jr., O. A.; SAMPAIO, C. S.; SILVA, N. C.; COUTO Jr., A.F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, p. 505-517, 2008.
- COLDITZ, R. R.; CONRAD, C.; WEHRMANN, T.; SCHMIDT, M.; DECH, S. Analysis of the quality of collection 4 and 5 vegetation index time series from MODIS. In: Stein, A.; Shi, W.; Bijker, W. (Org.). **Quality Aspects in Spatial Data Mining**. Boca Raton, Florida: Editora CRC Press, 2008, p. 161-173.
- COUTO Jr., A. F.; CARVALHO Jr., O. A.; MARTINS, E. S. Séries temporais MODIS aplicadas em sucessão de culturas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e milho (*Zea mays* L.) em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, p. 405-418, 2012.
- COUTO Jr., A. F.; CARVALHO Jr., O. A.; MARTINS, E. S. Séries temporais de NDVI, EVI e NDWI do sensor MODIS para caracterização fenológica do algodão. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 1, p. 199-210, 2013.
- EKLUNDH, L., JÖNSSON, P. **Timesat 3.1: Software Manual**. Lund University and Malmö University, Sweden, 2012, 82p.
- FERNANDES, A. **Fitogeografia brasileira: províncias florísticas**. Fortaleza: Realce, 2006, 202p.
- FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, p. 57-64. 2011.
- GRAYBILL, F. A. **Theory and application of the linear model**. Belmont: Duxbury, 1976, 704 p.

HERMUCHE, P. M.; SANO, E. E. Identificação da floresta estacional decidual no Vão do Paranã, Estado de Goiás, a partir da análise da reflectância acumulada de imagens do sensor ETM+/Landsat-7. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n. 3, p.415-425, 2011.

HEUMANN, B.; SEAQUIST, J.; EKLUNDH, L.; JONSSON, P. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 4, p. 385-392, 2007.

HIRD, J.; MCDERMID, G. J. Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 1, p. 248-258, 2009.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT: a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 1, p. 833-845, 2004.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3-15, 2002.

Lu, X.; LIU, R.; LIU, J.; LIANG, S. Removal of noise by wavelet method to generate high quality temporal data of terrestrial MODIS products. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 10, p. 1-11, 2007.

MENKE, A. B.; CARVALHO Jr., O. A.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luís Eduardo Magalhães – Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 3, p. 315-326, 2009.

NASCIMENTO, E. R. P.; SANO, E. E. Identificação de Cerrado Rupestre por meio de imagens multitemporais do Landsat: proposta metodológica. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 1, p. 93-106, 2010.

NOU, E. A. V.; COSTA, N. L. D. A. **Diagnóstico da qualidade ambiental da bacia do rio São Francisco. Sub-bacias do Oeste Baiano e Sobradinho**. Rio de Janeiro: IBGE, 111 p., 1994 (Série Estudos e Pesquisas em Geociências, 2.).

RAMME, F. L. P.; LAMPARELLI, R. A.; ROCHA, J. V. Perfis temporais NDVI MODIS, na cana-soca, de maturação tardia. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 480-494, 2010.

RATANA, P.; HUETE, A. R.; FERREIRA, L. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. **Earth Interactions**, v.9, n. 3, p. 1-22, 2005.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano, S.M.; Almeida, S.P.; Ribeiro, J.F. **Cerrado: Ecologia e Flora**. Planaltina: Embrapa Cerrados; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, Cap. 6, p. 151-199, 2008.

ROY, D. P.; BORAK, J. S.; DEVADIGA, S.; WOLFE, R. E.; ZHENG, M.; DESCLOITES, J. The MODIS land product quality assessment approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 62-76, 2002.

SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M.; TORITANI, H.; SHIBAYAMA, M.; ISHITSUKA, N.; OHNO, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p. 366-374, 2005.

SANO, E. E.; SANTOS, C. C. M.; SILVA, E. M.; CHAVES, J. M. Fronteira agrícola do oeste baiano: considerações sobre os aspectos temporais e ambientais. **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 479-489, 2011.

SANTOS, C. **Estatística Descritiva: Manual de autoaprendizagem**. Lisboa: Edições Silabo, 2007, 264p.

SILVA, L. A. P. T. **Utilização de técnicas de detecção remota em viticultura**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Ciências Agrárias, Universidade dos Açores. 2012, 50p.

SILVA, G. B. S.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ADAMI, M.; SANO, E. E. Discriminação da cobertura vegetal do Cerrado matogrossense por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 2, p. 186-194, 2010.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e Descrição. In: Rudorff, B.F.T.; Shimabukuro, Y.E.; Ceballos, J.C. (Org.). **O Sensor Modis e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, p. 3-22, 2007.

WARDLOW, B. D.; KASTENS, J. H.; EGBERT, S. L. Using USDA crop progress data and MODIS time-series NDVI for regional-scale evaluation of greenup onset date. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n. 11, p. 1225-1234, 2006.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

XAVIER, A. C.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BERKA, L. M. S.; MOREIRA, M. A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 755-768, 2007.

XIAO, Z.; LIANG, S.; WANG, J.; JIANG, B.; LI, X. Real-time retrieval of leaf area index from MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 97-106, 2011.

5- SÉRIES TEMPORAIS DE EVI DO MODIS PARA O MAPEAMENTO DE COBERTURA VEGETAL NATURAL E ANTRÓPICA DO OESTE DA BAHIA

Artigo submetido à revista Boletim de Ciências Geodésicas

5 - SÉRIES TEMPORAIS DE EVI DO MODIS PARA O MAPEAMENTO DE COBERTURA VEGETAL NATURAL E ANTRÓPICA DO OESTE DA BAHIA

RESUMO

Séries temporais têm possibilitado a identificação de mudanças no uso do solo e a discriminação de fitofisionomias. Este estudo objetivou utilizar séries temporais de índice de vegetação realçado (EVI) da plataforma Terra Modis, filtradas pelas técnicas de Logística dupla e fração mínima de ruído (MNF) e classificadas pelo algoritmo *spectral angle mapper* (SAM) para mapear a cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia. Curvas espectro-temporais representativas das classes Campo sujo, Cerrado ralo, Cerrado típico, Cerrado denso, Floresta estacional, Mata seca, Vegetação secundária, Cultura agrícola e Pastagem cultivada foram utilizadas como membros de referência na aplicação do algoritmo SAM. A acurácia do mapeamento foi analisada por meio de imagens do satélite RapidEye e estatística Kappa. O filtro de Logística dupla e a MNF reduziram significativamente os ruídos presentes nas imagens. A classificação discriminou as classes supracitadas (índice Kappa = 0,8), todavia, baseado em dados anteriores disponíveis na literatura, houve subestimação da Pastagem cultivada e superestimação do Cerrado típico. Esse estudo permitiu demonstrar o potencial de séries espectro-temporais do sensor Modis para discriminar classes de cobertura vegetal natural e antrópica representativas do Oeste da Bahia.

Palavras-chave: Índice de vegetação; Cerrado; Curvas espectro-temporais; *Spectral angle mapper*.

ABSTRACT

Temporal series have enabled the identification of changes in land use and the discrimination of phytophysionomies. This study aimed to use time series of enhanced vegetation index (EVI) of Terra Modis platform, filtered by the Double logistics and minimum noise fraction (MNF) algorithms and classified by the spectral angle mapper (SAM) technique to map the land use and land cover (LULC) classes from western Bahia. Representative spectro-temporal curves of shrub Cerrado (Campo sujo), sparse Cerrado (Cerrado ralo), typical Cerrado, dense Cerrado, Seasonal forest, Dry forest, Secondary vegetation, Croplands and Pasturelands were used as reference members in applying the SAM algorithm. The accuracy of mapping was analyzed by RapidEye satellite images and Kappa index. The Double logistics and the MNF filters reduced significantly the noise in the images.

The classification discriminated all LULC classes (Kappa index = 0.8), however, there were, according to data available in the literature, underestimation of pasturelands and overestimation of typical Cerrado. This study has demonstrated the potential of spectro-temporal series of Modis sensor to discriminate representative LULC classes of western Bahia.

Keywords: Vegetation index; Cerrado; Spectro-temporal curves; *Spectral angle mapper*.

5.1 - INTRODUÇÃO

A mesorregião do Extremo Oeste da Bahia, pertencente ao bioma Cerrado (mosaico de formações campestres, savânicas e florestais) (RIBEIRO e WALTER, 2008), é marcada pela expansão da fronteira agrícola, principalmente a partir da década de 1980 (MENKE et al., 2009; SANO et al., 2011; FLORES et al., 2012; SANTOS et al., 2012). Até o início da década de 1980, as áreas antropizadas dessa região se restringiam basicamente à pecuária extensiva e à agricultura familiar. Atualmente é uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil em termos de produção de grãos, notadamente soja, milho e algodão, para exportação.

O Oeste da Bahia destaca-se de outras regiões do bioma Cerrado pelo fato da agricultura de sequeiro não ter substituído, de forma determinante, áreas degradadas de pastagens cultivadas. De forma geral, as pastagens cultivadas ocorrem na porção leste da área de estudo, em terrenos relativamente ondulados e com precipitação média anual inferior a 1.000 mm (por exemplo, município de Brejolândia, precipitação média anual = 942 mm) (SEI, 1999). As culturas agrícolas ocupam predominantemente a porção oeste da área de estudo, onde os terrenos são planos (chapadões) e a precipitação média anual é superior a 1.000 mm (por exemplo, município de São Desidério, precipitação média anual = 1.182 mm) (SEI, 1999).

A expansão da fronteira agrícola nessa região tem sido analisada, principalmente, com base em imagens dos satélites Landsat, Alos e CBERS (uma cena por ano e por órbita/ponto) (MENKE et al., 2009; SANO et al., 2011). O uso de imagens monotemporais nessa área de estudo apresenta limitações por causa da sazonalidade climática marcante e da dinâmica espaço-temporal acentuada em termos de ocupação agrícola. As áreas agrícolas e os remanescentes de fitofisionomias de Cerrado do Oeste da Bahia podem ser monitorados ainda por meio de séries temporais do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (Modis) que se encontra a bordo das plataformas Terra e Aqua. Esse sensor adquire imagens da superfície da Terra a cada 1-2 dias (JUSTICE et al., 2002; SOARES et al., 2007), permitindo uma melhor análise da dinâmica da cobertura vegetal

natural e antrópica da área de estudo (ANDERSON et al., 2005; WARDLOW et al., 2007; ANJOS et al., 2013). O Modis disponibiliza, gratuitamente na rede mundial de computadores, vários produtos denominados *ready-to-use* (prontos para uso), sendo um deles, o índice de vegetação realçado (EVI), disponível no pacote de produtos denominado de MOD13Q1.

A maioria dos estudos que analisa séries temporais de dados de satélites têm-se baseado em curvas espectro-temporais de amostras de pixels, as quais representam o comportamento espectral de um alvo durante um determinado período (GALFORD et al., 2008; COUTO Jr. et al., 2013). Tais curvas têm potencial para ser utilizadas como membros de referência, capazes de identificar alvos na área de estudo com comportamentos espectro-temporais similares.

As séries temporais geralmente apresentam grande quantidade de dados. Por isso, é recomendável o uso de técnicas que reduzam a dimensionalidade espacial dos dados, sem perdas significativas de informações. Uma delas é a *minimum noise fraction* (MNF), inicialmente direcionada para dados hiperespectrais, mas que tem sido aplicada na análise de séries temporais de sensores multiespectrais e com resolução espacial moderada (CARVALHO Jr. et al., 2012; COUTO Jr. et al., 2013). A MNF elimina as informações que tem menor variância, minimizando o ruído sem degradar o sinal (GREEN et al., 1988). Além disso, ela leva em consideração os padrões espaciais repetitivos na série temporal para filtrar os dados. Desta forma, a aplicação desta técnica em séries temporais elimina a sobreposição das informações dos pixels em imagens de diferentes datas.

Diversos algoritmos de classificação automática, supervisionada e não-supervisionada, têm sido utilizados para identificar alvos em imagens multiespectrais, tais como isodata, mínima distância, K-médias, máxima verossimilhança e classificadores por região, como Battacharya e *support vector machine* (SVM). Estes algoritmos são limitados quando há grande quantidade de dados, como são os casos de imagens hiperespectrais ou séries temporais (CARVALHO Jr. et al., 2005). Para esta situação, a utilização de algoritmos como *spectral feature fitting* (SFF) e *spectral angle mapper* (SAM) são mais indicados, pois permitem o uso de curvas espectrais (membros de referências) para identificar os alvos que se visam classificar.

O método SAM considera o ângulo de similaridade entre os membros de referência (KRUSE et al., 1993). Este classificador utiliza a premissa de que, quanto menor for o ângulo correspondente ao arco-cosseno (em radianos) entre os espectros, maior é a probabilidade deles pertencerem à mesma classe. O algoritmo SAM, embora desenvolvido para lidar com dados hiperespectrais, é passível de ser estendido para outras aplicações. Carrino et al. (2011), por exemplo, aplicaram este algoritmo em dados provenientes de gamaespectroscopia para discriminação de áreas de espesso regolito. Rowan e Mars (2003)

utilizaram em estudo de exploração mineral para discriminar alvos a partir de dados do sensor ASTER na faixa do infravermelho termal. Cattani et al. (2013) avaliaram o referido algoritmo para classificar imagens de alta resolução espacial do satélite RapidEye. Vasconcelos et al. (2012) extraíram assinaturas geomorfométricas a partir de diferentes curvaturas de terrenos e realizaram a classificação geomorfológica por meio desse algoritmo.

O grande desafio no uso de séries temporais para produzir mapas de cobertura vegetal natural e antrópica consiste em lidar com as mudanças que ocorrem em tempos distintos ao longo da série temporal, as quais estão relacionadas, por exemplo, com desmatamentos, queimadas, mudanças de usos e de práticas de manejo. Tal dinâmica implica em feições nos espectros-temporais que não são inerentes ao comportamento dos alvos naturais, mas às intervenções antrópicas associadas às características dos alvos. Portanto, as curvas espectro-temporais geralmente são utilizadas para identificar, pontualmente, mudanças no uso do solo e o período em que essas ocorreram.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa consistiu em utilizar séries temporais de EVI da plataforma Terra Modis, filtradas pelas técnicas de Logística dupla e MNF, e classificadas pelo algoritmo SAM, para mapear classes de cobertura vegetal natural e antrópica representativas do Oeste da Bahia. A hipótese a ser investigada é a de que as curvas espectro-temporais funcionam a contento na área de estudo como membros de referência e, por conseguinte, podem ser utilizadas na classificação de alvos representativos dessa área.

5.2 - MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo desta pesquisa compreende a mesorregião do Extremo Oeste da Bahia, doravante denominada de Oeste da Bahia (Figura 5.1), é composta por vinte e quatro municípios e está localizada aproximadamente entre as coordenadas 10,05° e 15,30° de latitude sul e entre 43,25° e 46,70° de longitude oeste. Essa região é caracterizada ainda pelo clima tropical continental (Aw na classificação de Köppen) e pelos efeitos marcantes da sazonalidade climática. O Oeste da Bahia abrange uma área de aproximadamente 117 mil km², situa-se na margem esquerda do rio São Francisco e tem, como afluentes principais, os rios Grande, Preto, Corrente e Carinhonha (NOU e COSTA, 1994).

