

ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA DO ESTADO DA VEGETAÇÃO USANDO NDVI
NA BACIA DO RIO ITAPEMIRIM-ES

Fernanda França Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho

Rio de Janeiro

Março de 2019

ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA DO ESTADO DA VEGETAÇÃO USANDO NDVI
NA BACIA DO RIO ITAPEMIRIM-ES

Fernanda França Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo, D.Sc.

Prof. Daniel Medeiros Moreira, D.Sc.

Prof. José Otavio Goulart Pecly, D.Sc.

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

Prof. Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2019

Ferreira, Fernanda França

Análise de persistência do estado da vegetação usando NDVI na bacia do Rio Itapemirim-ES/ Fernanda França Ferreira – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIV, 160 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 123 – 136.

1. Modelagem hídrico-ambiental por satélite. 2. Análise de Persistência. 3. Índice de vegetação NDVI. 4. Imagem MODIS. 5. Cultura do café. I. Rotunno Filho, Otto Corrêa. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente ao meu orientador, professor Otto Corrêa Rotunno Filho, pelo direcionamento, orientação e motivação na realização deste trabalho.

Aos meus pais, Cristina França e José Antonio Ferreira, e a toda minha família pelo apoio.

Ao professor José Paulo Soares de Azevedo, pelo incentivo e pela abertura de oportunidades em projetos para discussão sobre o tema de gestão de bacias hidrográficas.

Agradeço, em especial, a Vitor Paiva Alcoforado Rebello, doutorando do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O), por toda orientação e pelo suporte na concepção e na implementação da metodologia proposta nesta dissertação mediante o desenvolvimento das rotinas computacionais e manipulação de dados.

Ao meu irmão Pedro França, pela ajuda no tratamento de dados e com códigos computacionais, além de todo apoio.

Ao Dr. Daniel Medeiros Moreira, pelo apoio e suporte com a aquisição e tratamento de dados de sensoriamento remoto.

À Dra. Isela Leonor Vasquez Panduro e à Dra. Lígia Maria Nascimento de Araujo, pelo acompanhamento e suporte ao longo do desenvolvimento da dissertação.

Ao pesquisador M.Sc. Itamar Jalón, da Universidade de Tel Aviv, Israel, pelo suporte com rotinas computacionais.

Estendo meu agradecimento aos Professores do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, por todo o apoio acadêmico.

Aos funcionários técnico-administrativos do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, em especial à Secretaria Executiva, nas pessoas de Sra.Marcilia Mascarenhas e Sr.Roberto Mallet, e à Secretaria Acadêmica, nas pessoas de Sra.Elisabeth Cornélio, Sr.Jairo A. Leite, Sra.Márcia Reis e Sra. Zoraide, bem como aos funcionários do Laboratório de Informática do Programa de Engenharia Civil que foram gentis e prestativos quando precisei de sua orientação em todos os trâmites requeridos nesta etapa de minha vida.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos, essencial para minha manutenção durante o período de desenvolvimento desta dissertação. Registra-se, também, que o

presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Complementarmente, em nome do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, agradeço, ainda, o suporte da FAPERJ pelo apoio financeiro através dos projetos PEC/COPPE - FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) – E26/110.753/2012, FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2020) –E-26/010.002980/2014, projeto FAPERJ No. E_12/2015, projeto FAPERJ No. E-22/2016, CNPq Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9, CNPq Edital Universal No. 28/2018 – Processo 435714/2018-0, CNPq Edital No. 12/2016 – Processo 306944/2016-2 e ao projeto MCT / FINEP / CT-HIDRO (2005-2016), bem como à Secretaria de Educação Superior (SESu) – Ministério da Educação (MEC) - FNDE – Programa de Educação Tutorial - PET CIVIL UFRJ, pelo contínuo apoio à pesquisa científica no Brasil.

Agradecimentos extensivos são dirigidos a quem agradeço ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), à Agência Nacional de Águas (ANA), à Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), à Secretaria de Meio Ambiente do Espírito Santo (SEAMA) e ao Instituto do Meio ambiente do Espírito Santo (IEMA) bem como a agências internacionais norte-americanas como a *National Aeronautics Administration* (NASA), *United States Geological Survey* (USGS) e a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), por terem cedido e compartilhado dados para o desenvolvimento do trabalho.

A todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização desta pesquisa.

*Acknowledgment**

The data used in this study were acquired as part of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). The algorithms were developed by the TRMM Science Team. The data were processed by the TRMM Science Data and Information System (TSDIS) and the TRMM office; they are archived and distributed by the Goddard Distributed Active Archive Center. TRMM is an international project jointly sponsored by the Japan Natural Space Development Agency (NASDA) and the U.S National Aeronautics and Space Administration (NASA) office of Earth Sciences.

* Este reconhecimento é solicitado pela NASA's *Earth Science Enterprise* (ESE) quando do uso de dados do TRMM.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA DO ESTADO DA VEGETAÇÃO USANDO NDVI
NA BACIA DO RIO ITAPEMIRIM-ES

Fernanda França Ferreira

Março/2019

Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho

Programa: Engenharia Civil

Resiliência é um conceito fundamental para a compreensão da vegetação como componente dinâmico do sistema climático. Complementarmente, exprime a capacidade dos ecossistemas para tolerar perturbações e recuperar seu estado inicial. Associar resiliência com produção agrícola e manutenção de áreas de pastagem e florestas representa um desafio socioeconômico para o setor agropecuário brasileiro. Em particular, neste trabalho, enfocou-se a cultura do café e áreas de pastagem. O objetivo foi realizar uma análise da evolução da vegetação da bacia hidrográfica do rio Itapemirim ao longo dos anos de 2000 a 2015 para avaliar a persistência e grau de vulnerabilidade do estado da vegetação via monitoramento por satélite. Foi empregado o índice de vegetação por diferença normalizada NDVI em composições de 16 dias a partir de imagens do sensor MODIS. A abordagem proposta avaliou tendências negativas e positivas no crescimento da vegetação, que permitiu classificar esse padrão de comportamento como persistente ou não. Adicionalmente, são calculadas as probabilidades de que determinada persistência se mantenha no tempo, assim como o tempo médio de vida para o decaimento dessa probabilidade. Para vegetação saudável, espera-se que o tempo médio de vida de persistências positivas seja superior ao das persistências negativas, resultado predominante identificado na bacia. O cultivo do café apresentou decaimento positivo bastante superior ao negativo, que, em contraste com a média da bacia, denotou vegetação saudável. Por outro lado, a análise das pastagens mostrou que existe uma tendência de degradação desse tipo de uso do solo, evidenciando uma baixa capacidade de resiliência.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PERSISTENCE ANALYSIS OF VEGETATION STATUS USING NDVI APPLIED TO
THE ITAPEMIRIM RIVER BASIN-ES

Fernanda França Ferreira

March/2019

Advisor: Otto Corrêa Rotunno Filho

Department: Civil Engineering

Resilience is a fundamental concept to understanding vegetation as dynamic component of the climate system. Complementarily, it expresses the ecosystem capacity to tolerate disturbances and recover its initial state. To associate resilience with agriculture production and pasture and forest preservation represents a socio-economical challenge to the Brazilian agriculture and livestock. In particular, this work focused on coffee crops and pasture fields. The objective was to perform an analysis of the evolution of the vegetation of the Itapemirim river basin throughout the years from 2000 to 2015 to evaluate the persistence and degree of vulnerability of the vegetation status with the support of satellite monitoring. NDVI defined by a 16-day composition product based on MODIS images was employed. The proposed approach evaluated negative and positive trends in the vegetation growth, which allowed to classifying such pattern behavior as persistent or not. In addition, the probabilities related to a defined persistence along time are calculated, jointly with the average lifetime for the decay of that probability. It is expected for healthy vegetation that the mean value of time for positive persistences is higher than the one for negative persistence values, which is the predominant result identified in the basin. Coffee crop presented positive decay well above the negative, which, in contrast to the average for the basin, indicated healthy vegetation. On the other hand, pasture analysis showed that there is a tendency of degradation of this type of soil use, highlighting lower resilience capacity.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 A CULTURA DO CAFÉ	8
2.2 FUNDAMENTOS E PRINCÍPIOS DO SENSORIAMENTO REMOTO	12
2.2.1 PRINCIPAIS SENSORES	16
2.2.2 SENSORIAMENTO E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	24
2.3 RESILIÊNCIA DA VEGETAÇÃO	26
2.4 ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES EM SÉRIES ESPAÇO-TEMPORAIS	27
2.5 ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA DA VEGETAÇÃO	32
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	34
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	34
3.2 DADOS OBSERVADOS	35
3.3 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO	39
3.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO	40
3.5 SÉRIE DE NDVI	42
3.5.1 PREPARAÇÃO DE DADOS DE NDVI	42
3.5.2 COMPOSIÇÃO DE VALORES MÁXIMOS ANUAIS	43
3.6 ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA	44
CAPÍTULO 4 BACIA DO RIO ITAPEMIRIM - ES	54
4.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA	56
4.1.1 RELEVO	57
4.1.2 DECLIVIDADE	59
4.1.3 ÍNDICES TOPOGRÁFICOS	61
4.1.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	63
4.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMATOLÓGICA	66
4.2.1 PLUVIOSIDADE	67
4.2.2 VAZÃO	75
4.2.3 MÉDIAS CLIMATOLÓGICAS	78

4.2.4	SÉRIES TEMPORAIS.....	80
4.3	CULTURA DO CAFÉ	87
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		96
5.1	DADOS DE NDVI.....	97
5.2	ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA	99
5.2.1	USO DO SOLO	104
5.2.2	ALTITUDE	112
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		117
6.1	CONCLUSÕES.....	118
6.2	RECOMENDAÇÕES.....	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		123
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DA CULTURA DO CAFÉ.....		137
A.1	FENOLOGIA DO CAFÉ	137
A.2	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DA PRODUÇÃO	140
A.3	PROCESSO PRODUTIVO.....	141
Anexo B – ROTINAS COMPUTACIONAIS.....		150
B.1	– ROTINA DE TRANSFORMAÇÃO DE FORMATO HDF PARA TIF (CÓDIGO .SH).....	150
B.2	– ROTINA DE RECORTE DE ARQUIVO MATRICIAL COM BASE EM ARQUIVO VETORIAL (CÓDIGO .PY)	151
B.3	– ROTINA PARA COMPOSIÇÃO MÁXIMA ANUAL (CÓDIGO .PY)	153
B.4	– ROTINA DE ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA (CÓDIGO .PY).....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Produção em sacas de 60 quilos dos maiores produtores mundiais, safras de 2013 a 2016. Fonte: ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (2016)	8
Figura 2.2: Área plantada por município. Fonte: IBGE (2016)	10
Figura 2.3 Concentração da área plantada da cultura de café. Fonte: IBGE (2016)	11
Figura 3.1 Síntese da metodologia	35
Figura 3.2 Exemplo de curva de dupla massa para a estação 2041000.....	37
Figura 3.3 Polígonos de Thiessen que definem a área de influência de cada estação pluviométrica sobre a bacia.....	38
Figura 3.4 Procedimento de tratamento dos dados de NDVI.....	43
Figura 3.5 Exemplo de imagem MODIS com dados de NDVI original (esquerda) e recortada para a bacia (direita)	43
Figura 3.6 Fluxograma com procedimentos para a avaliação da persistência temporal. Fonte: adaptado de LANFREDI et al. (2004).	47
Figura 3.7 Exemplo de cálculo de persistência para um pixel classificado como persistência 3 positiva.	50
Figura 4.1 Localização da bacia do Itapemirim e sua principal rede hidrográfica. Fonte: dados ANA (2018).	54
Figura 4.2 Mapa de relevo da bacia. Fonte: dados SRTM/NASA (2016)	57
Figura 4.3 Histograma dos dados de altitude da bacia do Itapemirim. Fonte dados: SRTM/NASA (2019)	58
Figura 4.4 Mapa de declividade da bacia do Itapemirim segundo classes da EMBRAPA (1979). Fonte: dados SRTM/NASA (2016)	59
Figura 4.5 Histograma de distribuição dos dados de declividade da bacia do Itapemirim. Fonte: dados SRTM/NASA (2016).....	60
Figura 4.6 Índice topográfico. Dados: SRTM/NASA (2016)	62
Figura 4.7 : Histograma dos valores de índice topográfico na bacia do rio Itapemirim	63
Figura 4.8 : Mapa de uso e ocupação do solo 2012-2015. Fonte: dados IEMA (2015).....	64
Figura 4.9 Distribuição percentual da área de ocupação dos usos do solo da bacia do Itapemirim.....	66
Figura 4.10 Estações pluviométricas utilizadas. Fonte: dados ANA (2018).....	67
Figura 4.11 Média mensal dos postos pluviométricos localizados na bacia do rio Itapemirim.....	69

Figura 4.12 Mapa de isoietas a partir de dados pluviométricos médios anuais de estações da ANA de 1969 a 2016.....	70
Figura 4.13 Dispersão dos dados de altitude e média anual de chuva para os postos pluviométricos.....	71
Figura 4.14 Valores de chuvas observados acumulados das estações pluviométricas na bacia do Itapemirim (1969 – 2017).....	71
Figura 4.15 Pluviosidade anual observada média para a bacia do Itapemirim obtida pelo através dos dados dos postos e ponderação pelo método de Thiessen e dados de sensoriamento remoto. Fonte: dados ANA (2018) e NASA (2016).....	72
Figura 4.16 Comparação da pluviosidade média mensal medidas pelo TRMM, CHIRPS e dados observados (1981-2015).....	73
Figura 4.17 Precipitação acumulada média para a bacia obtida por dados do TRMM, CHIRPS e dados observados.....	73
Figura 4.18 Pluviosidade mensal média para a bacia do TRMM, CHIRPS e dados observados.....	74
Figura 4.19 Médias mensais de vazões da estação Usina Paineiras (57580000) (1981-2015)	75
Figura 4.20 Localização das estações fluviométricas na bacia do rio Itapemirim	77
Figura 4.21 Médias climatológicas da bacia do rio Itapemirim - chuva, NDVI, evapotranspiração, vazão (2000- 2015) e umidade do solo (2010-2015)	79
Figura 4.22 Série histórica de médias anuais dos dados de chuva (ANA), evapotranspiração (MODIS), NDVI (MODIS) e umidade do solo (SMOS)	81
Figura 4.23 Comparação da série de dados médios mensais de NDVI (MODIS) e Pluviosidade (TRMM)	82
Figura 4.24 Dispersão dos dados de NDVI e Chuva sem deslocamento, deslocamento de 1 mês e deslocamento de 4 meses.	83
Figura 4.25 Séries mensais de NDVI e Evapotranspiração médios para a bacia	84
Figura 4.26 Dispersão dos dados de NDVI e evapotranspiração	85
Figura 4.27 Séries de dados mensais de Chuva (TRMM) e evapotranspiração médios para a bacia.....	85
Figura 4.28 Séries mensais de pluviosidade (ANA) e umidade do solo (SMOS) para bacia do Itapemirim	86
Figura 4.29 Dispersão dos dados de umidade do solo e chuva	87
Figura 4.30 Áreas da cultura do café na bacia do Itapemirim.....	88
Figura 4.31 Área colhida de café média por município (ha). Fonte:dados IBGE (1990-2015)	90

Figura 4.32 Produção média em toneladas de café por município (ton) Fonte:dados IBGE (1990-2015).....	91
Figura 4.33 Produção total dos municípios pertencentes a bacia (ton/ha). Fonte: dados IBGE (2015).....	91
Figura 4.34 Quantidade produzida de café (mil sacas/60kg), 1900 – 2010, Espírito Santo. Fonte: FREDERICO (2012).....	92
Figura 4.35 Produtividade da cultura cafeeira por município (ton/ha). Fonte:dados IBGE (1990-2015).....	93
Figura 4.36 Série histórica de dados de produtividade por município. Fonte:dados IBGE (1990-2015).....	94
Figura 4.37 Produtividade média da bacia. Fonte:dados IBGE (1990-2015)	95
Figura 5.1 Composição máxima anual para os valores de NDVI do sensor MODIS para bacia do rio Itapemirim (2000-2015)	97
Figura 5.2 Série de valores da composição máxima anual de NDVI médios para a bacia do Rio Itapemirim	98
Figura 5.3 Análise de persistência para resolução espacial de 250m.....	99
Figura 5.4 Mapas de análise de persistência para os anos subsequentes ao período de referência.....	100
Figura 5.5 Mapa de densidade de ocorrência de persistência máximas negativas	101
Figura 5.6 Aproximação para a foz da bacia do rio Itapemirim: mapa de persistência (à esquerda) e mapa de densidade de persistências negativas máximas (à direita).	102
Figura 5.7 Ajuste da curva de cálculo de probabilidade de persistência. Persistências positivas em azul e negativas em vermelho	103
Figura 5.8 Gráficos com a probabilidade de persistência para a bacia em sua totalidade e separado por categoria de uso do solo.....	105
Figura 5.9 Tempo médio de vida para as persistências positivas e negativas para as áreas de cultivo de café por município contido na bacia do Itapemirim	109
Figura 5.10 Classes de altitude para a bacia do Itapemirim de 250 m em 250 m.	112
Figura 5.11 Ajuste da curva de probabilidade de persistência para as classes de altitude definidas	114
Figura 5.12 Tempo médio de vida para as persistências positivas e negativas na bacia do Itapemirim discriminadas por classes de altitude de 250 em 250 metros	115
Figura 5.13 Tempo médio de vida para classes de 500 em 500 metros para a Bacia do Itapemirim.....	116

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Informações de resolução espacial e temporal para os dados hidroclimatológicos obtidos por sensoriamento remoto	40
Tabela 4.1 Classes de uso do solo simplificadas, área de ocupação e percentual da área total.....	65
Tabela 4.2 Estação pluviométricas utilizadas.....	68
Tabela 4.3 Parâmetros estatísticos para comparação dos valores de pluviosidade registrados por sensoriamento remoto e observados	74
Tabela 4.4 Estações fluviométricas utilizadas na bacia do Itapemirim.....	76
Tabela 4.5 Características fisiográficas das estações fluviométricas	77
Tabela 4.6 Vazões características das estações fluviométricas	78
Tabela 4.7 Coeficiente de correlação de Pearson para séries anuais das variáveis hidroclimatológicas da bacia - correlações diretas e com defasagem	81
Tabela 4.8 Coeficiente de correlação de Pearson para séries mensais das variáveis hidroclimatológicas da bacia - correlações diretas e com defasagem	82
Tabela 4.9 Área colhida (ha), produção (ton) e produtividade (ton/ha) dos municípios integrantes da bacia do Itapemirim Fonte: dados IBGE (2017)	89
Tabela 5.1 Tempo médio de vida da persistência e ajuste R^2 da curva de probabilidade de persistência.....	103
Tabela 5.2 Três principais usos do solo, suas áreas de ocupação da bacia e percentual da área total.....	105
Tabela 5.3 Tempo médio de vida e coeficiente de ajuste da curva exponencial para o cálculo de probabilidade de persistência para a área total da bacia e para cada tipo de uso do solo.....	106
Tabela 5.4 Área plantada, produtividade e tempos médios de vida para tendências positivas e negativas por município contido na bacia do Itapemirim	108
Tabela 5.5 Tempos de vida médio da persistência para cada classe de altitude e ajuste R^2 .	113

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O interesse sobre o impacto humano no ambiente natural é crescente preocupação na esfera mundial. A ampliação e a facilitação no acesso a dados digitais da superfície da Terra estimularam muitas questões de pesquisa relativas ao uso do solo destinadas a melhorar a compreensão das interações homem-ambiente. Além disso, estão disponíveis importantes dados hidroclimáticos obtidos através de sensoriamento remoto, como precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, temperatura de superfície, entre outros. O sensoriamento remoto é uma ferramenta que fornece medições consistentes e repetíveis em um conjunto de escalas espaço-temporais. Sua consistência o torna uma ferramenta adequada para capturar processos de mudança de superfície terrestre, características da vegetação, incêndio, movimentos de terra, inundações, entre outras ocorrências naturais e alterações antrópicas (JIN e SADER, 2005).