Essa pesquisa foi baseada nos dados provenientes da plataforma Terra Modis. Os procedimentos metodológicos utilizados estão sintetizados na Figura 5.2. Os dados compreendem uma série temporal de doze anos de EVI (2000 a 2011), com imagens compostas a cada 16 dias, resultando em 23 imagens por ano e em uma série temporal de 276 imagens, com resolução espacial de 250 m. Estas cenas foram integradas em ordem

cronológica. O EVI (HUETE et al., 2002) foi desenvolvido para realçar as respostas espectrais relacionadas com cobertura vegetal verde por meio da minimização dos efeitos de solos e da atmosfera. A equação é dada por (Eq. 5.1):

$$EVI = 2,5 \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VM}}{\rho_{IVP} + (6 \rho_{VM} - 7,5 \rho_{AZ}) + 1} \quad (5.1)$$

onde: ρ_{AZ} = reflectância na banda espectral do azul (MODIS banda 3); ρ_{VM} = reflectância na banda espectral do vermelho (MODIS banda 1); e ρ_{IVP} = reflectância na banda espectral do infravermelho próximo (MODIS banda 2).

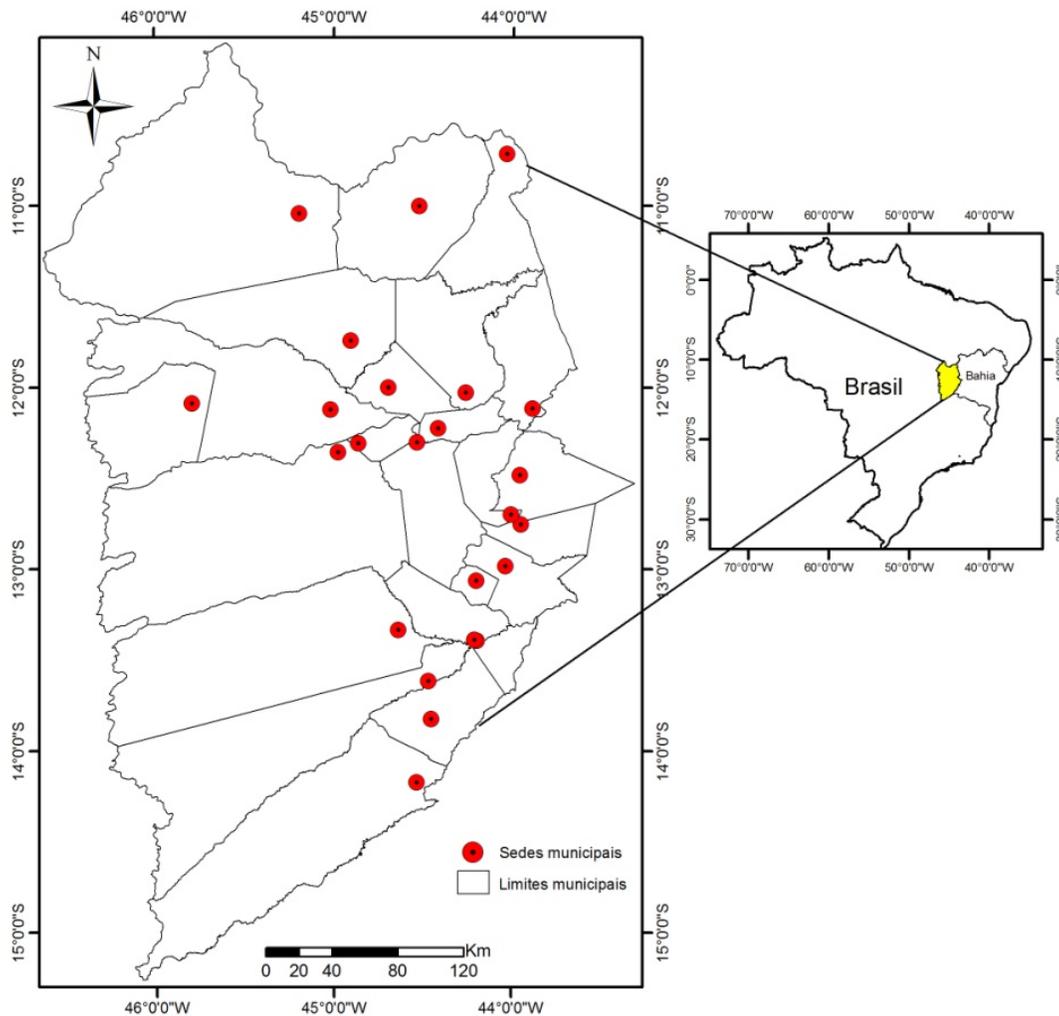


Figura 5.1 - Localização da mesorregião do Extremo Oeste da Bahia, com destaque para as sedes e os limites municipais.

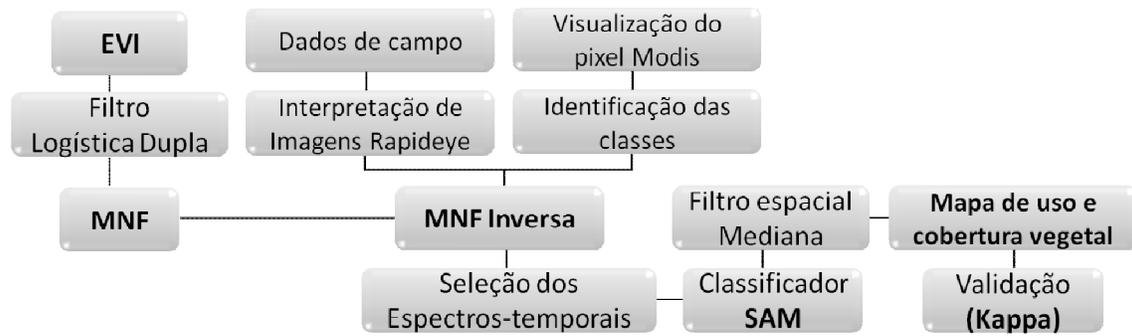


Figura 5.2 - Fluxograma que sintetiza os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa.

Os ruídos associados às séries temporais podem ser suavizados por meio da aplicação de filtros. Diversos algoritmos são utilizados, tais como filtros de mediana (CARVALHO Jr. et al., 2006; COUTO Jr. et al., 2012), wavelet (LU et al., 2007), análise harmônica (BRADLEY et al., 2007), além dos filtros como Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico, implementados no programa computacional Timesat (JÖNSSON e EKLUNDH, 2004). Neste trabalho, utilizou-se o filtro de Logística dupla combinado com a MNF para a remoção de ruídos na série temporal de EVI (Figura 5.3), pois este filtro demonstrou melhor resultado quando comparado com os demais implementados no Timesat (Capítulo 4).

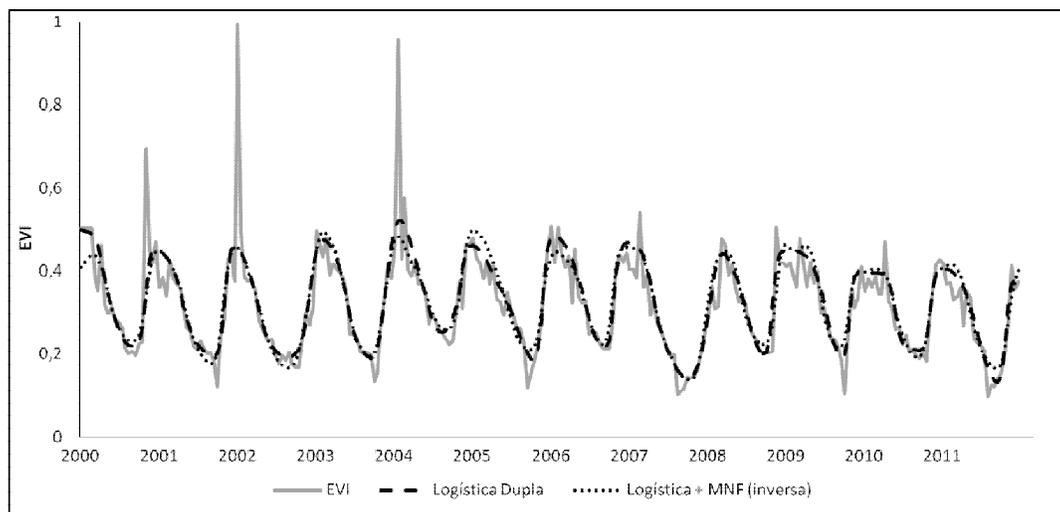


Figura 5.3 - Exemplo de curvas espectro-temporais de EVI original, EVI filtrado (logística dupla) e EVI filtrado mais MNF, representativas da classe Cerrado denso no município de Riachão das Neves.

Como se trata de uma grande quantidade de dados, a série temporal de EVI filtrada foi submetida à técnica de MNF (*Minimum Noise Fraction*). Este procedimento reduz a dimensionalidade dos dados, isto é, minimiza a presença de ruídos sem degradar o sinal. Após a MNF, foi aplicada a MNF inversa, a qual re-escala as informações concentradas nas primeiras componentes selecionadas para o total de imagens utilizadas (BAPTISTA, 2012). Conforme a interpretação dos dados estatísticos de autovalores, utilizaram-se as 50 primeiras componentes resultantes da MNF para gerar a transformação da MNF inversa.

Utilizou-se nesta pesquisa o classificador SAM, que classifica os pixels das imagens com base em espectros de referências, isto é, por meio da identificação do comportamento espectral dos alvos em diferentes faixas do espectro eletromagnético. Para classificar as séries temporais, as curvas espectro-temporais se constituem como membros de referência. O SAM utiliza os ângulos espectrais formados entre um espectro de referência e um pixel classificado (SOUTH et al., 2004). A equação do SAM (Eq. 5.2) é expressa por (KRUSE et al., 1993):

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^{i=b} R E_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=b} (E_i)^2 \sum_{i=1}^{i=b} (R_i)^2}} \quad (5.2)$$

onde: α = função do arco-cosseno; quanto menor for α , maior será a similaridade entre as curvas; R = espectro de referência; e E = espectro teste.

Tentou-se selecionar os membros de referência de forma semiautomática, isto é, por meio do índice de pixel puro (PPI) e dos agrupamentos de distribuição estatística das classes (espaço n -dimensional), mas optou-se por identificar as curvas espectro-temporais com base nos dados de campo, na interpretação de imagens de alta resolução espacial (5 m) do satélite Rapideye e na plataforma instantânea de visualização de EVI2 (FREITAS et al., 2011). A seleção dos membros de referência foi realizada manualmente, tendo, como base, os pontos de controle de campo e a dominância de uma única classe no pixel do qual a curva de EVI foi extraída.

Posteriormente, criou-se uma biblioteca espectral, considerando a resolução espacial de 250 m das imagens Modis, das classes representativas da área de estudo: Campo sujo, Cerrado ralo, Cerrado típico, Cerrado denso, Floresta estacional, Mata seca, Vegetação secundária, Cultura agrícola e Pastagem cultivada. Tais espectros foram utilizados para classificar a MNF inversa por meio do algoritmo SAM.

Utilizou-se o algoritmo de classificação SAM por meio das curvas espectro-temporais de EVI para identificar as principais classes (Figura 5.4) de cobertura vegetal natural e

antrópica da área de estudo. Por meio dos resultados processados pelo algoritmo SAM, geraram-se as “rules images”, as quais indicam os valores de ângulos dos pixels, possibilitando identificar o melhor ângulo para cada membro de referência. Desta maneira, foram especificados diferentes ângulos para cada classe. Todavia, a grande maioria dos pixels não foi classificada, sendo apenas alguns pixels mapeados como pertencentes a cada classe. Optou-se então por utilizar o método SAM sem especificar o valor do ângulo para cada classe. Assim, o algoritmo foi menos rigoroso e classificou todos os pixels da imagem. Este procedimento foi adotado porque os membros de referência correspondem às curvas espectro-temporais de EVI e não aos espectros de reflectância, o que implica em afirmar que uma curva representa, não apenas o comportamento do alvo em relação aos dados de EVI, mas também uma gama de mudanças que pode ter ocorrido ao longo do tempo em determinados pixels, sendo que estes eventualmente podem corresponder a uma mesma classe que em outras áreas não foi alterada.

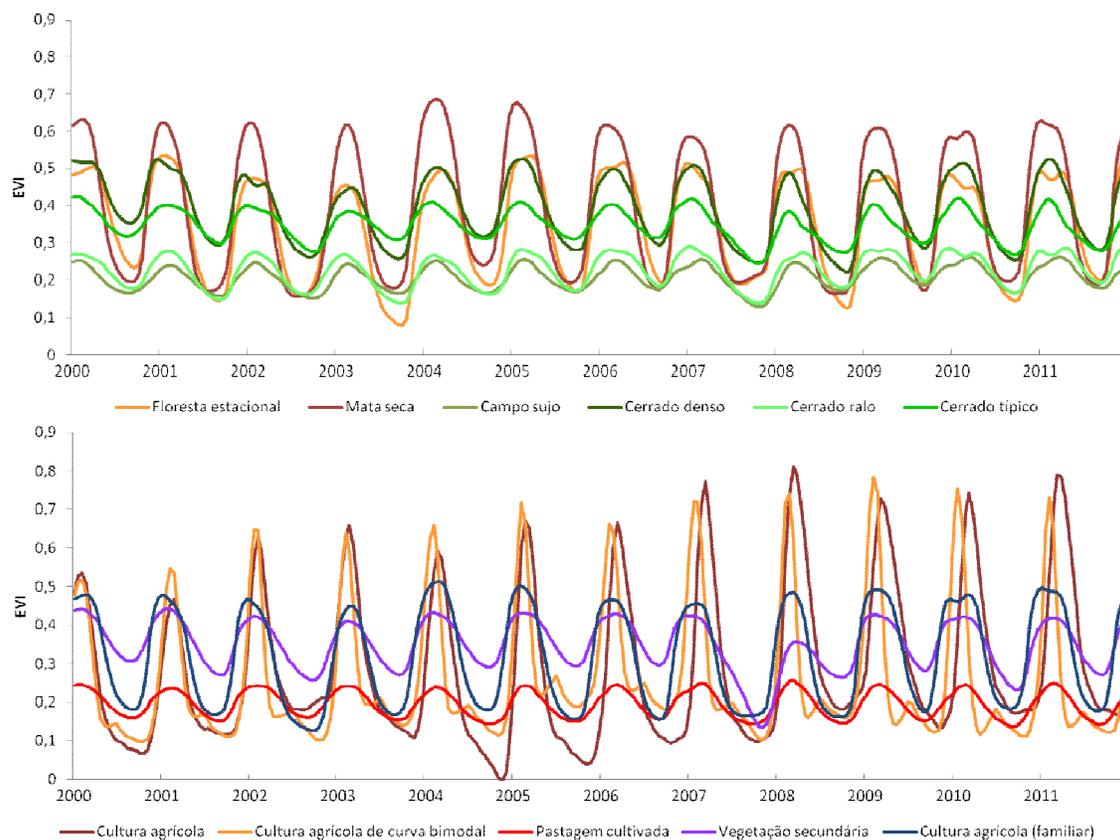


Figura 5.4 - Curvas espectro-temporais de EVI (2000-2011) representativas das classes identificadas pelo algoritmo SAM.