Deteção e caracterização de mudanças são, frequentemente, os primeiros passos para entender os mecanismos e identificar os vetores que conformam a evolução da paisagem (WALEY *et al.*, 2014). As mudanças nos ecossistemas, segundo VERBESSELT *et al.* (2009), podem ser divididas em três classes: (a) mudanças sazonais, impulsionadas por temperaturas anuais e interação da precipitação com a fenologia da vegetação; (b) mudanças graduais, como variabilidade climática interanual ou mudança gradual no manejo do solo ou sua degradação; e (c) mudanças abruptas, causadas por algum distúrbio como desmatamento, urbanização, inundação ou incêndio. Embora os dados de longo período tenham aumentado, possibilitando as análises de deteção de mudanças, é um desafio desenvolver e aplicar métodos que sejam capazes de identificar alterações, os ciclos e as tendências dessas séries temporais.

A delimitação de padrões de evolução da paisagem de uma dada bacia hidrográfica é de grande importância como subsídio ao estudo do seu comportamento hidrológico e correspondentes vulnerabilidades em termos de qualidade e quantidade de água.

Produtos de dados contínuos, como índices de vegetação e medidas espectrais diversas, surgiram com a finalidade de explorar mudanças dentro das classes de uso do solo, permitindo avaliar como a energia emitida e refletida está conectada a processos

biofísicos da superfície. As medidas de propriedades biofísicas, como a cobertura vegetal, podem estar mais diretamente relacionadas aos processos biogeoquímicos, e, portanto, os índices de vegetação são, cada vez mais, usados para medir as modificações nas análises de mudanças de terras (APLIN, 2004). A relação entre os índices de vegetação e a biomassa é bem estabelecida e, por tal, bastante usada para avaliar mudanças inter e intra- anuais na quantidade e na distribuição da biomassa verde. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), inicialmente proposto por ROUSE (1974), de acordo com BANNARI *et al.* (1995) é amplamente aceito como um indicador das propriedades da vegetação e respostas ecológicas às mudanças ambientais, como, por exemplo, pode ser encontrado nos trabalhos de GOWARD *et al.* (1993), MYNENI *et al.* (1995), BATISTA *et al.* (1997), LIANG (2004), ASNER *et al.* (2004), OLIVEIRA *et al.* (2009), LOPES *et al.* (2011), SÁ *et al.* (2012), LUCENA *et al.* (2012), VIANA *et al.* (2013) entre muitos outros.

Atenção especial e estímulo para o desenvolvimento desta dissertação são derivados em função do interesse de avaliar o processo de mudanças em diferentes coberturas e uso do solo. Esse interesse decorre de haver uma motivação intrínseca de se examinar o processo de produção agrícola no país, sobretudo da cultura do café, que foi aqui utilizada para exemplificar a potencialidade de se testar uma relativamente nova proposição metodológica de avaliação de degradabilidade ou não de diferentes tipos de culturas ou de pastagem ou de uso do solo de forma geral face a diferentes indicadores de natureza hídrica e ambiental.

Nesse sentido, o uso de dados sensoramento remoto para descrição e caracterização ambiental e particularmente do índice NDVI revelou-se apropriado para dar uma resposta à formulação desse desafio. Diante do quadro exposto, pode-se, agora, enunciar o objetivo geral do trabalho e as correspondentes metas estabelecidas, como exposto mais detalhadamente no item subsequente.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é caracterizar e definir procedimento de avaliação da evolução da paisagem de uma região em consonância com características físicas e notadamente hídrico-ambientais mediante o suporte sobretudo de dados de sensoramento

remoto. Busca-se, em especial, estabelecer a relação de resiliência com produção agrícola e manutenção de áreas de pastagem e florestas, o que constitui importante contribuição para o desenvolvimento socioeconômico do setor agropecuário brasileiro.

Em particular, neste trabalho, enfocou-se a cultura do café, áreas de pastagem e mata nativa com o objetivo de realizar uma análise da evolução da vegetação da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, situada no Espírito Santo, ao longo dos anos de 2000 a 2015, para avaliar a persistência ou grau de vulnerabilidade do estado da vegetação via monitoramento por satélite.

Mais especificamente, propõe-se analisar a persistência dos valores de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para a bacia do rio Itapemirim. Foram usados dados do satélite MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*)/NASA (*National Aeronautics Spatial Agency*) (MOD13Q1) com série temporal de 2000 a 2015. Cabe destacar que o NDVI foi empregado como indicador representativo do estado da vegetação, uma vez que se trata de um índice que quantifica a biomassa e que guarda relação com variáveis hidrológicas e climáticas, sobretudo precipitação, evaporação, umidade do solo e temperatura da superfície terrestre.

Um algoritmo foi implementado, em que, primeiramente, há a análise de tendência do NDVI, inferindo se ele está aumentando ou diminuindo através de regressão linear dos dados ao longo do período definido como período inicial. Ao longo da série temporal, as tendências são recalculadas com incremento do dado do ano subsequente. São considerados persistentes locais onde os incrementos na série não alteram a tendência inicial. Em síntese, pode-se, dessa forma, identificar áreas com persistência positiva, indicando tendência de aumento dos valores de NDVI, em contraposição a áreas de persistência negativa, que estão associadas a regiões com menor capacidade de resiliência da vegetação.

Como explicitado previamente, especial motivação concentrou-se no estudo da cultura do café. Para tal análise, optou-se pelo estudo da bacia do rio Itapemirim, que é conhecida por tal cultura. Simultaneamente, permitiu traçar uma linha de investigação de contraste desse tipo de cultura com outros tipos de uso e ocupação do solo sob o enfoque de seus correspondentes graus de sensibilidade à degradabilidade e a pressões hídricas e ambientais na área de estudo, sobretudo áreas de ocupação de pastagem.

Mantendo-se em perspectiva a hipótese formulada em conjunto com a motivação para elaboração desta dissertação, declaram-se como objetivos específicos desta pesquisa os seguintes procedimentos:

- caracterizar a bacia hidrográfica do rio Itapemirim fisiográfica e hidroclimaticamente explorando a relação entre dados de pluviosidade, evapotranspiração, vazão e umidade do solo mediante o emprego de dados de sensoriamento remoto e medições locais;
- analisar a série temporal de dados de NDVI adquiridos no período de 2000 a 2015 para avaliar a condição de susceptibilidade à degradação e evolução da vegetação na bacia de estudo;
- discriminar a análise dos dados de vegetação para os principais usos do solo da bacia, evidenciando a capacidade de regeneração dos diferentes tipos de vegetação;
- explorar relações da evolução da vegetação com indicadores de produção e produtividade de áreas agropastoris, em especial da cultura cafeeira.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo apresenta a contextualização, justificativa e motivação da pesquisa, com detalhamento de sua diretriz geral e definição do objetivo desta dissertação, secundado pelos objetivos específicos associados.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura científica abrangendo os fundamentos teóricos e trabalhos precedentes relacionados ao tema de estudo. Apresenta explanação sobre a cultura do café, incluindo panorama geral nacional sobre aspectos produtivos. Adicionalmente, revisam-se trabalhos utilizando sensoriamento remoto e análise de vegetação assim como trabalhos que analisam especificamente a cultura do café em adição a avaliações pertinentes a outros tipos de cobertura e uso do solo.

O Capítulo 3 apresenta o fluxograma metodológico do trabalho com discriminação das etapas do trabalho. Destrincha os métodos de aquisição e tratamento de dados e descreve os procedimentos de métodos empregados para análise de séries temporais com enfoque sobretudo na análise de persistência do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com base em imagens MODIS.

O Capítulo 4 apresenta a área de estudo, com a produção de uma extensa caracterização física e hidroclimatológica da bacia com resultados obtidos por meio do emprego de produtos satelitais em contraste com informações *in situ*. O NDVI é

confrontado com demais variáveis hidroclimatológicas a fim de evidenciar suas relações para a bacia em questão.

O Capítulo 5 apresenta os resultados das análises de persistência dos dados de NDVI para a bacia hidrográfica como um todo, assim como a análise em separado para os diferentes usos do solo e classes selecionadas de altitude. É realizada associação da análise de persistência aos índices de produtividades da cultura cafeeira na bacia.

O Capítulo 6 contém as conclusões do trabalho, considerações finais sobre a metodologia utilizada, incluindo resultados obtidos e contribuição do trabalho, Recomendações são ainda apresentadas com a sugestão de potenciais trabalhos futuros relacionando dados e variáveis que aqui foram levantadas.

Ao final, são dispostos as referências bibliográficas e Anexos A e B. No Anexo A, dispõem-se informações detalhadas sobre fenologia, condições favoráveis e processo produtivo da cultura do café, enquanto, no Anexo B, são relacionados os algoritmos computacionais desenvolvidos para tratamento e análise dos dados empregados na dissertação.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, procura-se fazer uma exposição sucinta da literatura científica mais dedicada a estudos de vegetação, sob o ponto de vista de sua resiliência, em conjunto com a evolução e a degradação de paisagens.

Registra-se a importância do monitoramento espaço-temporal da vegetação por satélite com apoio de informações e medições locais. Nesse sentido, são tangenciados alguns dos fundamentos de sensoriamento remoto, concomitantemente com o destaque para algumas aplicações hídrico-ambientais.

Em função do estudo ter sido motivado pela diretriz de melhor explorar e incentivar maior produção e maior produtividade agrícola do país em associação com a crescente necessidade de preservação de pastagens e florestas com desdobramentos na agropecuária, na agrofloresta e na agroindústria, optou-se, neste trabalho, por dedicar especial atenção ao estudo da cultura e correspondente fenomenologia do café, importante produto histórico e econômico do Brasil.

Trata-se de um dos trabalhos pioneiros dessa nova diretriz de trabalho estabelecida no âmbito do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ de apoiar mais fortemente os setores que guardam uma relação estreita com a agricultura. Parte-se de uma base de conhecimentos construída sob o ponto de vista hidrometeorológico com suporte de modelagem matemático-estatística, hidrológica e imagens de satélite com vistas a fortalecer a conexão que se explicita entre água, energia e alimento, de extrema importância para construção do desenvolvimento político, econômico e cultural do Brasil.

Não se pretende esgotar o tema, que é por si só muito abrangente e tem sido explorado historicamente com competência por diversas instituições, como é o caso mais proeminente, no Brasil, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), fundada em 7 de dezembro de 1972, do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Essa competência pode inclusive ser observada pelo esforço do governo brasileiro de semear e incentivar o crescimento de outros setores econômicos nacionais segundo os moldes do modelo EMBRAPA, que veio a se denominar de Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII), organização social do poder

público federal que, desde 2013, apoia instituições de pesquisa tecnológica fomentando a inovação da indústria brasileira.

Por outro lado, observa-se, nos trabalhos avaliados e na literatura disponível, uma sensível carência de uma abordagem mais profunda e ao mesmo tempo mais ampla e integrada quanto à interveniência de aspectos hidrológicos correlatos, sejam de superfície ou subterrâneos, como, por exemplo, apontam-se nas áreas de agro-hidrologia, agrometeorologia, hidropedologia e hidrogeologia. Em todas essas áreas, falta ainda trabalhar melhor o espaço do balanço hídrico e do balanço de energia que trate as diferentes variáveis e grandezas com enfoque na bacia hidrográfica.

Considera-se a bacia hidrográfica e sua malha hidrográfica como importante eixo condutor e portador da direção que o país necessita perseguir para construir o seu planejamento integrado entre os diferentes setores econômicos e gestão territorial e de recursos naturais para promover o desenvolvimento nacional.

Assim, a modesta contribuição que o presente trabalho procura oferecer ao leitor é no sentido de dar os primeiros passos mais significativos, ainda que exploratórios, na direção de aproximação do conhecimento hidrológico nacional do setor agrícola, partindo da análise da bacia do rio Itapemirim, situada no Espírito Santo. Em particular, o estudo de caso apresentado mais adiante no Capítulo 4 é revelador das diversas oportunidades de trabalho a serem exploradas na direção proposta para diferentes produtos de natureza agrícola.

A região da bacia do Itapemirim ganhou relevância, nesta dissertação, por se tratar de reconhecida área produtora de café e que também apresenta, por contraste, áreas de pastagem, entre outros usos e coberturas do solo. Estão a receber destaque esses dois tipos de cobertura e uso do solo pelo impacto que possuem na produção da agropecuária nacional. Note-se que a metodologia proposta na pesquisa é mais abrangente nesse sentido, antevendo-se seu potencial de aplicação nas mais diversas bacias do país para nortear o melhor aproveitamento do solo brasileiro.

Na organização do capítulo, discorre-se, inicialmente, sobre a cultura do café, que motivou a realização do estudo. Em seguida, passa-se para a apresentação de alguns conceitos e sensores empregados na área de sensoriamento remoto. Conecta-se, então, esse tipo de informação com o seu uso em reconhecimento de padrões, com apontamento especial para procedimentos de detecção de mudanças, bem como com o tratamento e a análise de resiliência e persistência da cobertura vegetal. A sequência textual proposta

permite, então, oferecer ao leitor o escopo do conhecimento que foi percorrido para delimitar a metodologia definida no Capítulo 3.

2.1 A CULTURA DO CAFÉ

A cultura de café possui um papel importante na história nacional, e, ainda hoje, o Brasil é o maior produtor de café do mundo (Figura 2.1). De acordo com os dados da 4ª Estimativa da Safra de Café da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), de dezembro de 2016, o Brasil produziu, nesse ano, 51,369 milhões de sacas de 60 kg de café numa área de 1,95 milhão de hectares (EMBRAPA Café, 2017).

Segundo dados da EMBRAPA Café, a safra de 2016 bateu recorde de produção, com produtividade média de 26,33 sacas por hectare. A segunda maior registrada foi a de 2012, com média de 24,8 sacas por hectare (EMBRAPA Café, 2017).

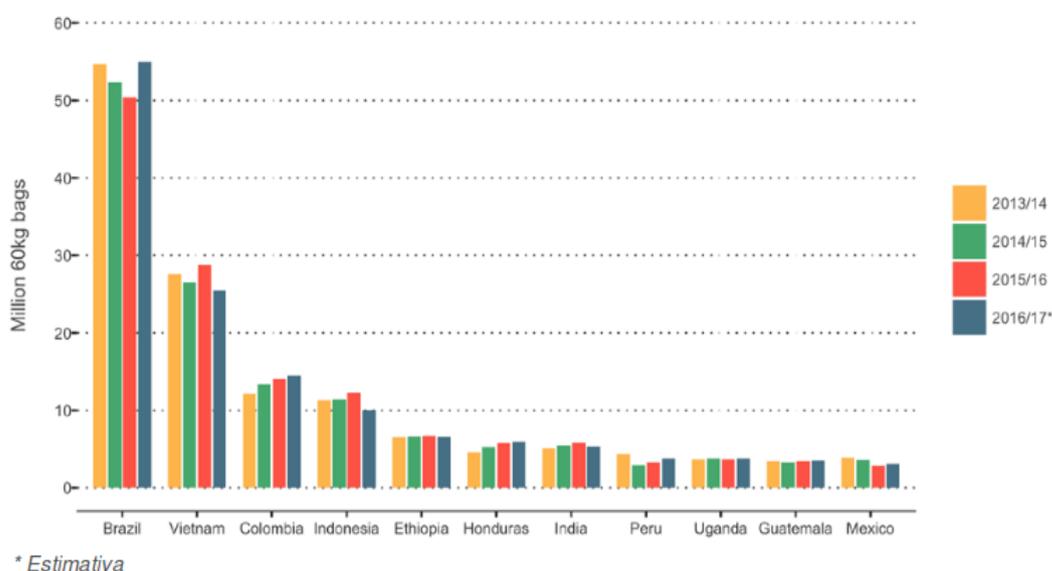


Figura 2.1 Produção em sacas de 60 quilos dos maiores produtores mundiais, safras de 2013 a 2016. Fonte: ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (2016)

O cafeeiro (*Coffea sp*) é um arbusto da família *Rubiaceae*, gênero *Coffea*. De acordo com MALAVOLTA (2000) *apud* ROSA (2007), a espécie *Coffea arabica L.* é oriunda da Etiópia, tendo se expandido para a Arábia Saudita no início do século XVII e, posteriormente, para a Holanda. No Brasil, o café data da época do império, trazido das

Guianas para Belém do Pará, de onde foi levado para o Rio de Janeiro e se espalhou pelos estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo.

A produção mundial de café é quase totalmente constituída por duas espécies: o *conilon* e o *arábica*. O café *arábica* promove uma bebida, na maior parte das vezes, de melhor qualidade, com mais açúcares e complexidade de sabor, preferido pelos mercados mais exigentes, sendo basicamente a espécie que contribui para o mercado dos cafés especiais. Os cultivares comerciais de café *arábica* em utilização extensiva no país são *Mundo Novo* e *Catuai*, variedades genéticas com bom potencial de produção. O *Mundo Novo* tem sido preferido, ultimamente, nas áreas mecanizáveis das regiões de cerrados, por possuir um maior vigor vegetativo, maturação mais uniforme e precoce, apresentando menor risco em áreas sujeitas a geadas. O *Catuai* possui porte baixo, o que facilita a colheita especialmente em áreas montanhosas, e, quando utilizado em espaçamentos adensados, apresenta maior produtividade que o *Mundo Novo*. Além disso, é menos prejudicado pela deficiência de cálcio, magnésio e zinco, e mais resistente à ferrugem, praga recorrente nas culturas de café (MATTIELO, 1986; MALAVOLTA, 2000 *apud* ROSA, 2007).