Como a classe Cultura agrícola apresenta diferentes culturas e ciclos vegetativos, foram selecionadas três curvas representativas desta: Cultura de sequeiro; Cultura de

sequeiro com safrinha, cuja curva espectro-temporal é caracterizada pela curva bimodal; e a Agricultura familiar, dominante na região sudeste da área de estudo e com maior heterogeneidade de culturas em relação à borda ocidental da área de estudo, cujas poligonais de cultivos são menores. A extração da média aritmética de espectros-temporais de uma determinada classe pode camuflar algumas especificidades, gerando um espectro que não caracteriza a classe. Desta forma, optou-se por utilizar curvas espectro-temporais de diferentes pixels como representativas de uma mesma classe, ao invés da média espectro-temporal de EVI. Para as demais classes, selecionou-se apenas uma curva espectro-temporal. Após a classificação da série temporal, por meio do algoritmo SAM, aplicou-se um filtro espacial de mediana com janela de tamanho 3 pixels x 3 pixels.

A última etapa deste trabalho consistiu na validação da classificação para verificação da acúrcia do mapeamento. Foram selecionados aleatoriamente, 100 pontos no mapa de cobertura vegetal e validados com base nas imagens do satélite RapidEye de 2011, adquiridos pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). A validação foi baseada no cálculo do índice Kappa (LANDIS e KOCH, 1977).

5.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados indicaram uma redução significativa dos ruídos com as aplicações do filtro de logística dupla e da técnica MNF. A título de ilustração, na Figura 5.5 são mostradas a composição colorida das componentes principais 3, 4 e 5 derivadas do processamento de imagens por MNF, a primeira e a 276ª componente principal. As informações concentram-se nas primeiras componentes principais, em detrimento das últimas, cujos dados são mais ruidosos. Na Figura 5.5a podem-se observar três ambientes bem diferentes, as áreas correspondentes ao uso agropecuário (a oeste), áreas de predomínio da vegetação savânica (porção central) e ambientes com predominância da vegetação estacional decidual e semidecidual (a leste). A Figura 5.5b consiste na primeira componente principal, a qual concentra a maior quantidade de informação. A Figura 5.5c corresponde à última componente principal, ou seja, à imagem mais ruidosa.

A classe Campo sujo (Figura 5.6a) correspondeu a 1,8% da área de estudo e apresentou a curva espectro-temporal de EVI muito similar à da pastagem cultivada, por isso houve confusão entre essas classes, visto que os pixels classificados como Campo sujo apresentaram elevado desvio-padrão (Figura 5.7). Nesta fitofisionomia, predomina a vegetação de gramíneas, a qual responde rapidamente à precipitação na estação chuvosa, assim como durante a seca. Este intenso padrão sazonal dificulta a separação entre mudanças devido às causas antrópicas (queimadas) e mudanças fenológicas da cobertura vegetal quando se utilizam imagens de uma única data (ANDERSON et al., 2005), por isso a

curva espectro-temporal de EVI oferece grande potencial na discriminação dessa fitofisionomia, pois considera o seu comportamento sazonal durante toda a serie temporal.

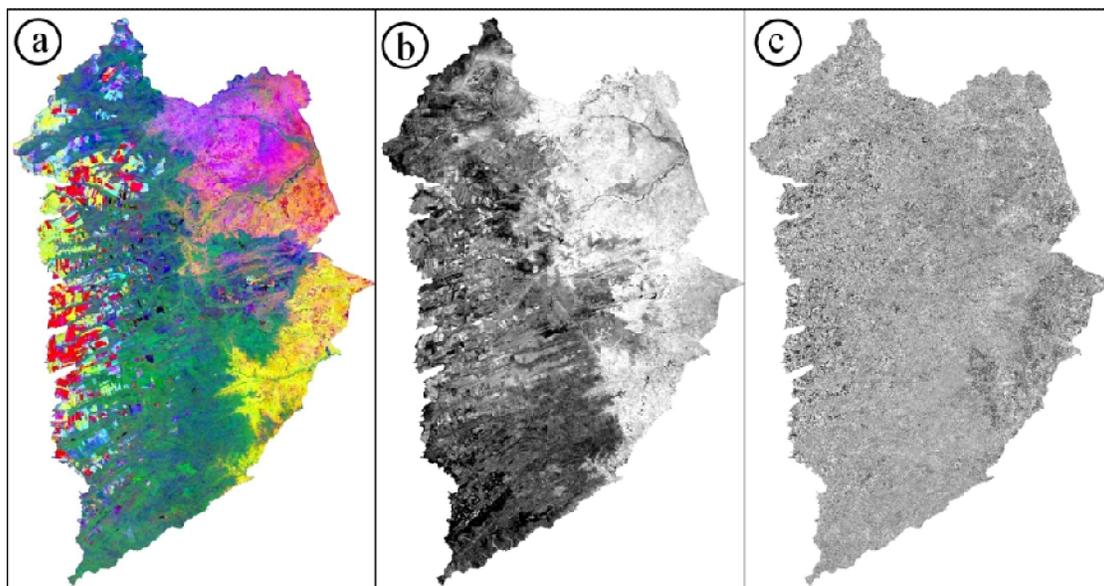


Figura 5.5 - Composição colorida das componentes 3, 4 e 5 derivadas do processamento de imagens por MNF, associadas respectivamente aos canais R, G e B (a), primeira componente MNF (b) e 276ª componente MNF (c).

O Cerrado ralo (Figura 5.6b), em relação ao Cerrado típico, distingue-se quanto à densidade da vegetação, portanto, os espectros hora se assemelham, hora se diferenciam em alguns aspectos, tais como valores de EVI mais elevados. Áreas de Cerrado ralo podem ter sido, no passado não muito remoto, Cerrado típico, haja vista que o que distingue essas duas classes são a densidade e a altura das árvores e arbustos (RIBEIRO e WALTER, 2008). Identificaram-se 5,1% como pertencente à classe de Cerrado ralo na área de estudo e o desvio-padrão da curva espectro-temporal foi mediano comparado aos das demais classes.

O Cerrado típico (Figura 5.6c) é a fitofisionomia predominante, distribuída na porção central da área de estudo e corresponde a 42,8%. A mesma é intermediária entre o Cerrado denso e o Cerrado ralo (RIBEIRO e WALTER, 2008), corresponde à maior representação de Cerrado ainda existente no Oeste da Bahia, mas é, proporcionalmente, a vegetação mais suprimida, tendo em vista as características das áreas onde ocorrem – topografia plana e solos bem desenvolvidos – as quais proporcionam o avanço da agricultura mecanizada em larga escala. A curva espectro-temporal de EVI para esta classe apresentou baixo desvio-padrão.

A classe Cerrado denso (Figura 5.6d) constitui-se em manchas mais esparsas e localiza-se, principalmente, nas proximidades das bordas dos chapadões e representa 9,6% da área de estudo. Esta fitofisionomia é caracterizada por arbustos e árvores, porém, com densidade maior do que a encontrada no Cerrado típico. Os pixels classificados como pertencentes a esta classe apresentaram desvio-padrão mediano quando comparado aos das demais classes (Figura 5.7).

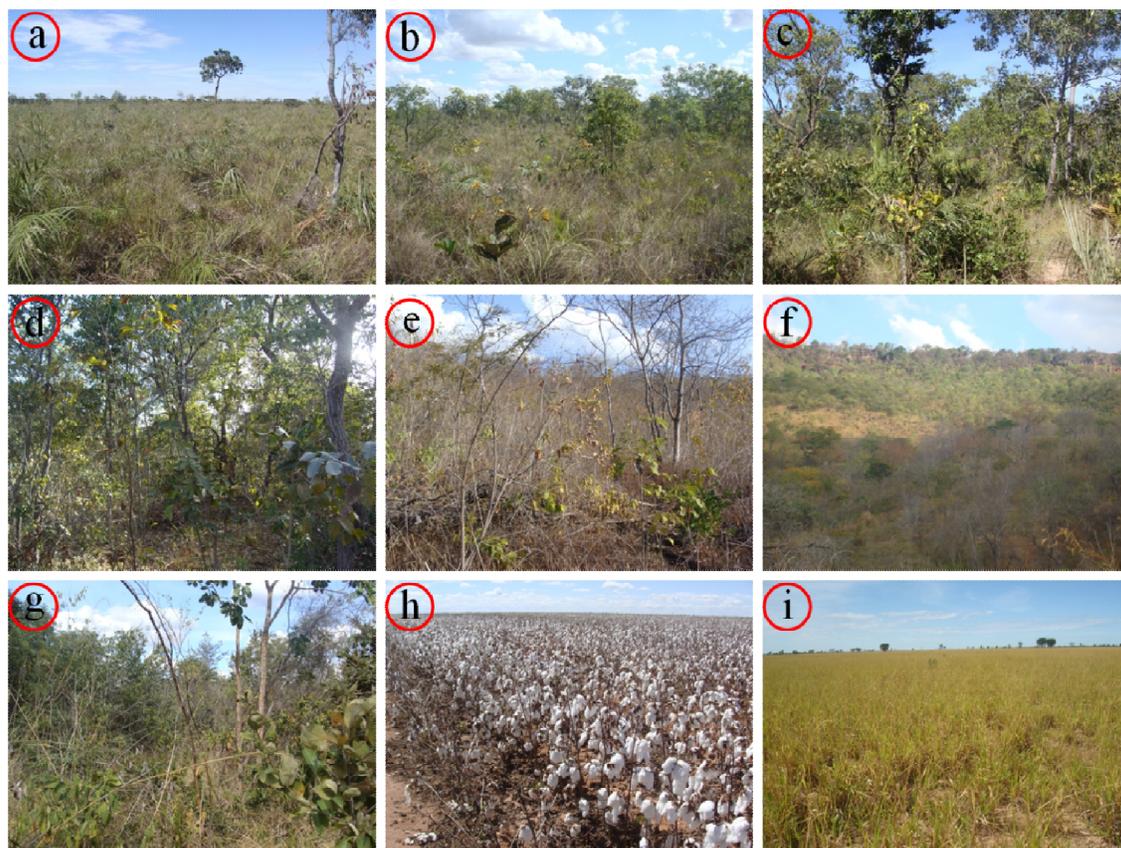


Figura 5.6 - Fotografias registradas em trabalho de campo representativas das fitofisionomias e usos existentes na área de estudo: a) Campo sujo; b) Cerrado ralo; c) Cerrado típico; d) Cerrado denso; e) Mata seca; f) Floresta estacional; g) Vegetação secundária; h) Cultura agrícola; i) Pastagem cultivada.

A Mata seca e a Floresta estacional (Figuras 6e e 6f) constituem-se nas classes de vegetação decidual e semidecidual, portanto, classes bastante marcadas pela sazonalidade, ocupando principalmente a unidade geomorfológica do pediplano sertanejo (BRASIL, 2003). A área abrangida por estas fitofisionomias é equivalente a 7,8% para Mata seca e 10,6% para Floresta estacional. Os pixels pertencentes a estas classes apresentaram baixo desvio-padrão, visto que suas curvas espectro-temporais são bem características na série temporal de EVI.

A Vegetação secundária (Figura 5.6g) corresponde às áreas cuja vegetação sofreu ação antrópica, como desmatamento ou queimada, e depois entrou em processo de regeneração, sendo, na área de estudo, mapeados 2% como pertencente a esta classe. A maior parte das áreas de vegetação nativa que foi desmatada ou queimada foi convertida posteriormente em áreas agrícolas ou pastagens, não sendo possível a regeneração da vegetação nessas áreas. O desvio-padrão dos pixels classificados como pertencentes a esta classe foi baixo.

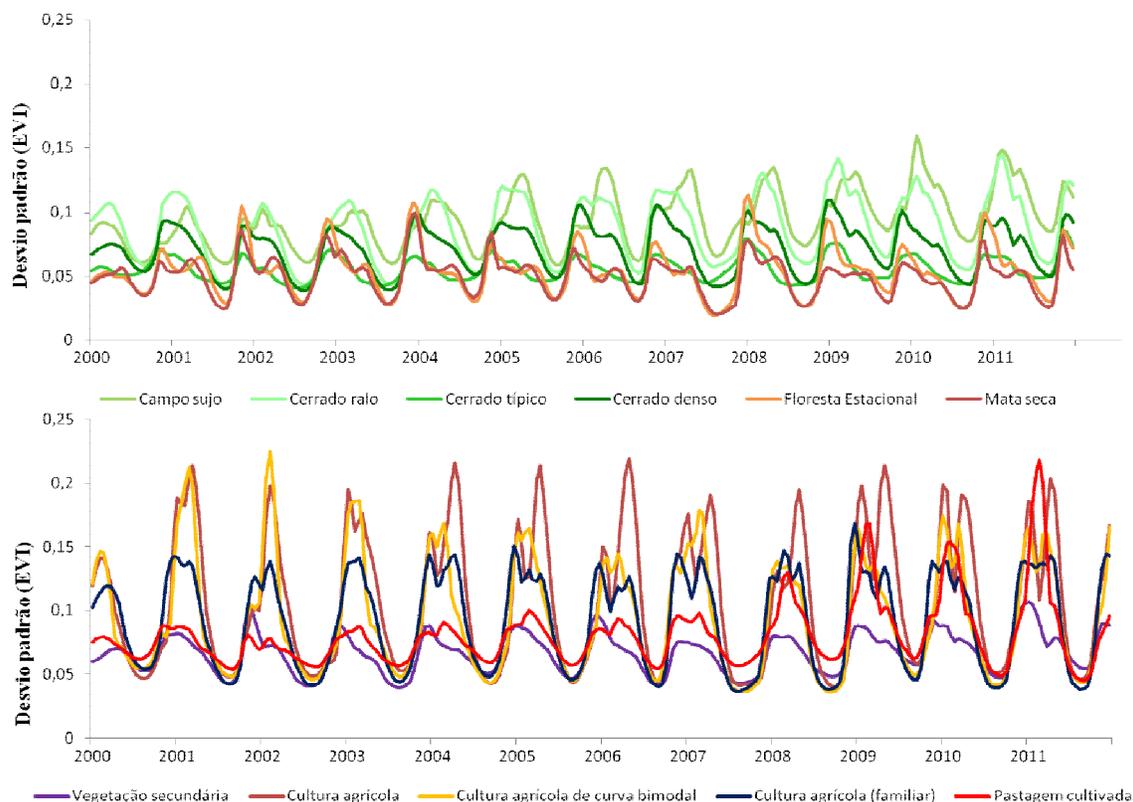


Figura 5.7 - Desvio-padrão dos espectros-temporais dos pixels identificados em cada classe.

A classe Cultura agrícola (Figura 5.6h), caracterizada principalmente pela agricultura de sequeiro, se concentra predominantemente na parte ocidental da área de estudo, mas também à nordeste e sudeste, porém, nestas regiões, predomina a agricultura familiar, que é mais diversificada em termos de tipos de culturas. A curva espectro-temporal extraída da Agricultura familiar é caracterizada por menor amplitude e maior comprimento em relação à curva espectro-temporal de Agricultura de sequeiro predominante na borda oeste da área de estudo (Figura 5.5), pois nestas áreas têm-se ciclos de culturas mais curtos, devido às modernas técnicas utilizadas. Esta classe avançou para as áreas de baixas declividades e solos profundos, principalmente Latossolos, denominadas de chapadões. As curvas

espectro-temporais representativas da classe Cultura agrícola foram as que apresentaram maior desvio-padrão, isto porque se tem, ao longo da série temporal, mudanças em relação aos tipos de cultivos e, conseqüentemente, na fenologia, no tipo de dossel, e na densidade de indivíduos, dentre outras alterações.