A importância do café para a economia brasileira, dada especialmente por sua ampla participação na balança comercial, torna-o uma cultura cujo monitoramento é de grande interesse aos setores público e privado (ROSA, 2007). Segundo CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ (2014), estima-se que mais de 80% das propriedades rurais que produzem café no Brasil são estabelecimentos familiares.

Na Figura 2.2, são apresentadas as áreas plantadas por município produtor de café do Brasil. Minas Gerais apresenta o maior número de municípios produtores, seguido pela região sul do Espírito Santo. A Figura 2.3 mostra a concentração das plantações de café no ano de 2013, mostrando que há uma concentração no sul de Minas Gerais e Espírito Santo.

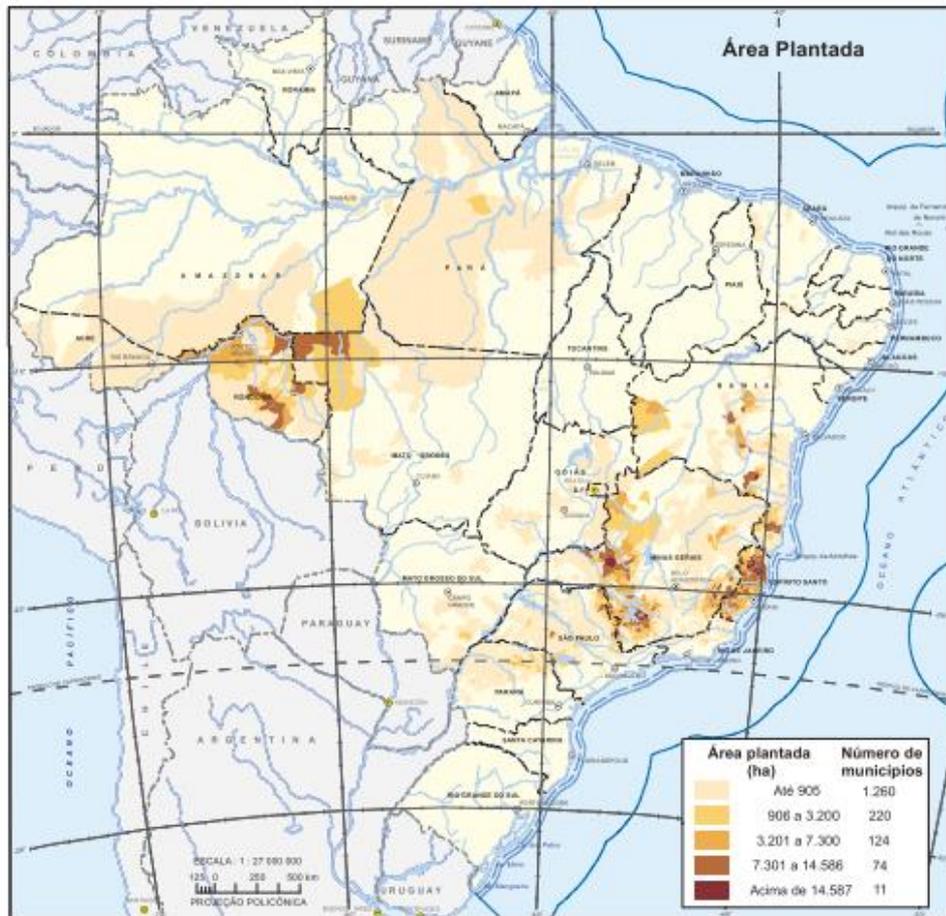


Figura 2.2: Área plantada por município. Fonte: IBGE (2016)

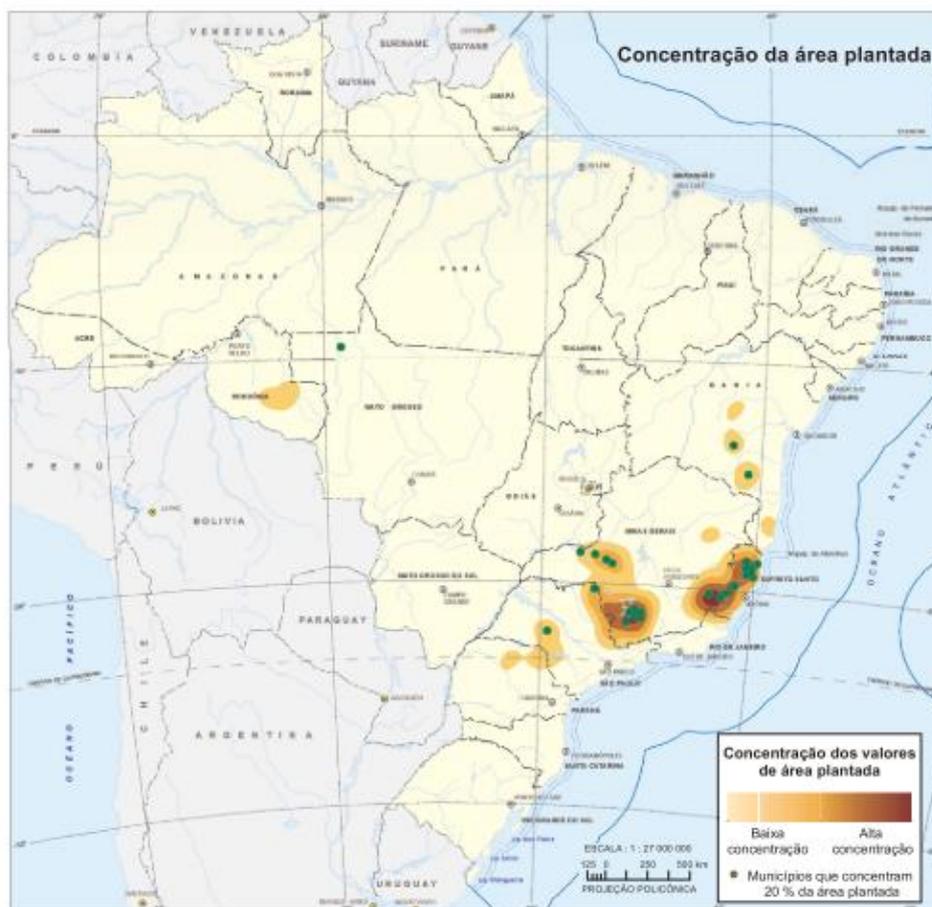


Figura 2.3 Concentração da área plantada da cultura de café. Fonte: IBGE (2016)

A produção de café é altamente dependente de fatores fisiológicos, tratamentos culturais e ambientais. Dos fatores ambientais, o clima exerce um importante papel, uma vez que as condições meteorológicas, como temperaturas mínimas e máximas do ar durante os estágios fenológicos críticos, interferem na produtividade da cultura. Do mesmo modo, a disponibilidade hídrica constitui o principal fator que pode afetar a produtividade biológica e, conseqüentemente, a econômica.

Dado que a maior parte da produção de café nacional é uma cultura não irrigada, sua produção é altamente dependente das condições climáticas em cada uma de suas fases fenológicas.

Temperaturas médias anuais entre 18 °C e 21 °C são os limites mais indicados para *Coffea arabica*. Com relação à demanda hídrica, a faixa ideal situa-se entre 1200 a 1800 mm, embora seja necessário observar não somente a quantidade de precipitação, mas também a sua distribuição e limites de evapotranspiração (ROSA, 2007).

A fim de complementar esse tópico sobre a cultura cafeeira, o Anexo A aborda em detalhes suas características fenológicas, condições hidroclimáticas favoráveis e restrições, assim como busca fazer um panorama completo de seu processo produtivo.

Na sequência do texto, dissecam-se aspectos relacionados com sensoriamento remoto, que permitiu abordar e tratar de variáveis mensuradas na escala da bacia do rio Itapemirim, estudo de caso desta pesquisa, mais bem detalhado no Capítulo 4.

2.2 FUNDAMENTOS E PRINCÍPIOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento remoto, termo cunhado no início dos anos de 1960 por Evelyn L. Pruitt e colaboradores, é uma das mais bem sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoração dos recursos terrestres em escala global. Como definido em NOVO (1989), sensoriamento remoto é a ciência de obter informação sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um instrumento que não entra em contato direto com o objeto, área ou fenômeno em investigação.

A origem do sensoriamento remoto nos anos de 1960 deve-se ao desenvolvimento da área espacial nesses anos, que ficou conhecida como a década da corrida espacial. Nesse período, observou-se o mais rápido desenvolvimento de foguetes lançadores de satélites, que possibilitou colocar no espaço satélites artificiais para várias finalidades. Os satélites meteorológicos foram os pioneiros e, por meio deles o sensoriamento remoto deu os seus primeiros passos (MENESES, 2012).

Segundo GOEL (1988), a radiação solar incidente sobre um dossel é espalhada e refletida, tendo sua direção e composição espectral alteradas de maneira bastante complexa. A alteração é causada tanto por parâmetros inerentes ao próprio dossel, quanto por fatores ambientais. O sensoriamento remoto é uma atividade que observa os objetos de estudo através da energia eletromagnética refletida ou emitida por tais. Cada objeto reflete a radiação incidente de uma forma diferente, tendo, assim, um comportamento peculiar, que se deve às suas características físicas, químicas ou biológicas. Esse comportamento é chamado de assinatura espectral, ou seja, variação da quantidade de energia refletida pelo alvo para cada comprimento de onda do espectro eletromagnético.

Em órbita ao redor de nosso planeta, existe uma grande quantidade de satélites equipados com diversos tipos de sensores capazes de medir grandezas correlacionáveis

com as variáveis de interesse para os estudos hidrológicos (ARAUJO, 2016). As tecnologias de sensoriamento remoto usam uma gama de comprimento de ondas de diferentes radiações refletidas ou emitidas por objetos, em especial nas faixas do espectro eletromagnético que abrangem o visível, infravermelho e micro-ondas.

Sensores remotos podem ser colocados em aeronaves, foguetes e balões para obter imagens da superfície da Terra, entretanto essas plataformas são operacionalmente caras e limitadas. Uma alternativa menos onerosa é utilizar satélites artificiais para instalar esses sistemas. Um satélite pode ficar girando em órbita da Terra por um longo tempo e não necessita combustível para isso; além do mais, a sua altitude permite que sejam obtidas imagens de grandes extensões da superfície terrestre de forma repetitiva e a um custo relativamente baixo. Os satélites de sensoriamento remoto têm favorecido o levantamento e o monitoramento de áreas extensas e de difícil acesso para coleta de dados *in situ*.

Existem, em essência, dois tipos de sensores remotos: passivos e ativos. Os sistemas passivos utilizam o Sol como fonte de radiação eletromagnética (ópticos) ou a própria Terra como fonte de radiação (termais). Já os sensores ativos possuem sua própria fonte de radiação e medem a energia refletida e retroespalhada pelos alvos.

A medição da radiação que deixa a superfície do objeto de estudo, que pode ser denominada radiometria, inclui uma série de termos e leis que, em sensoriamento remoto, são fundamentais para explicar o significado físico dessas medições. As mais importantes dessas definições segundo, MATHER (1989), estão a seguir.

Energia radiante Q é a energia que se propaga da fonte na forma de ondas eletromagnéticas, medida em Joule (J).

Fluxo radiante $\Phi = \delta Q / \delta t$ é a taxa de transferência da energia radiante, medida em Watts (W).

Irradiância $E_\lambda = \Phi / \Delta A$ é o fluxo radiante solar incidente na superfície do terreno por área de superfície, medido em Watts por metro quadrado ($W.m^{-2}$).

Radiância $L_\lambda = \Phi / (\Delta \Omega \cdot \Delta A \cos \theta)$ representa a densidade de fluxo radiante transmitida de uma área unitária na superfície da Terra como vista através de um ângulo sólido (tridimensional) unitário. Em termos de unidade, a radiância é medida em $W.m^{-2}$.

$^2 \cdot \text{str}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. Essa medida é o equivalente tridimensional do radiano (definido como o ângulo subtendido no centro de um círculo por um setor que corta uma seção da circunferência que é igual em comprimento ao raio da círculo).

Reflectância $\rho = L_\lambda / E_\lambda$ é a razão adimensional entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (radiância) pela quantidade de energia incidente naquela área (irradiância), medida no mesmo instante de tempo. Qualquer alvo no terreno poderá refletir uma porcentagem $> 0\%$ e $< 100\%$ da radiação nele incidente.

Quando se deseja comparar imagens de sensoriamento remoto coletadas ao longo de um período de tempo, é prática comum converter os valores de radiância registrados pelo sensor em fatores de refletividade, a fim de eliminar os efeitos da irradiância variável nas estações do ano.

Na escolha dos dados de sensoriamento remoto para as diversas aplicações, consideram-se as seguintes resoluções: espectral, que abrange diferentes partes do espectro eletromagnético; radiométrica, que é a habilidade do sensor em distinguir entre dois níveis de intensidade do sinal de retorno; espacial, que é a dimensão da menor feição passível de detecção pelo instrumento (sensor); e temporal, que é a frequência com que um mesmo local é imageado.

Para um mesmo sensor, em uma dada altura de órbita, as resoluções espacial e temporal apresentam uma relação inversa, pois quanto maior (menor) a largura da faixa imageada, maior (menor) será a frequência de imageamento do mesmo local, porém menor (maior) será o grau de detalhe possível de detectar, ou seja, menor (maior) será a resolução espacial do sensor. Há um balanço entre resolução temporal e resolução espacial a considerar na escolha dos dados a serem utilizados em cada estudo, de acordo com a aplicação (ARAUJO, 2016).

ROTUNNO FILHO *et al.* (2014) indicam que, até meados da década de 1990, o uso de sensoriamento remoto em hidrologia restringia-se predominantemente, em termos de aplicações, a: (a) classificação da cobertura do solo através do espectro visível e infravermelho; (b) uso de micro-ondas aplicado para a identificação de água, incluindo neve, sobre ou próximo da superfície terrestre.

Atualmente, a aplicação é mais ampla, pois o desenvolvimento de novas tecnologias possibilitou a utilização em novos campos, como: (a) uso do espectro visível e infravermelho aplicado à determinação do uso e cobertura do solo e índices de vegetação em bacias hidrográficas; (b) uso do infravermelho termal para determinação de

temperatura de brilho e temperatura da superfície do solo; (c) uso de micro-ondas aplicado à identificação de água e neve sobre ou próximo da superfície terrestre, incluindo precipitação e níveis de água com suporte de altimetria; (d) medição do armazenamento total de água continental, incluindo água superficial, umidade do solo e água subterrânea usando dados de alteração do campo gravitacional; e (e) uso de micro-ondas e laser para fornecimento de modelos digitais de elevação e terreno, em conjunto com medidas de GPS para nivelamento altimétrico em escala de bacia (ROTUNNO FILHO *et al.*, 2014).

Dados gerados por sensoriamento remoto são potencialmente úteis para modelagem hidrológica devido à combinação de larga cobertura espacial e alta frequência de medidas. Satélites são capazes de fornecer séries temporais de determinados píxeis, espacialmente distribuídos sobre uma área, mantendo-se parâmetros de controle ao longo do tempo.

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos envolvendo o uso de sensoriamento remoto e hidrologia e análise de vegetação (GOWARD *et al.*, 1993; CAMPBELL, 1996; VERSTRAETE e PINTY, 1996; LIANG, 2004).

Uma das aplicações dentre a vasta aplicabilidade do sensoriamento remoto está o monitoramento de vegetações e culturas. Para a cultura do café, por exemplo, BERNARDES *et al.* (2012) usaram o NDVI mediante produto obtido de imagens MODIS para monitorar a bianualidade da cultura de café em Minas Gerais.

MOREIRA *et al.* (2004) avaliaram o potencial das imagens da série Landsat no mapeamento da cultura do café para a previsão de safras. TRABAQUINI *et al.* (2009) realizaram a caracterização do meio físico das lavouras cafeeiras existentes no município de Umuarama-PR utilizando imagens do sensor Landsat 5-TM.

CAMPOS (2005) realizou um estudo de avaliação da variabilidade espacial da produtividade na cafeicultura de montanha, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, usando-se os índices espectrais V_{dn} (banda verde normalizada), V_{mn} (banda vermelha normalizada), IV_n (banda infravermelho normalizada), RV_m (razão de vermelho e infravermelho), RV_d (razão de verde e infravermelho), NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada), GNDVI (índice de vegetação por diferença normalizada usando a banda verde) e SAVI (índice de vegetação com ajuste pelo solo).

CHEMURA *et al.* (2017) utilizaram imagens Landsat 8 para a detecção da idade das culturas e de plantas deficientes, enquanto JÚNIOR *et al.* (2009) avaliaram os valores de NDVI médios de áreas cafeeiras no ano de 2008 e sua relação com a pluviosidade.

Em síntese, para a cultura do café, o sensoriamento remoto tem sido usado, principalmente, no mapeamento e na caracterização de áreas produtivas.

2.2.1 PRINCIPAIS SENSORES

Neste tópico, são explanados os sensores a partir dos quais os dados foram gerados para utilização na realização deste trabalho. Apresenta-se um breve histórico e abordam-se correspondentes características.

TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission*)

O TRMM foi uma missão conjunta entre a NASA (*National Aeronautics Space Administration* – Estados Unidos da América) e a JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) lançada em novembro de 1997, para monitorar a precipitação nas regiões tropicais e subtropicais. As imagens do sensor possuem resolução espacial de $0,25^\circ$ (~ 25 km) e resolução temporal com produtos disponibilizados para o intervalo de 3 horas e na escala do dia. Os instrumentos primários a bordo do satélite TRMM para obtenção dos dados de chuva são os seguintes:

- VIRS – radiômetro no visível e infravermelho de cinco canais, isto é, um espectro-radiômetro com bandas no intervalo de comprimento de onda de 0,63, 1,6, 3,75, 10,8 e 12 μm , sendo, em muitos aspectos, muito semelhante ao AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*); essa abrangência de comprimento de ondas promove observação de alta resolução da cobertura de nuvens, tipo de nuvens e temperatura do topo das nuvens;
- TMI – imageador multicanal na faixa de micro-ondas do tipo passivo que opera em cinco frequências; promove a principal informação sobre a medição de precipitação, obtida através de transformação operada na lei de Planck e correlação com temperatura de topo de nuvem;
- PR – radar eletrônico de precipitação, sendo o primeiro radar meteorológico a ser lançado a bordo de um satélite; possibilita a medição 3-D da distribuição da chuva, permitindo refinar as estimativas afetadas pelas diferentes formações de nuvens

sobre a superfície terrestre e oceanos; esse radar é capaz de detectar taxas de precipitação muito baixas, da ordem de menos de 0,7 mm/h;

- CERES – sensor para a medição da energia no topo da atmosfera e capaz de estimar os níveis de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre;
- LIS – instrumento para a detecção de relâmpagos na região tropical do globo.