Na região de estudo, tradicionalmente predominava o uso da pecuária extensiva e da agricultura familiar, todavia, estas áreas, ao longo do tempo, tornaram-se mais restritas, preponderando a Pastagem cultivada (Figura 5.6i). Esta classe corresponde a 2,8% da área de estudo, mas algumas áreas antropizadas em torno dos talhões de agricultura de sequeiro foram identificadas como Pastagem cultivada e algumas áreas de Pastagens cultivadas foram classificadas como Culturas agrícolas.

As classes antrópicas apresentaram maior complexidade de identificação porque o mesmo tipo de uso pode ocorrer em distintos períodos, não sendo passível de se caracterizar todas as curvas espectro-temporais como representativas da mesma classe. Classes antrópicas implicam em diversos processos/eventos que podem acontecer de forma diferenciada no tempo e no espaço.

Alguns erros de classificação ocorreram por causa da resolução espacial relativamente grosseira do Modis. Determinadas manchas, menores do que o tamanho nominal do pixel, normalmente não são identificadas ou caracterizadas como tais. Piromal et al. (2008), por exemplo, encontraram erros grosseiros de classificação quando utilizaram o produto MOD14 para identificar queimadas na Amazônia, não sendo possível mapear as cicatrizes menores que 100 hectares, devido à relativamente baixa resolução espacial das imagens utilizadas.

Por meio do desvio-padrão, pôde-se observar como as curvas espectro-temporais de EVI dos pixels mapeados para cada fitofisionomia e tipos de usos variaram temporalmente (Figura 5.7). Conforme esperado, as classes antrópicas apresentaram maior desvio-padrão, o que indica maior variabilidade dos pixels em função da alternância de culturas agrícolas ou mudanças de uso. As classes naturais, por sua vez, apresentaram menor desvio-padrão, pois os pixels pertencentes a esta classe mantêm comportamento similar entre si durante o período analisado.

Na Figura 5.8, é apresentado o mapa de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia. A seleção de membros de referência de forma manual apresentou melhor resultado do que a realizada de forma semiautomática (PPI e *N-Dimensional*). Resultado semelhante foi encontrado por Rosso et al. (2005).

Como se trata de curvas espectro-temporais, e não de espectro de reflectância, o método de classificação SAM não foi aplicado de forma rigorosa, isto é, não se arbitrou um ângulo de similaridade, sendo todos os pixels da imagem incluídos na classe que detém o conjunto de pixels com curvas espectro-temporais mais semelhantes. A não especificação

do ângulo para aplicação do método SAM pode provocar generalizações de classes, pois a utilização deste algoritmo permitiria identificar apenas as áreas que possuem pixels com espectros similares, conforme o ângulo estabelecido para cada membro de referência.

Os comportamentos sazonais, discriminados pelas curvas espectro-temporais de EVI das diferentes fitofisionomias e classes de cobertura antrópica, foram imprescindíveis na identificação e caracterização das mesmas. A despeito disto, pode-se afirmar que o efeito da sazonalidade poderia ser identificado de forma ainda mais marcante na área de estudo, porém, o produto MOD13Q1 utiliza a imagem de EVI mais elevado para fazer a composição a cada 16 dias (LEEUWEN et al. 1999).

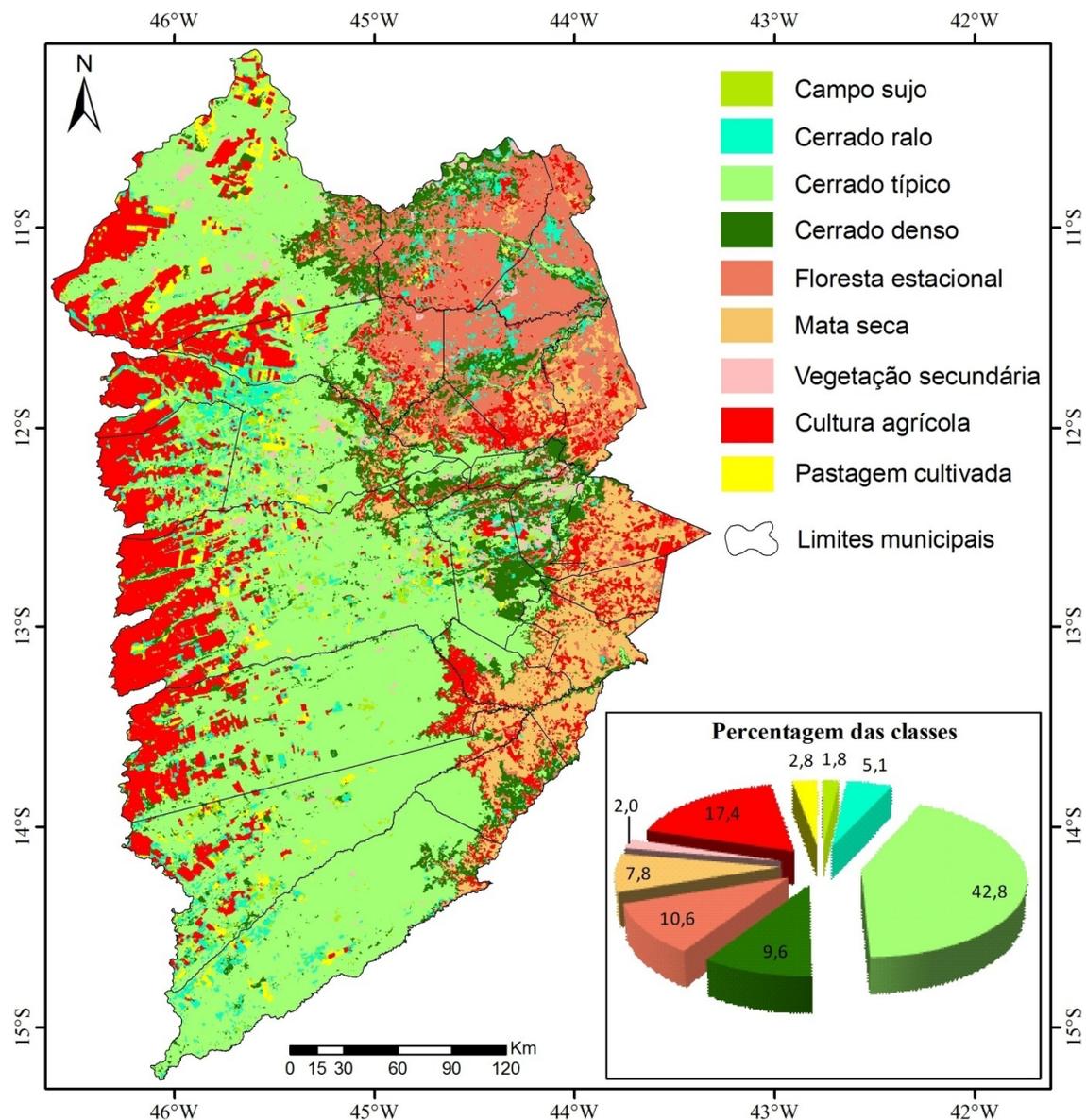


Figura 5.8 - Mapa de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia gerado a partir da classificação SAM.

Algumas áreas recentemente antropizadas foram classificadas conforme a classe de vegetação pré-existente, pois foi considerado o padrão espectro-temporal predominante nestes pixels. Resultados encontrados por Sano et al. (2011), por meio de classificação de imagens TM/Landsat, demonstram que, em 2005, as áreas de Culturas agrícolas corresponderam a 1,8 milhões de hectares no Oeste da Bahia. Tais resultados estão condizentes com esta pesquisa que encontrou pouco mais de 2 milhões de hectares relativos a essa classe para 2011. Sano et al. (2011) também contabilizaram um total de 1,3 milhões de hectares de Pastagens cultivadas em 2005. Esse valor é bem maior que os 332 mil hectares obtidos com base nas séries temporais do Modis EVI. Acredita-se que essa subestimação pode ter sido causada pela confusão com Culturas agrícolas, principalmente do sudeste da área de estudo. Sano et al. (2009) também observaram confusão semelhante ao realizar mapeamento de cobertura vegetal no Distrito Federal.

Do total de 100 pontos selecionados aleatoriamente no mapa de cobertura vegetal para validação do mapeamento, 10 foram desconsiderados por corresponderem a pixels mistos nas imagens do satélite RapidEye. A Tabela 5.1 mostra a matriz de confusão. De um total de 90 pontos, 76 foram classificados corretamente, resultando em uma exatidão global de 84%. O índice Kappa encontrado foi de 0,8, considerado “muito bom”, segundo a classificação de qualidade deste índice (LANDIS e KOCH, 1977).

Tabela 5.1 - Matriz de confusão do mapeamento de cobertura vegetal natural e antrópica da área de estudo.

	CS	CR	CT	CD	FE	MS	VS	CA	PC	Total	%EC
CS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0
CR	0	2	2	0	0	0	0	1	0	5	33,0
CT	0	0	32	1	0	0	0	0	0	33	1,7
CD	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	0,0
FE	0	0	0	0	8	0	0	0	0	8	0,0
MS	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6	0,0
VS	0	2	0	0	0	0	2	0	0	4	27,5
CA	1	0	1	2	1	0	0	15	1	21	15,7
PC	1	1	0	0	0	0	0	0	3	5	22,0
Total	3	5	35	10	9	6	2	16	4	90	100,0
%EO	32,1	28,9	4,1	14,5	5,4	0,0	0,0	3,0	12,0	100,0	

CS = Campo sujo; CR = Cerrado ralo; CT = Cerrado típico; CD = Cerrado denso; FE = Floresta estacional; MS = Mata seca; VS = Vegetação secundária; CA = Cultura agrícola; PC = Pastagem cultivada; EC = Erro de comissão; EO = Erro de omissão.

Ressalta-se que o mapeamento de cobertura vegetal natural e antrópica, realizado a partir de séries temporais de EVI do sensor Modis, utilizou imagens com resolução espacial de 250 m, portanto, os resultados devem ser analisados de acordo com a escala do mapa (~1:1.000.000). As confusões de classes ocorreram em relação aos tipos de uso ou fitofisionomias, mas os dados do mapeamento mostraram-se coerentes quanto ao porte da vegetação (campestre, savânica, florestal) e à identificação de classes antrópicas. As classes de Campo sujo e Cerrado ralo foram as que apresentaram erros de omissão mais elevados, 32,1% e 28,1%, respectivamente, sendo a classe de Cerrado ralo subestimada. Enquanto as classes de Cerrado ralo, Vegetação secundária e Pastagens cultivadas apresentaram erros de comissão maiores, com 33%, 27,5% e 22%, respectivamente.

5.4 - CONCLUSÕES

Esse estudo permitiu demonstrar o potencial de séries espectro-temporais do sensor Modis para discriminar classes de cobertura vegetal representativas do Oeste da Bahia, podendo ser aplicado em outras áreas. Este método demonstrou certa limitação para áreas naturais que foram antropizadas durante a série temporal considerada e também para áreas antropizadas que sofreram mudanças de uso (por exemplo, áreas de pastagens convertidas para culturas agrícolas).

Para a série temporal do Oeste da Bahia, recomenda-se o uso de um filtro temporal de Logística dupla seguido da técnica MNF para suavização de ruídos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) e à Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), instituições de vínculo da primeira autora durante a pesquisa, pela viabilização desse estudo. Os autores são gratos ainda à Embrapa Cerrados, pelo apoio logístico e ao seu servidor Heleno Bezerra pelo apoio ao trabalho de campo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fornecimento de bolsa de pesquisa ao segundo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 4, p. 445-456, 2005.

ANJOS, V. S.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S.; ROSA, R. Caracterização espectro-temporal de pastagens do Triângulo Mineiro utilizando dados MODIS EVI2 (2000-2010). **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 1, p. 205-215, 2013.

BAPTISTA, G. M. M. Processamento de dados hiperespectrais. **IN: Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Org.: Paulo Roberto Meneses; Tati de Almeida. Brasília, p. 221-238, On-line (UnB/CNPq), 2012.

BRADLEY, B. A.; JACOB, R. W.; HERMANCE, J. F.; MUSTARD, J. F. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106 n. 2, p. 137-145, 2007.

BRASIL. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia: Sistema de Informações Geográficas – SIG e Mapas**. CPRM, 2003. CD-ROM.

CARRINO, T. A.; SILVA, A. M.; BOTELHO, N. F.; SILVA, A. A. C. Discriminação de áreas de espesso regolito do leste do estado do Amazonas usando estatística multivariada, algoritmo hiperespectral e modelagem de dados espaciais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 155-172, 2011.

CARVALHO Jr., O. A.; SILVA, N. C.; CARVALHO, A. P. F.; COUTO Jr., A. F.; SILVA, C. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Combining noise-adjusted principal components transform and median filter techniques for denoising Modis temporal signatures. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 2, p. 147-157, 2012.

CARVALHO Jr., O. A.; HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F. Identificação regional da floresta estacional decidual na bacia do Rio Paranã a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 319-332, 2006.

CARVALHO Jr., O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T. Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor ASTER em ambiente de cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 2, p. 159-172, 2005.

CATTANI, C. E. V.; MERCANTE, E.; SOUZA, C. H. W.; WRUBLACK, S. C. Desempenho de algoritmos de classificação supervisionada para imagens dos satélites RapidEye. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu-PR, 2013. **Anais**. p. 8005- 8010, 2013.

COUTO Jr., A. F.; CARVALHO Jr., O. A.; MARTINS, E. S. Séries temporais de NDVI, EVI e NDWI do sensor MODIS para caracterização fenológica do algodão. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 1, p. 199-210, 2013.

COUTO Jr., A. F.; CARVALHO Jr., O. A.; MARTINS, E. S. Séries temporais MODIS aplicadas em sucessão de culturas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e milho (*Zea mays* L.) em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, p. 405-418, 2012.

FLORES, P. M.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO Jr., O. A.; GOMES, R. A. T. Análise multitemporal da expansão agrícola no município de Barreiras - Bahia (1988-2008). **Campo-Território: Revista de Geografia Agrária**, v. 7, n. 14, p. 1-19, 2012.

FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing

series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, p. 57-64, 2011.

GALFORD, G. L.; MUSTARD, J. F.; MELILLO, J.; GENDRIN, A.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 576-587, 2008.

GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, B.; CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 65-74, 1988.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT: a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 1, p. 833-845, 2004.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3-15, 2002.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. B.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J.; GOETZ, A. F. H. The Spectral Image Processing Systems (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145-163, 1993.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n. 1, p.159-174, 1977.

LEEUEWEN, W. J. D.; HUETE, A. R.; LAING, T. W. MODIS vegetation index compositing approach: a prototype with AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 69, p. 264-280, 1999.

LU, X.; LIU, R.; LIU, J.; LIANG, S. Removal of noise by wavelet method to generate high quality temporal data of terrestrial MODIS products. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 10, p. 1-11, 2007.

MENKE, A. B.; CARVALHO Jr., O. A.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luis Eduardo Magalhães (BA – Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 3, p. 315-326, 2009.

NOU, E. A. V.; COSTA, N. L. D. A. **Diagnóstico da qualidade ambiental da bacia do rio São Francisco. Sub-bacias do Oeste Baiano e Sobradinho**. Rio de Janeiro: IBGE, Série Estudos e Pesquisas em Geociências, v. 2, 1994, 111p.

PIROMAL, R. A. S.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; KRUG, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. **Acta Amazonica**. v. 38, n. 1, p. 77-84, 2008.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.), **Cerrado. Ecologia e Flora**. Planaltina, Embrapa Cerrados, v. 1, Cap. 6, p. 151-199, 2008.

ROSSO, P. H.; USTIN, S. L.; HASTINGS, A. Mapping marshland vegetation of San Francisco Bay, California, using hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 23, p. 5169-5191, 2005.