O TRMM deixou de operar em 8 de abril de 2015, quando seus instrumentos foram desligados após 17 anos de serviços. Atualmente, o produto 3B42RT_v7 (NASA, 2015a) é ainda fornecido com base em tempo real sendo denominado de TMPA-RT (TRMM *Multi-satellite Precipitation Analysis- Real Time*), estimativa de precipitação quase global combinada de sensores, multianual em escala refinada em tempo real, calibrada com satélites climatológicos em esquema semelhante, com adaptações ao que era utilizado na calibração das estimativas do TRMM (NASA, 2015d)

A missão sucessora do TRMM, GPM (*Global Precipitation Mission*), já havia sido lançada em 27 de fevereiro de 2014. Essa missão GPM apresenta um avanço, pois, além de possuir uma maior cobertura, incluindo o círculo polar Ártico e o ciclo polar Antártico, também fornece dados de maior resolução espacial (0,1°).

De forma similar ao TRMM, a missão GPM é equipada com um imageador micro-ondas (*GPM Microwave Imager – GMI*) e com um radar (*Dual-Frequency Precipitation Radar – DPR*).

Estudos de avaliação da qualidade dos dados obtidos pelo TRMM tem sido realizados no território nacional. COLLINSCHON *et al.* (2006, 2007) realizaram trabalho a fim de avaliar a utilização das estimativas de precipitação obtidas a partir do satélite como dado de entrada do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, sozinhas ou associadas com os dados da rede pluviométrica. Os resultados foram analisados em termos de vazão simulada tendo como estudo a bacia do rio São Francisco. O desempenho do modelo usando as estimativas de satélite teve desempenho pouco inferior ou mesmo similar aos dados pluviométricos. Concluiu-se que os campos de precipitação obtidos por satélite são potenciais ferramentas para consistência de dados pluviométricos em escala de bacia hidrográfica e estimativa da precipitação em áreas com deficiente rede pluviométrica, considerando que os resultados obtidos pela rede e por satélites mostraram valores próximos.

PACA (2008), por exemplo, explora o comportamento do TRMM em bacia do rio Guamá no Pará, que cobre área de cerca de 80.000 km² face a dados de estações

pluviométricas nas escalas diária e mensal, concluindo pela robustez e confiabilidade dos dados de satélite. Adicionalmente, no trabalho, examina-se o processo de modelagem hidrológica via modelo concentrado SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) para uma sub-bacia de cerca de 5.000 km², procurando-se examinar a sensibilidade e diferenças na produção da vazão quando o modelo é alimentado por dados promediados de estações pluviométricas em contraste com dados promediados de dados TRMM, permitindo novamente concluir pela adequabilidade do emprego de produtos de sensoriamento remoto em estudos hidrológicos.

OLIVEIRA *et al.* (2014), por sua vez, chegaram à conclusão de que os dados das versões 6 e 7 do TRMM propiciam uma superestimativa na medição para a região central do Brasil, relatando a obtenção de melhores resultados quando a versão 7 foi utilizada.

JOBARD (2001) observou que as estimativas de chuvas dos produtos TRMM 3B42 e GPCP (*Global Precipitation Climatology Project*), combinando dados de infravermelho e micro-ondas de satélites geostacionários e dados de redes de pluviômetros, são as mais representativas da variabilidade da precipitação. Os dados TRMM mostram-se como alternativa para regiões com baixa densidade de pluviômetros, como é o caso de grandes bacias hidrográficas.

PANDURO *et al.* (2015) trabalharam com dados de postos pluviométricos e dados TRMM segundo a escala temporal de 3 horas para o mês de dezembro de 2013, a fim de analisar o comportamento da precipitação extrema sobre a região sudeste do Brasil. Apontou-se que, dependendo do número de horas acumuladas, pode haver diferentes aderências entre os dados pluviométricos e de TRMM. O estudo evidenciou o uso de tais dados como informação relevante para identificar o comportamento da chuva.

CUNHA (2016) utilizou dados do TRMM, entre outros, em seu trabalho com a finalidade de estimar vazão não monitorada em uma bacia hidrográfica por meio de estimativa da umidade do solo via modelagem hidrológica e suporte de dados de satélite.

PANDURO (2018), em seu trabalho, concentrou-se em detectar e caracterizar a variabilidade de eventos extremos devido a variações climáticas e antrópicas por meio de modelagem estatística não estacionária, com vistas a melhor fundamentar a compreensão do risco de inundações e secas. Para tal, enfocou o desenvolvimento e aplicabilidade de técnicas de natureza estocástica que permitem ampliar a resolução espacial da precipitação TRMM, configurando procedimento de desagregação de dados (*downscaling*) mediante o emprego do conceito de cascatas multiplicativas aleatórias.

MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)

O primeiro sensor MODIS foi lançado em 1999 a bordo do satélite TERRA, enquanto o segundo sensor, presente na plataforma AQUA, foi lançado em maio de 2002. Ambos foram concebidos pelo projeto EOS (*Earth Observing System*) da NASA (*National Aeronautical and Space Administration*) para auxiliar os estudos das complexidades das mudanças globais nos três ambientes do sistema Terra: atmosfera, ecossistemas oceânico e terrestre (ROSA, 2007). Seus detectores medem 36 bandas espectrais entre 0,405 e 14,385 μm , e adquirem dados em três resoluções espaciais – 250 m, 500 m e 1.000 m (USGS, 2017).

Os muitos produtos de dados derivados das observações do MODIS descrevem características da terra, dos oceanos e da atmosfera que podem ser usados para estudos de processos e tendências nas escalas local e global.

A aquisição dos sensores é diária. Alguns produtos são composições construídas a partir dos índices de vegetação NDVI (Normalized Vegetation Difference Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index), disponíveis no nível mensal ou compostas para períodos de 16 dias. Para esse produto composto, é escolhido o melhor píxel do período, o de melhor resposta, com menos nuvens, baixo ângulo de visada e que produziria a maior relação EVI/NDVI. As mesmas resoluções são disponíveis para o MODIS-Terra e o MODIS-Aqua. A data de início de contabilização do composto no MODIS-Terra é o dia 1 e do MODIS-Aqua é o dia 9, de modo que, utilizando os dois, é possível ter os índices a cada 8 dias, de 2002 ao presente.

Outro produto de composições oferecido pelo MODIS é a evapotranspiração, com fluxo de calor latente disponível, por exemplo, em um composto de 8 dias produzido com uma resolução dos píxeis no nível de 500 metros. O algoritmo usado para a coleta de produtos de dados é baseado na lógica da equação de Penman-Monteith (FAO, 1998), que inclui dados diários de reanálise meteorológica, juntamente com dados de sensoriamento remoto do MODIS, como dinâmica da propriedade da vegetação, albedo e cobertura do solo.

A aplicabilidade dos dados do sensor MODIS na literatura é bastante vasta na área de hidrologia e de monitoramento da vegetação. Alguns trabalhos são mencionados, a seguir, para ilustrar o potencial de sua aplicação.

ANDERSON *et al.* (2015) comparam séries temporais de índice de área foliar (IAF) obtidos a partir de imagens MODIS, da precipitação oriunda do TRMM e do índice estresse evaporativo (ESI) obtido por sensoriamento remoto na faixa do infravermelho sobre a América do Sul. O período analisado (2003-2013) inclui períodos de secas severas e inundações que ocorreram tanto na Amazônia quanto em áreas de savana não florestada e agrícola no Brasil. Foi realizada análise de correlação cruzada entre valores absolutos e anomalias padronizadas dos parâmetros mencionados (IAF, precipitação e ESI) para regiões florestais e agrícolas representativas. Observou-se uma correlação negativa significativa entre os valores de IAF do MODIS e anomalias de precipitação do TRMM sobre a floresta amazônica. A causa dessa correlação negativa tem sido atribuída na literatura a reações biofísicas reais ou problemas na obtenção do IAF associada a nebulosidade persistente e altos conteúdos de aerossóis atmosféricos. Em contraste, ESI mostra correlações mais fortes com anomalias TRMM e mínima anticorrelação sobre a região amazônica. Correlações positivas significantes foram observadas entre o IAF, TRMM e ESI sobre classes de vegetação mais curtas, incluindo culturas e pastagens.

FENSHOLT *et al.* (2009) compararam os dados de NDVI fornecidos pelo AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) com os dados de MODIS e SPOT através da análise de tendência das séries temporais em uma área no Senegal. Os três produtos de dados não exibiram padrões idênticos de tendências de NDVI. Os dados SPOT são caracterizados por maiores regressões positivas ao longo do período analisado de 8 anos em comparação aos dados do Terra MODIS e AVHRR GIMMS NDVI. A validação dos diferentes produtos de dados NDVI contra as contínuas medições de NDVI *in situ* revelou uma boa concordância entre as medições *in situ* e todos os produtos NDVI baseados em satélite. Usando o Terra MODIS NDVI como referência, concluiu-se que o conjunto de dados NDVI de resolução grossa AVHRR é adequado para estudos de vegetação de longo prazo das mais áridas, enquanto a utilização em áreas mais úmidas devem ser feitas com certas ressalvas.

O trabalho de HOTT *et al.* (2015) utilizou imagens MODIS para análise da série de NDVI das pastagens da Zona da Mata mineira. Utilizando técnica de análise de série temporal desenvolvida por HURST (1951), também conhecida como análise clássica da série reescalada denominada R/S, identificou áreas de pastagens onde há tendência de degradação baseado na memória das séries temporais.