ROWAN, L. C.; MARS, J. C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 350-366, 2003.

SANO, E. E.; SANTOS, C. C. M.; SILVA, E. M.; CHAVES, J. M. Fronteira agrícola do oeste baiano: considerações sobre os aspectos temporais e ambientais. **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 479-489, 2011.

SANO, E. E.; SANTOS, E. M.; MENESES, P. R. Análise de imagens do satélite Alos Palsar para o mapeamento de uso e cobertura da terra do Distrito Federal. **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 441-451, 2009.

SANTOS, C. C. M.; VALE, R. M. C.; LOBÃO, J. S. B. Modernização da agricultura e ocupação de cerrados no oeste baiano. In: Oeste da Bahia: Trilhando velhos e novos caminhos do Além São Francisco. SANTOS, C. C. M.; VALE, R. M. C. (Org.). UEFS Editora, p.175-226, 2012.

SEI. SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Balanco hídrico do estado da Bahia** (Série Estudos e Pesquisas, 45). Salvador: SEI, 1999, 250p.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e descrição. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.). **O Sensor Modis e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007, p. 3-22.

SOUTH, S.; QI, J.; LUSCH, D. P. Optimal classification methods for mapping agricultural tillage practices. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, p. 90-97, 2004.

WARDLOW, B. D.; EGBERT, S. L.; KASTENS, J. H. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 290-310, 2007.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO Jr., O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO Jr., A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n. 2, p. 171-186, 2012.

6 - CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DA COBERTURA VEGETAL DO OESTE DA BAHIA A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS DE EVI DO SENSOR MODIS

Artigo submetido à Revista Brasileira de Cartografia

6 - CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DA COBERTURA VEGETAL DO OESTE DA BAHIA A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS DE EVI DO SENSOR MODIS

RESUMO

Esta pesquisa objetivou caracterizar a fenologia da cobertura vegetal do Oeste da Bahia por meio de métricas fenológicas derivadas de séries temporais de índice de vegetação realçado (EVI) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (Modis) do período de 2000-2011. As séries temporais foram processadas no programa Timesat para extrair as métricas fenológicas de taxas de rebrota, senescência, produtividade total e sazonal, valores de mínimo e máximo, comprimento e amplitude alcançados em cada estação climática. Posteriormente realizaram-se as tabulações cruzadas entre as métricas fenológicas obtidas das seguintes classes de cobertura vegetal natural e antrópica da área de estudo: formação campestre, formação savânica, floresta estacional e agropecuária. Resultados desse estudo permitiram evidenciar as adaptações vegetativas relacionadas ao periodismo da vegetação no Oeste da Bahia. Observou-se grande heterogeneidade na representação das métricas fenológicas, pois a vegetação do Cerrado apresenta elevada diversidade em termos de estrutura (composto por um mosaico de formações campestre, savânica e florestal), além de apresentar forte influência da sazonalidade climática. Essas características refletem-se em acentuadas diferenças em termos de índice de área foliar, densidade e distribuição espacial de indivíduos e teor de água nas folhas, entre outros parâmetros. Portanto, os distintos padrões das métricas encontrados nesse estudo estão relacionados às características naturais e adaptativas ao ambiente de cada fitofisionomia presente na área de estudo. No caso da agropecuária (principalmente culturas agrícolas de sequeiro e pastagens cultivadas), as métricas também apresentaram elevada heterogeneidade, por causa da diversidade em termos de tipo de cultura (por exemplo, soja, milho, algodão e milheto) e manejo de solos e planta (por exemplo, plantio direto e plantio convencional).

Palavras-chaves: Sazonalidade, Índice de vegetação, Métricas fenológicas; Cerrado.

ABSTRACT

This study aimed to characterize the phenology of vegetation cover in the western Bahia State, Brazil, through phenological metrics derived from the time series of enhanced vegetation index (EVI) of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor

in the period of 2000-2011. The time series were processed in the Timesat program to extract phenological metrics rate of regrowth, senescence, total and seasonal productivities, minimum and maximum values, length and amplitude achieved in each season. Cross-tabulations between phenological metrics of following land use and land cover classes were obtained: grasslands, shrublands, deciduous forest and agriculture. Results of this study allowed to highlight the vegetation adaptations related to periodism of the vegetation in western Bahia. There was great heterogeneity in the representation of phenological metrics since the Cerrado vegetation presents high diversity in terms of structure (composed by a mosaic of grasslands, shrublands and forestlands), besides presenting strong influence of climatic seasonality. Such characteristics reflect themselves in strong differences in terms of leaf area index, plant density and spatial distribution and leaf water content, among other parameters. Therefore, the distinct patterns of metrics found in this study are related to natural and adaptive characteristics to the environment of each phytophysiognomy present in the study area. In the case of agriculture (mainly annual and rainfed croplands and cultivated pasturelands), the metrics also presented high heterogeneity because of the diversity in terms of type of crop variety (e.g., soybean, maize, cotton and millet) and crop and soil managements (e.g., conventional and no-till planting).

Keywords: Seasonality, Vegetation index, Phenological metrics, Cerrado.

6.1 - INTRODUÇÃO

As fitofisionomias caracterizadas pela elevada influência da sazonalidade climática podem ser estudadas por meio dos ciclos fenológicos (MORELLATO, 1991, 1995). A análise sazonal fornece importantes subsídios à compreensão da fenologia, a qual pode ser definida como o estudo da ocorrência de eventos periódicos do ciclo (fenofases) da vegetação (LIETH, 1974; FANCELLI e DOURADO NETO, 1997; TALORA e MORELLATO, 2000). As variações sazonais da vegetação estão associadas principalmente à diversidade de espécies, temperatura, iluminação solar e umidade do solo, isto é, às características relacionadas às fitofisionomias e ao ambiente. Elas podem estar ainda relacionadas com processos endógenos da planta e pressões seletivas bióticas (TALORA e MORELLATO, 2000), os quais podem influenciar na periodicidade das fenofases. Certamente tais características são refletidas nas métricas fenológicas.

Trabalhos de fenologia de vegetação, realizados de forma controlada e *in loco* (método direto) têm revelado resultados precisos, porém dispendiosos, morosos e geralmente pontuais. Diversos estudos (LEE et al., 2002; ZHANG et al., 2003; BRADLEY et al., 2007) têm utilizado dados de sensoriamento remoto para caracterizar distintos aspectos

fenológicos de diferentes regiões. Para o Cerrado, embora apresente uma acentuada interferência da sazonalidade climática (BECERRA et al., 2009), a grande maioria dos estudos de caracterização de fitofisionomias tem sido realizada a partir de imagens de satélites de uma única data (MENKE et al., 2009; SILVA et al., 2010; SANO et al., 2011), o que pode implicar em dificuldades na discriminação da vegetação devido ao referido comportamento sazonal.

A análise de imagens monotemporais de satélite para discriminar fitofisionomias e tipos de uso implica em conhecer as fenofases de cada classe da cobertura vegetal. Épocas mais propícias para diferenciar tipos de vegetação ou para extrair informações biofísicas, a partir de dados de sensoriamento remoto, dependem das características temporais de cada fenofase, pois a grande maioria das espécies vegetais possui ciclos fenológicos específicos (JENSEN, 2009).

Atualmente, já existem sensores imageadores que têm disponibilizado séries temporais de imagens com mais de 10 anos de histórico de aquisição. Esse é o caso do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (Modis), lançado a bordo das plataformas Terra e Aqua em 1999 e 2002, respectivamente. Este sensor disponibiliza imagens a cada 1-2 dias, com resolução espacial de 250 a 1000 m (JUSTICE et al., 2002; SOARES et al., 2007). Um dos principais produtos derivados do Modis é o índice de vegetação realçado (EVI) (HUETE et al., 2002).

Por meio das séries temporais, é possível extrair membros de referência (assinaturas temporais) característicos de determinadas fitofisionomias ou culturas agrícolas (SAKAMOTO et al., 2005; SANTANA et al., 2010; COUTO Jr. et al., 2013). Alguns parâmetros biofísicos da vegetação podem ser estimados a partir dessas séries temporais, como a produtividade primária bruta (SILVA et al., 2013) e as seguintes métricas fenológicas: taxas de rebrota, senescência, produtividade total e sazonal; valores de mínimo e máximo, comprimento e amplitude alcançados no início, meio e fim das estações climáticas (EKLUNDH e JÖNSSON, 2012).

Uma das regiões do Cerrado que se destaca pela necessidade de estudos fenológicos mais aprofundados é o Oeste da Bahia. Essa região constitui-se em uma das principais fronteiras agrícolas do país (MENKE et al., 2009; SANO et al., 2011) e é caracterizada pela predominância de solos arenosos, muito suscetíveis aos processos erosivos (BRASIL, 1982, 2003). Esta pesquisa objetivou caracterizar a fenologia da cobertura vegetal do Oeste da Bahia por meio de métricas fenológicas derivadas de séries temporais de EVI obtidas pelo sensor Modis, do período de 2000-2011. A premissa utilizada nesse estudo é a de que métricas fenológicas, extraídas de séries temporais de EVI, permitem a identificação e análise das fenofases e, portanto, subsidiam a caracterização

fenológica das diferentes classes de cobertura vegetal natural e antrópica, representativas da área de estudo.

6.2 - MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende a mesorregião do Extremo Oeste da Bahia (Figura 6.1), delimitada aproximadamente entre as coordenadas 10,05° e 15,30° de latitude sul e entre 43,25° e 46,70° de longitude oeste. Esta região, inserida no bioma Cerrado, é caracterizada pela sazonalidade climática bem definida: inverno seco e verão chuvoso (AB'SABER, 2003) e tipologia climática tropical continental, o que corresponde, na classificação de KÖPPEN (1948), ao clima Aw e por um mosaico de vegetação com formações campestres, savânicas e florestais (RIBEIRO e WALTER, 2008). Além das fitofisionomias diversificadas, o Oeste da Bahia é marcado pela intensa atividade agrícola e por pastagens cultivadas (BRANNSTROM et al., 2008; SANO et al., 2011).

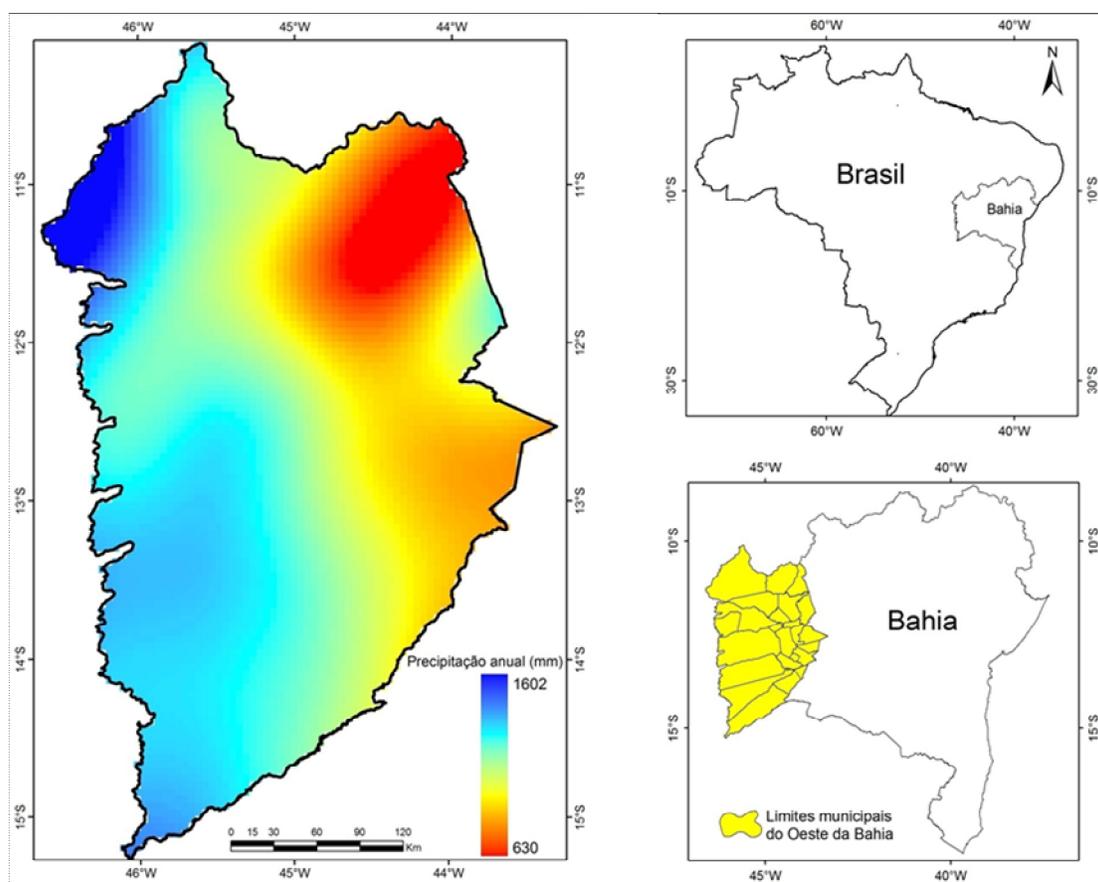


Figura 6.1 - Mapa de localização do Oeste da Bahia, com destaque para o mapa do índice pluviométrico anual da região. Fonte: elaborado com base na SEI (1999).

Os dados básicos de sensoriamento remoto utilizados nesta pesquisa foram as séries temporais de EVI, *tile* h13v10, do produto MOD13Q1 (resolução espacial = 250 m; resolução temporal = 16 dias). O período considerado foi a série temporal de 12 anos (2000-2011), totalizando 276 imagens. O EVI (Eq. 6.1) foi desenvolvido como alternativa para minimizar algumas limitações existentes em outros índices de vegetação como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), tais como a interferência da atmosfera e do solo (JUSTICE et al., 1998; HUETE et al., 2002). Além disso, o EVI discrimina melhor a vegetação quanto à estrutura do dossel e densidade (HUETE et al., 2002; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

$$EVI = 2,5 \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VM}}{\rho_{IVP} + 6\rho_{VM} - 7,5\rho_{AZ} + 1} \quad (6.1)$$

onde: ρ_{AZ} = reflectância na banda espectral do azul (MODIS banda 3); ρ_{VM} = reflectância na banda espectral do vermelho (MODIS banda 1); e ρ_{IVP} = reflectância na banda espectral do infravermelho próximo (MODIS banda 2).

As séries temporais foram inicialmente processadas no programa computacional Timesat (JÖNSSON e EKLUNDH, 2002, 2004), o qual permite a filtragem dos dados para a remoção dos ruídos por meio de três algoritmos de suavização. O algoritmo utilizado nesse estudo foi o de logística dupla. Os procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa estão descritos na Figura 6.2.

O comportamento fenológico da vegetação está relacionado aos efeitos da sazonalidade, principalmente no que tange à precipitação, temperatura e fotoperíodo (comprimento do dia, isto é, números de horas de radiação solar). Para o Timesat, cada estação corresponde a um ciclo completo de crescimento da vegetação, ou seja, um ciclo fenológico (EKLUNDH e JÖNSSON, 2012). Desta forma, as métricas representam as características da vegetação dentro do seu ciclo fenológico (fenofases), conforme se observa na Figura 6.3. As métricas são variáveis adimensionais, calculadas, por exemplo, com base na curva espectro-temporal de EVI, extraída de séries temporais. A partir destas métricas, delimitaram-se o início e o fim de cada ciclo completo da vegetação e identificou-se a quantidade de estações existente na série temporal analisada.

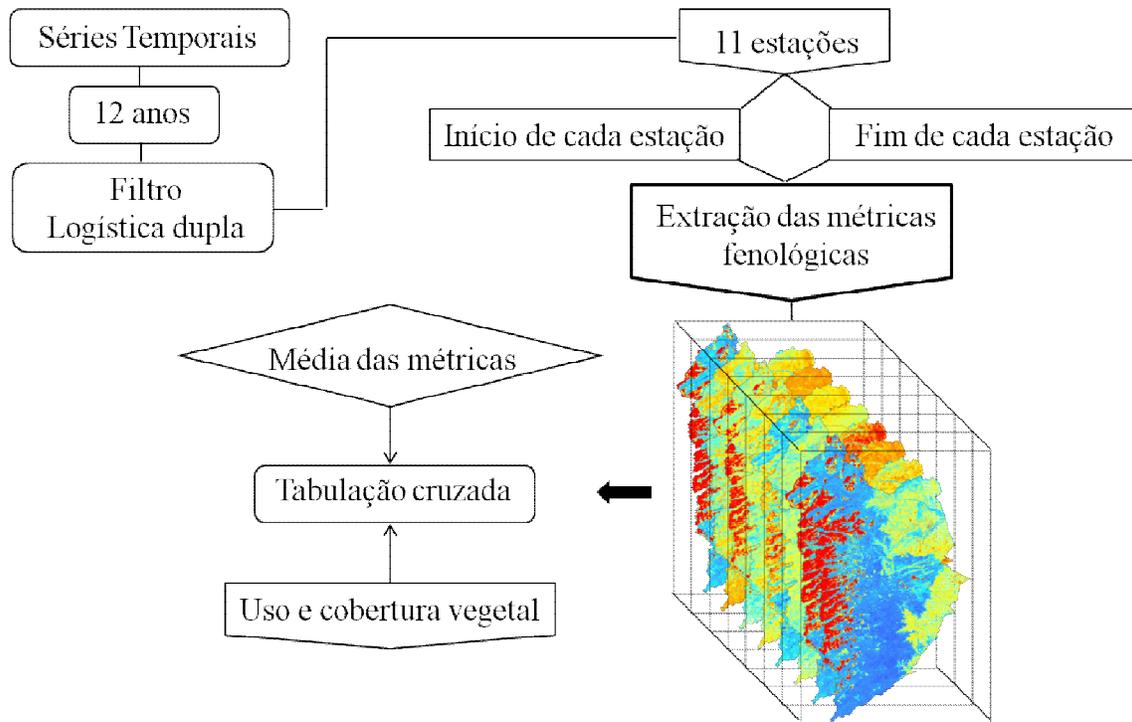


Figura 6.2 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados nesta etapa da pesquisa.

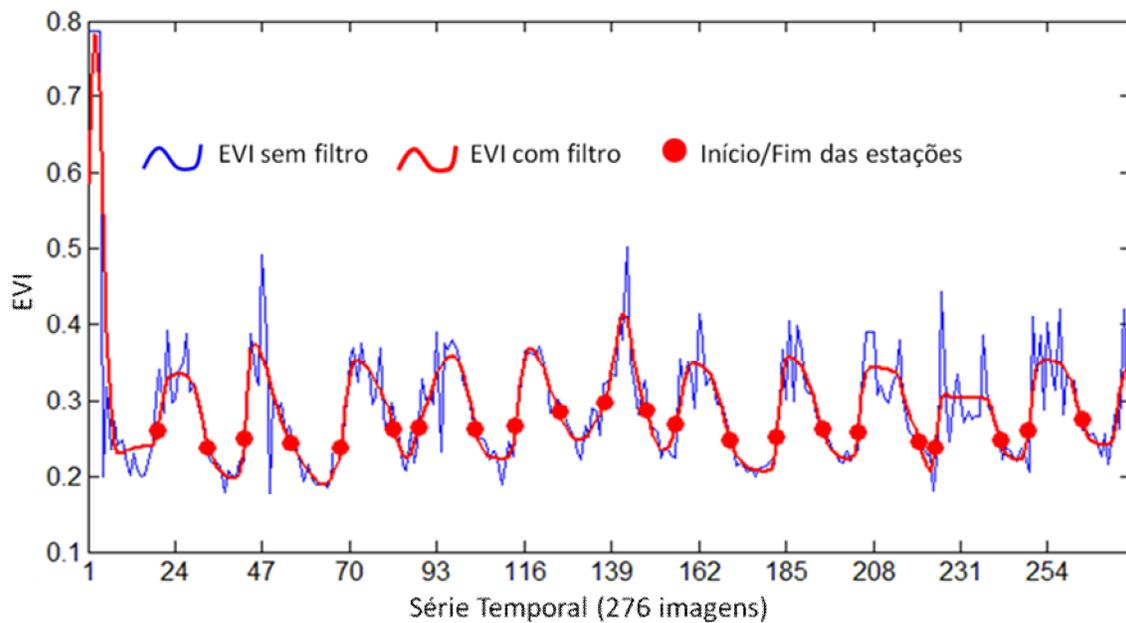


Figura 6.3 - Curva espectro-temporal de EVI (com filtro e sem filtro) típica de Cerrado ralo do município de São Desidério, Bahia, com destaque para o início e fim das estações na série temporal.

Foram identificados ainda os valores mínimos encontrados para o início e os valores máximos encontrados para o fim de cada ciclo fenológico completo de todas as áreas analisadas, conforme recomendação de Eklundh e Jönsson (2012). Tais valores são utilizados para extrair as métricas fenológicas relacionadas a cada estação. A despeito de se ter uma série temporal de doze anos, extraíram-se apenas métricas para onze ciclos, haja vista que o início do primeiro ano e o fim do último ano são desconsiderados pelo programa Timesat na geração das métricas, na tentativa de se extrair ciclos completos.

Desta forma, os seguintes parâmetros foram calculados para cada ciclo (Figura 6.4): amplitude, que demonstra a variabilidade da produtividade; comprimento, que corresponde ao tempo de duração do ciclo; valores mínimo e máximo encontrados nos ciclos analisados; primeira derivada, que corresponde à taxa de verdejamento (*greenup*) da vegetação, doravante denominada rebrota; segunda derivada, que se refere à perda de biomassa fotossinteticamente ativa, isto é, equivale à senescência da vegetação; integral maior, que é similar à produtividade primária da vegetação, neste estudo denominada de produtividade total; e integral menor, que correspondente à produtividade sazonal da vegetação (EKLUNDH e JÖNSSON, 2012).

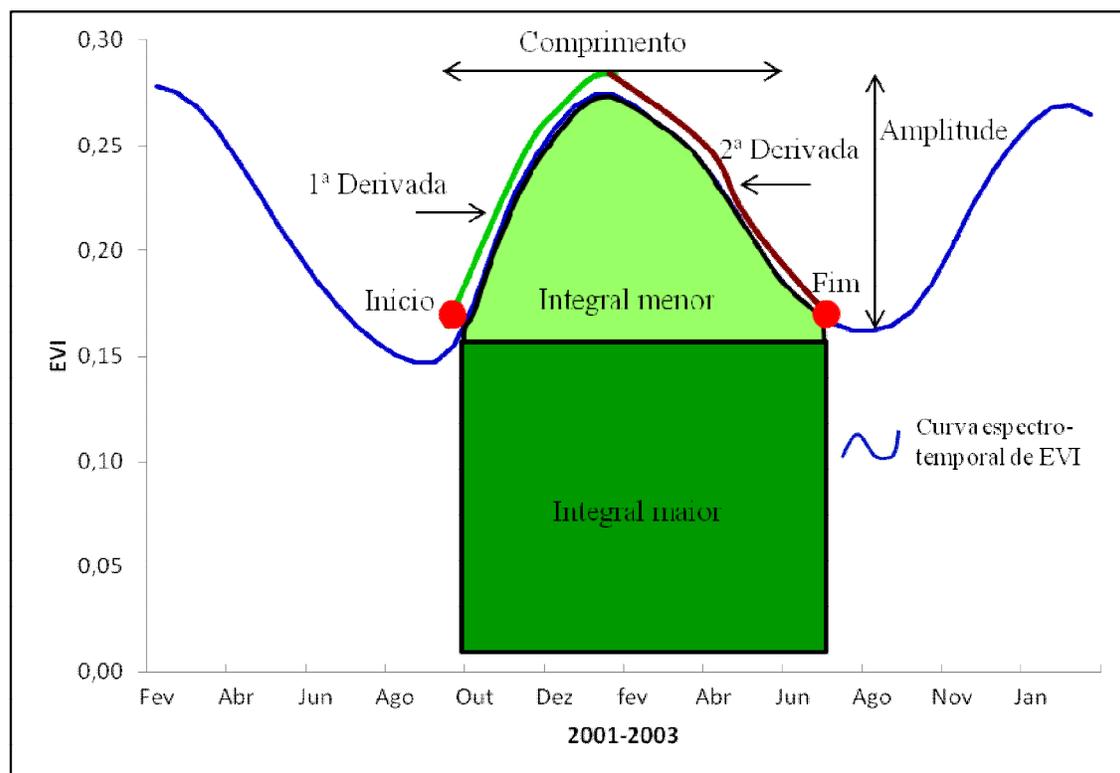


Figura 6.4 - Demonstração da extração das métricas fenológicas a partir da curva espectral-temporal de EVI correspondente ao Cerrado ralo, localizada no município de Barreiras, no período de 2001-2003.

A partir das séries temporais filtradas pelo algoritmo de logística dupla, identificaram-se os menores valores de início da estação e os maiores do fim da estação (EKLUNDH e JÖNSSON, 2012) em cinco áreas diferentes e bem distribuídas na região Oeste da Bahia.

Com base nestes parâmetros, selecionaram-se o menor valor do início da estação e o maior do fim da estação entre todas as áreas analisadas para cada ano e identificaram-se onze estações. A partir dessa seleção, extraíram-se as métricas fenológicas. Posteriormente, foram obtidas as médias das métricas das onze estações identificadas para caracterizar a fenologia das coberturas vegetais natural e antrópica da área de estudo.

Para analisar a correspondência das métricas fenológicas às coberturas vegetais natural e antrópica, agruparam-se as fitofisionomias de acordo à formação vegetal a qual pertence, pois observaram-se nas métricas fenológicas a clara expressão de tais formações, formando regiões homogêneas. As classes de cobertura vegetal selecionadas para o estudo foram: formação campestre; formação savânica; floresta estacional; e agropecuária (Figura 6.6). Essas foram selecionadas com suporte no mapa de cobertura vegetal natural e antrópica da área de estudo (Figura 6.5), produzido a partir dessa mesma série temporal de EVI do sensor MODIS, processada por meio de técnica de transformação por *Minimum Noise Fraction* (MNF) e classificada pelo algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Capítulo 5).

As métricas fenológicas resultantes das séries temporais de EVI, por corresponderem aos dados de natureza contínua, foram fatiadas em intervalos de classes, utilizando-se o método de quebras naturais (*jenks*) (VALLADARES et al., 2012). Definiram-se quatro classes para cada métrica fenológica, visando relacionar estes intervalos estabelecidos às classes de vegetação natural e antrópica. Para tanto, realizaram-se as tabulações cruzadas entre o mapa de cobertura vegetal e as métricas fenológicas.

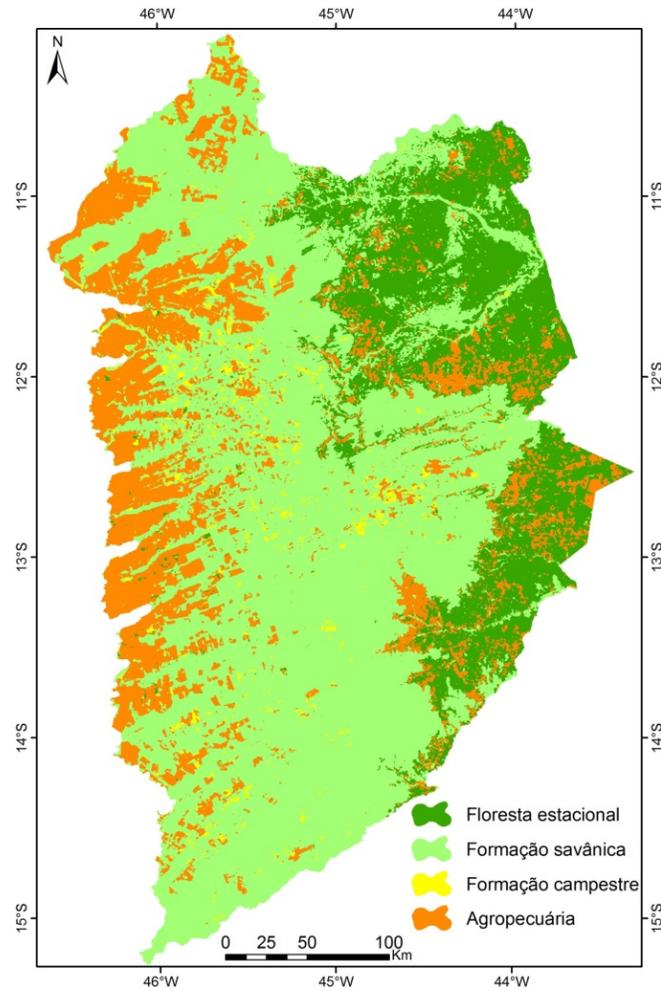


Figura 6.5 - Mapa de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia, derivado a partir de séries temporais de EVI do sensor Modis.

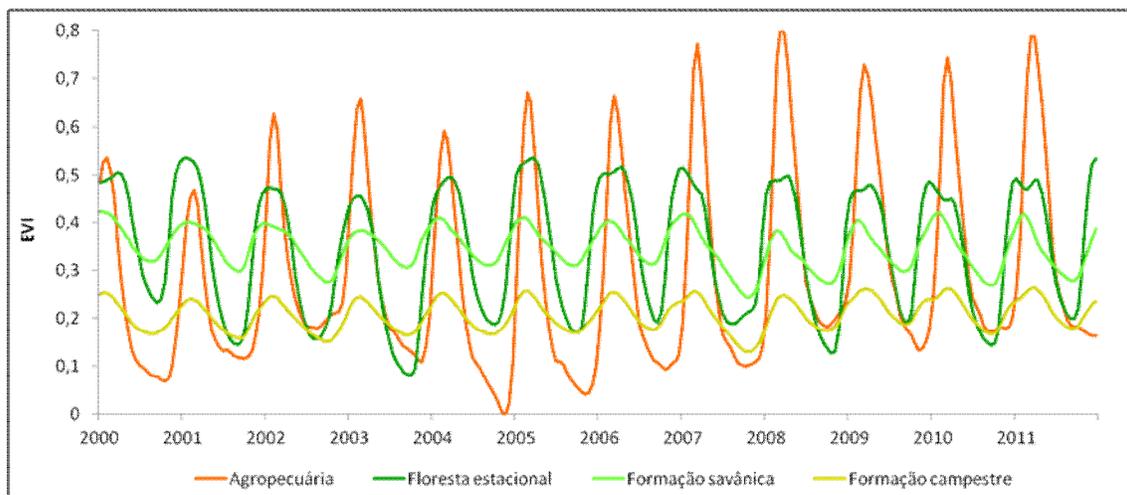


Figura 6.6 - Assinaturas temporais de EVI representativas das macroclasses consideradas na análise das métricas fenológicas no Oeste da Bahia.

6.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento médio das métricas fenológicas dos onze ciclos completos das variações anuais da vegetação, compreendidos entre os períodos de 2000-2011 é mostrado na Figura 6.7. A caracterização fenológica da área de estudo permitiu inferir acerca das adaptações vegetativas que evidenciam o periodismo da vegetação no Oeste da Bahia.

Observou-se grande heterogeneidade na representação das métricas fenológicas, pois o Cerrado é composto por um mosaico de formações campestre, savânica e florestal (COUTINHO, 1990; RIBEIRO e WALTER, 2008). Em outras palavras, as distintas fitofisionomias, que implicam em diferenças em relação ao índice de área foliar, densidade de indivíduos, teor de água, estrutura vegetal (dossel), entre outros parâmetros, apresentaram comportamentos diferenciados em relação aos efeitos da sazonalidade.

As imagens apresentadas na Figura 6.7 sintetizam as curvas espectro-temporais de EVI da área de estudo, as quais apresentam variabilidades inter e intra-anuais. Estas curvas permitiram analisar, respectivamente, os estágios de sucessão e fenologia das plantas (SANTANA et al., 2010).

Os resultados apontaram os efeitos da sazonalidade da precipitação na dinâmica fenológica das principais classes de cobertura vegetal natural e antrópica. Todavia, deve-se considerar que a precipitação total anual não caracteriza a sazonalidade, mas a forma como as chuvas são distribuídas ao longo do ano, isto é, o regime pluviométrico, estando as métricas fenológicas diretamente associadas a tal distribuição. A compreensão dos ciclos fenológicos da vegetação no Oeste da Bahia perpassa pela análise das características fenológicas da vegetação de Cerrado, conforme ressaltada por Becerra et al. (2009), que afirmaram que a mesma passa por etapa de produção de novas folhas e aceleração dos processos metabólicos na estação chuvosa. Tal alternância é comandada pela disponibilidade hídrica.

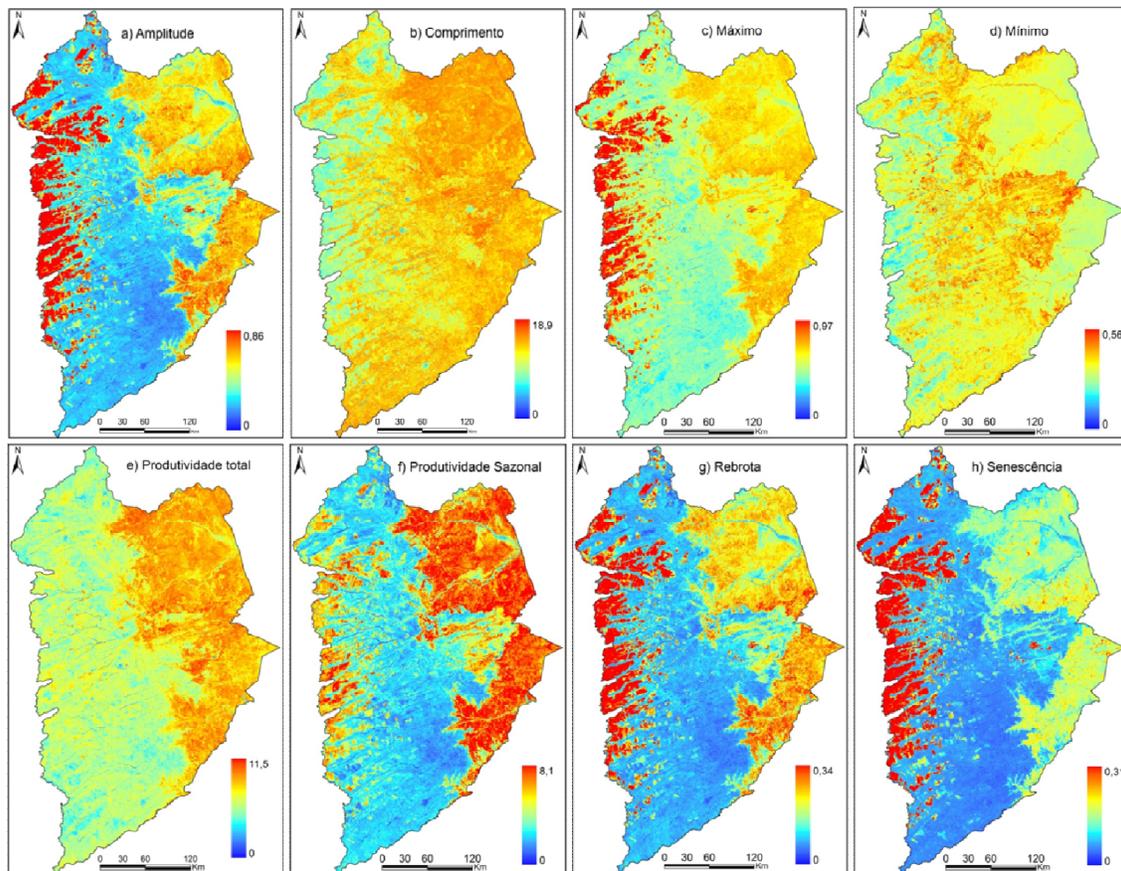


Figura 6.7 - Métricas fenológicas do Oeste da Bahia extraídas da série temporal de EVI do período de 2000-2011.

As métricas fenológicas estão relacionadas às características naturais de cada tipo de vegetação, o que remete às características climáticas (temperatura, índice e regime pluviométricos) e, no caso da classe de cobertura vegetal antrópica, as métricas referem-se ao tipo de cultivo e manejo utilizados. A taxa de rebrotas da classe de cultura agrícola, por exemplo, é mais elevada em função dos insumos e melhoramentos genéticos dos cultivares utilizados do que devido às características naturais da planta. A taxa de senescência para esta classe é bastante elevada (Figura 6.8), pois as culturas agrícolas predominantes na área de estudo são anuais, portanto, maturam em um intervalo de tempo muito curto, o que implica no acréscimo acentuado da senescência nestas áreas agrícolas. Outro aspecto importante é o fato da colheita da produção deixar o solo exposto por um período relativamente longo.

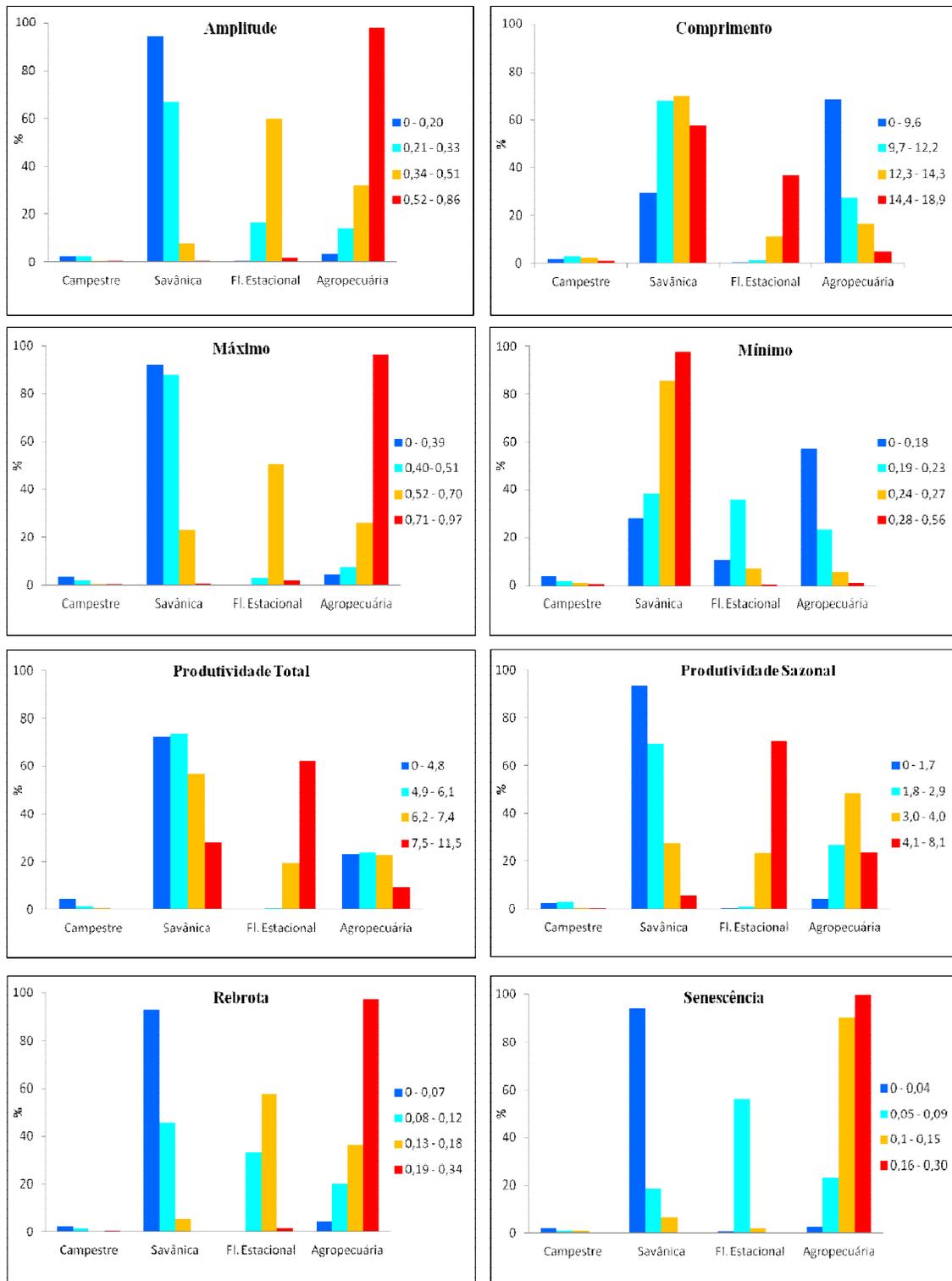


Figura 6.8 - Resultado da tabulação cruzada (em %) das métricas fenológicas com o mapa de cobertura vegetal.

A Figura 6.8 corresponde ao resultado da representatividade das métricas fenológicas às formações vegetais e à agropecuária a partir do cálculo de tabulação cruzada. Para a métrica de amplitude, observou-se que os valores mais elevados estão associados à classe de cultura agrícola, pois são cultivos que utilizam técnicas modernas e controladas, inerentes à agricultura de precisão, que proporcionam às curvas de EVI alcançar valores superiores aos das classes de vegetação natural analisadas neste estudo.

Outra razão que favorece o aumento da amplitude para a classe agropecuária é o fato dela alcançar, no caso de culturas agrícolas temporárias, valores muito baixos de EVI após a colheita, restando o solo exposto ou solo coberto com palhadas (restos de cultura). No caso de pastagens cultivadas, a vegetação fica seca praticamente na sua totalidade durante os seis meses de estação seca. Desta forma, pode se afirmar que, para a classe antrópica, o comportamento referente aos dados de amplitude está relacionado à prática de agricultura de sequeiro predominante na área de estudo, bem como às técnicas de manejo empregadas ou à intensa variação sazonal da biomassa (verde ou seca) das pastagens cultivadas.

A análise neste estudo, a partir das formações vegetais, e não das fitofisionomias, implicou na necessidade de se agrupar também as classes de cobertura vegetal antrópica em uma única classe. A despeito de se ter mesclado pastagens com culturas agrícolas (agropecuária), Cunha et al. (2013) alertaram que este tipo de representação genérica pode implicar em erros, uma vez que cada tipo de cultura agrícola possui diferentes ciclos fenológicos e características biofísicas e que, por sua vez, são distintos dos da pastagem.

Dentre as classes naturais analisadas, a floresta estacional é a que apresenta amplitude mais elevada, devido às características de decidualidade e semidecidualidade, as quais empreendem valores de EVI baixos no período de seca e altos no período chuvoso. Todavia, em termos comparativos, este tipo de vegetação assume valores de amplitude intermediários, pois não supera os encontrados na classe antrópica, mas são bem mais expressivos do que os da formação savânica.

As formações campestre e savânica são as que detêm os menores valores de amplitude, o que significa que a variabilidade da produtividade é mais tênue. Tais características estão intrinsecamente relacionadas aos fatores biológicos destas fitofisionomias de Cerrado, como adaptação à seca (perda parcial das folhas na estação seca) e aos fatores físicos da paisagem, tais como o índice pluviométrico, relevo e solo.

As áreas cujo ciclo fenológico apresentou maior comprimento, isto é, maior duração do ciclo, foi a floresta estacional, vindo, a seguir, as fitofisionomias associadas à formação savânica. Tal fato deve-se à maior capacidade adaptativa destas fitofisionomias às características da sazonalidade climática da área de estudo.

Os menores valores encontrados na métrica fenológica de comprimento correspondem à classe agropecuária. As culturas agrícolas, predominantes nesta classe generalizada, são controladas por técnicas de cultivos modernas e por insumos agrícolas, apresentando, desta forma, ciclos relativamente mais curtos. O aumento da intensidade do uso do solo no Oeste da Bahia tem provocado uma redução dos valores da métrica de comprimento, devido à inserção de cultivares com ciclos cada vez mais curtos (CRUZ et al., 2011).

Notadamente para a métrica de máximo EVI, os valores mais elevados são alcançados pela agropecuária, conforme era esperado. Salienta-se que a borda ocidental da área de estudo, onde tal classe é predominante, corresponde às áreas de maior precipitação da região. Os valores medianos para esta métrica são encontrados nas áreas de floresta estacional e os valores mais baixos são encontrados nas formações savânica e campestre.

A classe de agropecuária, no que tange a métrica de mínimo EVI, apresentou os valores mais baixos, pois a maioria dessas áreas fica com solos expostos ou cobertos por restos de culturas agrícolas (palhada seca) durante boa parte do ano, conforme já ressaltado anteriormente, ou seja, os valores de mínimo de EVI encontrados correspondem às épocas de descanso/preparação do solo e plantio. Algumas áreas de cultivo agrícola não apresentaram valores referentes à métrica mínimo ainda menores porque as técnicas de plantio direto e de forrageiras (plantas de cobertura verde como sorgo e milho logo após a colheita de grãos) nessas áreas têm sido muito empregadas (SANO et al., 2011). Os valores intermediários relacionados à métrica de mínimo foram encontrados para a floresta estacional (decidual e semidecidual); Os valores de mínimo mais elevados estão associados às formações savânicas, haja vista que esta formação, mesmo durante a seca, apresenta alguma atividade fotossintética, pois algumas das espécies que integram estas fitofisionomias não perdem totalmente as folhas e outras estão sempre verdes (LENZA e KLINK, 2006).

A maior proporção de produtividade total foi encontrada na floresta estacional, enquanto os valores intermediários estiveram associados à formação savânica. Os valores mais baixos corresponderam às classes de cobertura antrópica (agropecuária) e à formação campestre. Portanto, pode-se afirmar que a densidade de indivíduos e a estrutura da vegetação influem diretamente nesta métrica fenológica.

As maiores taxas de produtividade sazonal ocorreram na floresta estacional devido aos processos metabólicos inerentes às fitofisionomias que integram esta formação vegetal (RIBEIRO e WALTER, 2008), bem como pelas características climáticas das áreas onde elas se encontram. Os valores intermediários estiveram associados às áreas de agricultura de sequeiro e os de menor produtividade sazonal às formações savânica e campestre.

Quanto ao resultado da métrica rebrota, observou-se que a classe correspondente à agropecuária é a que deteve valores mais elevados, pois o ciclo de vida das culturas agrícolas anuais é o mais curto dentre todas as classes consideradas nesse estudo. Os valores intermediários de rebrota correspondem à floresta estacional, o que, analogamente às outras fitofisionomias naturais, implica afirmar que apresenta elevada taxa de verdejamento assim que se inicia o período chuvoso. Os menores valores de rebrota estão relacionados à formação savânica, composta predominantemente de Cerrado ralo e Cerrado típico e formação savânica (Campo sujo).

No caso da floresta estacional, as copas podem cobrir até 90% da paisagem na estação chuvosa, o que explica a elevada taxa de rebrota até alcançar o ápice do *greenup*, bem como apresenta alto índice de senescência, porque perdem parcialmente ou totalmente as folhas. Estes dois processos, rebrota e senescência, caracterizam o perfil espectro-temporal desta fitofisionomia, pois alcança valores de EVI elevados no período chuvoso e valores muito baixos no período de seca. Onde o índice de precipitação é menor, a rebrota é mais rápida, por causa da adaptação destas fitofisionomias a essa característica climática restritiva, o que corresponde a uma estratégia adaptativa da vegetação para otimizar os processos fenológicos (vegetativos e reprodutivos) em ambientes tipicamente sazonais (OLIVEIRA, 1998). Todavia, os elevados valores de rebrota nas áreas de cultivos agrícolas não estão associados exclusivamente ao regime pluviométrico, mas também ao uso de técnicas controladas da chamada agricultura de precisão.

As culturas agrícolas são as que perdem o vigor vegetativo de forma mais brusca, apresentando valores elevados de senescência, após os processos de maturação e colheita. Em seguida, tem-se a floresta estacional que apresenta valores de senescência intermediários, chegando a perder totalmente ou parcialmente as folhas durante a estação seca. A formação savânica perde folhas de forma relativamente mais lenta e algumas espécies dessa vegetação não alcançam a deciduidade total. Portanto, é natural que os menores valores de senescência estejam associados às formações savânicas e campestre.

Desta maneira, a floresta estacional apresentou maior taxa de senescência do que a formação savânica. Algumas fitofisionomias savânicas passam por um processo de perda, total ou parcial, de folhas na estação seca e rebrota acelerada com aumento dos processos metabólicos na estação chuvosa (BECERRA et al., 2009), mas este processo é ainda mais expressivo para a floresta estacional. A taxa de senescência, tal qual a taxa de rebrota, apresentada na classe de cobertura vegetal antrópica não está relacionada apenas à precipitação, mas ao tipo de cultura e manejo utilizados. A senescência das classes naturais está correlacionada negativamente com a precipitação. Em contrapartida, as áreas com índice pluviométrico mais elevado, que deveriam apresentar menor taxa de senilidade, apresentaram valores elevados. Isto ocorreu porque nestas áreas predominam as culturas

agrícolas, fato este intrinsecamente relacionado ao tipo de uso (agricultura de sequeiro) e ao manejo.

Observou-se um padrão atípico, do ponto de vista biofísico da paisagem, ao se analisar as métricas fenológicas nas áreas de cultivos agrícolas, como as métricas de rebrota e senescência bastante acentuadas. Isto ocorre porque as classes de cobertura vegetal antrópica comportam-se de maneira distinta e respondem diferentemente às condições ambientais, pois o processo é controlado, principalmente, pela ação humana em detrimento da dinâmica natural. Observou-se maior uniformidade nessa classe do que nas classes naturais que apresentaram maior complexidade no seu comportamento espectro-temporal, corroborando os resultados encontrados por Sakamoto et al. (2005) e Wardlow et al. (2007). Estas características apontam para uma fragmentação da vegetação na área de estudo, em função da expansão e intensidade do uso agrícola.

6.4 - CONCLUSÕES

- 1- As séries temporais permitiram extrair as métricas fenológicas e caracterizar a fenologia das formações vegetais naturais e antrópicas da área de estudo;
- 2- As características fenológicas identificadas estão relacionadas, principalmente, aos efeitos da sazonalidade climática para as classes de cobertura natural, bem como às práticas de manejo para a classe antrópica;
- 3- As métricas fenológicas extraídas de séries temporais de EVI permitiram uma análise sinóptica acerca do comportamento sazonal da vegetação, potencializando estudos da fenologia que são realizados de forma muito pontual ou apenas para uma espécie; e
- 4- O método utilizado na região Oeste da Bahia pode ser replicado para outras áreas que integram o bioma do Cerrado, assim como no bioma da Caatinga, que também apresenta sazonalidade marcante, no intuito de se conhecer melhor a dinâmica fenológica das suas fitofisionomias.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de pesquisa de produtividade ao segundo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. Os **domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Cotia, SP: Ateliê, 2003. 159 p.

BECERRA, J. A. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVALÁ, R. C. S. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 125-134, 2009.

BRADLEY, B. A.; JACOB, R. W.; HERMANCE, J. F.; MUSTARD, J. F. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 2, p. 137-145, 2007.

BRANNSTROM, C.; JEPSON, W.; FILIPPI, A. M.; REDO, D.; XU, Z.; GANESH, S. Land change in the Brazilian savanna (Cerrado), 1986-2002: comparative analysis and implications for land-use policy. **Land Use Policy**, v. 25, p. 579-595, 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD. 23 Brasília; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 660p., 5 mapas (Levantamento de Recursos Naturais, 29), 1982.

BRASIL. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia: Sistema de Informações Geográficas – SIG e Mapas**. CPRM, 2003. CD-ROM.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. In: GOLDHAMMER, J. G. (ed). **Fire in the Tropical Biota**, Springer-Verlag, p. 82-105, 1990.

COUTO Jr., A. F.; CARVALHO Jr., O. A.; MARTINS, E. S. Séries temporais de NDVI, EVI e NDWI do sensor MODIS para caracterização fenológica do algodão. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 1, p. 199-210, 2013.

CRUZ, T. V.; PEIXOTO, C. P.; MARTINS, M. C.; Crescimento e produtividade de soja em diferentes épocas de semeadura no Oeste da Bahia. **Scientia Agraria**, v.11, n. 1, p. 33-42, 2010.

CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S. **Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil**. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 139-152, 2013.

EKLUNDH, L.; JÖNSSON, P. **Timesat 3.1: Software Manual**. Lund University and Malmö University, Suécia, 82 p., 2012.

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. Ecofisiologia e fenologia do feijoeiro. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. (Ed.). **Tecnologia da Produção do Feijão Irrigado 2**, Piracicaba: Publique, p. 1-20, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. EPIPHANIO, J. C. N. (Coord. Trad.). São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction and noise removal by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 8, p.1824-1832, 2002.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT: a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 1, p. 833-845, 2004.

JUSTICE, C O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p.1228-1247, 1998.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3-15, 2002.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Econômica. 479 p., 1948.

LEE, R.; YU, F.; PRICE, K. P. ELLIS, J.; SHI, P. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 12, p. 2505-2512, 2002.

LENZA, E.; KLINK, C. A. Comportamento fenológico de espécies lenhosas em um Cerrado sentido restrito de Brasília, DF. **Revista Brasileira de Botânica**. v. 29, n. 4, p. 627-638, 2006.

LIETH, H. Introduction to phenology and the modeling of seasonality. In: LIETH, H. (ed.), **Phenology and seasonality modeling**. Berlin: Springer Verlag, p. 3-19, 1974.

MENKE, A. B.; CARVALHO Jr., O. A.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luís Eduardo Magalhães – Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 3, p. 315-326, 2009.

MORELLATO, L. P. C. As estações do ano na floresta. In: MORELLATO, P. C.; LEITÃO-FILHO, H. F. (Orgs.). **Ecologia e preservação de uma floresta tropical urbana**. Campinas: Editora da Unicamp p. 37-41, 1995.

MORELLATO, L. P. C. **Fenologia de árvores, arbustos e lianas em uma floresta semidecídua no sudeste do Brasil**. Tese de doutorado, Universidade de Campinas, Campinas, 1991.

OLIVEIRA, P. E. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (EDS.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. BRASÍLIA: Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, p. 273-287, 2008.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 127 p.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, p. 151-199, 2008.

SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M.; TORITANI, H.; SHIBAYAMA, M.; ISHITSUKA, N.; OHNO, H. A crop phenology detection method using time series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p. 366-374, 2005.

SANO, E. E.; SANTOS, C. C. M.; SILVA, E. M.; CHAVES, J. M. Fronteira agrícola do Oeste Baiano: considerações sobre os aspectos temporais e ambientais. **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 479-489, 2011.

SANTANA, O. A.; CARVALHO Jr., O. A.; PIMENTEL, C. M. M.; GOMES, R. A. T.; OLIVEIRA, S. N. Modelagem de espectros temporais NDVI-Modis, no período de 2000 a 2008, na bacia do rio Paracatu, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.28, n. 1, p. 47-60, 2010.

SEI. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. **Balço hídrico do estado da Bahia** (Série Estudos e Pesquisas, 45). Salvador: SEI, 250 p., 1999.

SILVA, G. B. S.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ADAMI, M.; SANO, E. E. *Discriminação da cobertura vegetal do Cerrado matogrossense por meio de imagens MODIS. Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 2, p. 186-194, 2010.

SILVA, B. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MOURA, M. S. B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n. 1, p. 57-64, 2013.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e descrição. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.). **O Sensor Modis e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, p. 3-22, 2007.

TALORA, D. C.; MORELLATO, P. C. Fenologia de espécies arbóreas em floresta de planície litorânea do sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**. v. 23, p.13-26, 2000.

VALLADARES, G. S.; GOMES, A. S.; TORRESAN, F. E.; RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de suscetibilidade à erosão em área rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1376-1383, 2012.

WARDLOW, B. D.; EGBERT, S. L.; KASTENS, J. H. Analysis of time series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 290-310, 2007.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 471-475, 2003.

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O acervo de dados produzidos pelo sensor Terra/Modis tem fomentado uma série histórica relevante de dados de satélites para o estudo de fenômenos geográficos e estimação de parâmetros biofísicos da paisagem. Determinados eventos, principalmente no que tange a cobertura vegetal (natural e antrópica), ocorrem em momentos específicos, não sendo, muitas vezes, passíveis de identificação quando se utilizam imagens de uma única data. Ao contrário, a sequência de imagens com alta resolução temporal proporciona a identificação de fenômenos que ocorrem em intervalos de tempo específicos, bem como permite analisar a sucessão das fenofases do ciclo vegetativo.

Todavia, estes dados são afetados por ruídos, principalmente referentes aos efeitos atmosféricos e, dependendo da região geográfica, a intensidade dos ruídos pode ser muito elevada. A literatura apresenta uma diversidade de algoritmos de filtragens, os quais têm sido utilizados sem uma avaliação mais profunda sobre a sua acúrcia. Geralmente faz-se uma análise visual qualitativa, sendo raramente avaliados estatisticamente. Independentemente do método, todo filtro pode incorrer na perda de informação. O que deve ser considerado é a preservação da relação sinal/ruído.

A avaliação dos dados contidos nos arquivos denominados *Pixel Reliability* do produto MOD13Q1 demonstrou que os dados Modis para o Oeste da Bahia possuem boa qualidade radiométrica. Apenas 5% dos pixels, referentes ao período de 2000 a 2011, estavam afetados por nuvens, a maior parte proveniente da estação chuvosa. Essa presença de ruídos pode ser minimizada por meio de aplicação de filtros.

Nesta pesquisa, aplicaram-se os três filtros implementados no programa Timesat (Logística dupla, Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico) e avaliaram-se os resultados alcançados por cada suavizador. Esses métodos de suavização, além de serem prontamente acessíveis (o Timesat é um *software* gratuito), geraram resultados satisfatórios na remoção dos ruídos. O método de Logística dupla foi o que apresentou melhor resultado.

De posse dos dados filtrados, foi possível discriminar as principais classes de cobertura vegetal natural e antrópica presentes na área de estudo, utilizando-se as curvas espectro-temporais de EVI como membros de referência. A assinatura temporal representativa de cada classe já se constitui em um dado relevante, pois a partir dessa é possível extrair uma gama de informações acerca do comportamento das fitofisionomias e dos tipos de culturas agrícolas e, de seus correspondentes manejos, além de possibilitar a identificação de épocas de eventuais intervenções antrópicas como desmatamento, queimadas ou renovação de pastagens.

A integração de séries temporais do sensor Modis permitiu a extração de métricas fenológicas, a partir das quais se pôde inferir sobre os processos de rebrota e senescência das fitofisionomias de Cerrado e da agropecuária no Oeste da Bahia. Além disso, identificaram-se os valores de máximo e mínimo de EVI encontrados em cada classe durante todo o período analisado. Informações como taxas de produtividades total e sazonal das fitofisionomias analisadas e valores de amplitude e comprimento de cada ciclo fenológico também foram identificados para todos os ciclos fenológicos analisados no período de 2000-2011. Tais parâmetros permitiram a derivação de métricas fenológicas que possibilitaram a análise do comportamento da fenologia da cobertura vegetal natural e antrópica da área de estudo.

As classes de cobertura vegetal antrópica apresentaram maior dificuldade de discriminação devido à grande complexidade das suas assinaturas temporais, as quais são em função do tipo de cultura agrícola, da prática de rotação com duas ou mais culturas, do tipo de manejo de solo utilizado (por exemplo, plantio convencional e plantio direto) e do momento (tempo) em que ocorreram as intervenções antrópicas. As classes de cobertura vegetal natural, por sua vez, apresentaram assinaturas temporais mais homogêneas e em maior conformidade com os efeitos da sazonalidade, facilitando a sua discriminação. Apesar da grande potencialidade das séries temporais no estudo da paisagem, o tratamento e o processamento desses dados exigem algoritmos robustos e capacidades de memória RAM (*Random Access Memory*) e de armazenamento em disco relativamente elevados.

Resultados dessa pesquisa mostraram que as séries temporais possuem grande potencialidade na análise da paisagem, desde que se avalie a qualidade dos dados, removam-se os ruídos por meio dos suavizadores para posteriormente extrair os parâmetros biofísicos que se almejam.

As séries temporais apresentam relevância maior para as áreas de grande biodiversidade fitofisionômica e intensa dinâmica em relação ao uso do solo, como o Oeste da Bahia, pois além de discriminar as classes natural e antrópica da cobertura vegetal possibilitam identificar quando houve alteração na paisagem e discriminar o tipo de intervenção antrópica ocorrida. A área de estudo é foco de grande pressão para expansão das fronteiras agrícolas, o que desperta para a necessidade de implementação de políticas públicas com vistas à proteção ambiental.

Todos os objetivos específicos propostos nesta pesquisa foram alcançados. A análise da qualidade radiométrica das séries temporais do MOD13Q1, a suavização das séries temporais e a avaliação do melhor método de filtragem disponível no programa Timesat foram considerados no Capítulo 4. A classificação, baseada em assinaturas temporais representativas das principais classes de vegetação natural e antrópica, resultou

em um mapa de cobertura vegetal natural e antrópica da área de estudo (Capítulo 5). A caracterização do comportamento fenológico das coberturas vegetais naturais e antrópicas por meio das séries temporais (Capítulo 6) apontam para a necessidade de continuidade na extração de outros parâmetros biofísicos da paisagem dessa área de estudo. Sugere-se ainda replicar a análise aqui desenvolvida para outras áreas dentro do próprio Cerrado e também em outros biomas, particularmente naqueles de marcante sazonalidade climática como a Caatinga e o Pantanal.