Do ponto de vista agrícola, FIORI *et al.* (2015) analisaram safras agrícolas de soja, através do índice de vegetação NDVI do sensor MODIS para verificar a influência da

disponibilidade hídrica. Concluiu-se que tanto a deficiência como o excesso hídrico podem ser prejudiciais a cultura da soja, sendo os valores de NDVI influenciados diretamente por índices de precipitação. Através da série temporal de NDVI foi possível identificar características da safra, como período de plantio, pico vegetativo, enchimento de grãos e colheita. BERNARDES et al. (2012) utilizaram imagens MODIS para monitorar a biannualidade das plantações de café e avaliar possíveis correlações entre a produtividade do café e os índices de vegetação (EVI e NDVI) no estado de Minas Gerais. As melhores correlações foram obtidas entre a variação na produtividade e a variação nos índices de vegetação do ano anterior.

CHIRPS (*Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data*)

Estimar as variações de precipitação no espaço e no tempo é um aspecto importante do alerta precoce de secas e de enchentes, abrangendo, em termos mais gerais, o monitoramento ambiental da superfície terrestre. Por exemplo, uma estação mais seca do que o normal deve ser colocada no contexto histórico para que a severidade dos déficits de precipitação seja rapidamente avaliada. No entanto, estimativas derivadas de dados de satélite fornecem médias de área que sofrem de vieses devido a terrenos complexos, que, muitas vezes, subestimam a intensidade de eventos extremos de precipitação. Por outro lado, as redes de monitoramento de precipitação carecem de estações instaladas em regiões de natureza rural ou menos urbanizadas, onde há menos estações pluviométricas (FUNK *et al.*, 2015).

O produto CHIRPS começou a ser disponibilizado a partir de 1981 e proporciona uma série de mais de 30 anos de dados globais de chuva.

Abrangendo a faixa de latitudes 50 °S - 50 °N em conjunto com todas as longitudes, o produto CHIRPS incorpora imagens de satélite de resolução espacial de 0,05 ° com dados de estação *in situ* para criar séries temporais de chuva que possibilitam a análise de tendências e monitoramento sazonal de seca.

Pesquisas iniciais enfocaram a combinação de modelos de aprimoramento de precipitação induzida por terreno com dados de estações interpoladas. Mais recentemente, novos recursos de observações de satélites, como as estimativas de precipitação baseadas

em satélite da NASA e NOAA, foram aproveitados para construir climatologias de precipitação em alta resolução (CHG, 2018).

Como exemplo de pesquisas que empregaram os dados disponibilizados pelos CHIRPS, é possível citar FUNK *et al.* (2015), que mostraram como tais dados de precipitação podem ser usados para quantificar os impactos hidrológicos da diminuição da precipitação e do aumento da temperatura do ar no Grande Chifre da África. Usando o modelo de capacidade de infiltração variável (VIC), esclarecem que o CHIRPS pode propiciar previsões hidrológicas efetivas e análises de tendências no sudeste da Etiópia.

TOTÉ *et al.* (2015) utilizaram dados de estimativa de chuva de três satélites: TAMSAT (*African Rainfall Climatology And Time-series*), FEWS NET (*Famine Early Warning System NETWORK*) e CHIRPS para comparar com dados de medição independentes (2001–2012) para diferentes categorias de chuva, ao longo do ciclo sazonal e para regiões dominadas por distintos sistemas climáticos. Foi observado que os produtos de satélite superestimam os valores baixos e subestimados os picos de precipitação. Durante a temporada de ciclones, o CHIRPS mostrou os melhores resultados. SMOS (*Shuttle Radar Topography Mission*)

A informação da variável da umidade do solo é de fundamental importância para estudos hidrológicos, assim como o conhecimento da salinidade dos oceanos é de grande importância para compressão da circulação oceânica (ESA, 2018). O SMOS (*Soil Moisture Ocean Salinity*) foi lançado em 2009 e desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA) em cooperação com a agência francesa (CNES) e espanhola (CDTI). Foi uma missão colocada em operação para fornecer informações sobre a umidade do solo e salinidade oceânica de forma global. O conhecimento de tais informações contribui para a previsão meteorológica e de eventos extremos.

O SMOS é uma missão da ESA que compõem um rádio telescópio apontado para a terra. Seu radiômetro (MIRAS) capta emissões de micro-ondas da superfície da Terra na banda L (1,4 GHz) para mapear os níveis de umidade do solo e a salinidade do oceano (ESA, 2018).

Com o objetivo de validar as estimativas de umidade do solo obtidas pelo SMOS, PILES *et al.* (2011) utilizou dados da rede de medições de umidade do solo da Universidade de Salamanca em Zamora, Espanha. Igualmente a fim de validar padrões espaço-temporais de umidade do solo, BROCCA *et al.* (2014), utilizou os mesmos dados juntamente com outras cinco redes com área de cobertura superior a 100 km² e diferentes passos de tempo de registro de dados, variando de diário a quinzenal. DENTE (2016)

utilizou as redes localizadas nas regiões de Twente (Holanda) e Maqu no Platô Tibetano (China) para comparar as estimativas de umidade do solo pelos sensores AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer*), ASCAT (*Advanced Scatterometer*) e SMOS.

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

O SRTM trata-se de uma missão espacial realizada pela NASA e pela NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) para obter um modelo digital do terreno (MDT) de modo a gerar uma base completa de cartas topográficas digitais terrestres de alta resolução.

A missão consiste num sistema de radar especialmente modificado para adquirir os dados de altimetria estereoscópica, contando com dois refletores de antenas de radar com sinais tomados em ângulos ligeiramente diferentes. Essa missão usa a interferometria de passagem única, que adquire dois sinais simultaneamente usando duas antenas de radar diferentes. Uma antena localizada a bordo do ônibus espacial coleta um conjunto de dados e o outro conjunto de dados é coletado por uma antena localizada no final de um mastro de 60 metros que se estende do ônibus espacial. Diferenças entre os dois sinais permitem o cálculo da elevação da superfície. A técnica utilizada conjuga código computacional interferométrico com radares de abertura sintética (SAR) (USGS, 2018).

A SRTM voou a bordo do Endeavour (ônibus espacial) durante os 11 dias da missão STS-99 em fevereiro de 2000. A Endeavour orbitou a Terra 16 vezes por dia durante a missão de 11 dias, completando 176 órbitas. A SRTM coletou com sucesso dados de radar em mais de 80% da superfície da Terra entre 60 ° latitude norte e 56 ° latitude sul com pontos de dados postados a cada 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros).

Há, na literatura, extensa amplitude de trabalhos que fazem uso dos dados SRTM em diversas áreas. Os modelos digitais do terreno proporcionados por seus dados são amplamente utilizados em pesquisas hidrológicas. As características do terreno constituem importantes fatores para entender o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, sendo esses parâmetros apropriados e inseridos em diversos modelos hidrológicos.

2.2.2 SENSORIAMENTO E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Além do conteúdo de pigmentos, teor de água, e estrutura das plantas, uma série de fatores como espécie, distribuição espacial dos elementos da vegetação, índice de área foliar, biomassa, distribuição do ângulo foliar, características do solo (granulometria, água e seus nutrientes), relevo, declividade, tipo e geometria do sistema sensor, assim como as condições atmosféricas, interferem na reflectância espectral de dosséis vegetais. Todos esses fatores devem ser levados em consideração para que se obtenha uma adequada identificação e quantificação da vegetação.

A fim de entender a interação da vegetação com o meio ambiente, foram inventados diferentes índices, capazes de identificar diferentes aspectos da vegetação. De acordo com BANNARI *et al.* (1995), o trabalho de Person e Miller, em 1972, desenvolveu os dois primeiros índices na forma de razão entre as bandas do visível e infravermelho-próximo.

As plantas verdes absorvem a maior parte da radiação incidente no comprimento do visível e refletem uma porção significativa no infravermelho próximo. Por outro lado, se a diferença entre a radiação refletida no infravermelho próximo e no visível for pequena, a vegetação é provavelmente esparsa, seca ou inexistente (NOVO, 1989).

A maioria dos índices de vegetação obtida por sensoriamento remoto utiliza um algoritmo baseado no cálculo dessa diferença para quantificar a densidade de biomassa na Terra.

Um índice de vegetação (IV) resulta da combinação dos valores de reflectância em dois ou mais intervalos de comprimento de onda, e está intimamente relacionado com a quantidade e o estado da vegetação em uma dada área da superfície terrestre. Em função desse aspecto, uma característica inerente aos IVs é a redução no volume dos dados a ser analisado, pois praticamente toda a informação referente à vegetação fica resumida a somente um valor numérico, permitindo modelar mais facilmente os dados espectrais em conjunto com as variáveis biofísicas da vegetação (RIZZI, 2004 *apud* CUNHA, 2016).

NDVI

Dentre os muitos índices de vegetação existentes, o chamado índice de vegetação por diferença normalizada NDVI é notadamente o índice mais empregado na literatura.

Proposto por ROUSE (1974), trata-se de um índice sensível à presença de vegetação verde (BANNARI *et al.*, 1995). Responde às mudanças na quantidade de biomassa verde, conteúdo de clorofila e estresse por água. Usado em numerosas aplicações regionais e globais para estudar o estado da vegetação, seu sucesso, apesar dos efeitos atmosféricos e degradação radiométrica nas bandas do vermelho e infravermelho próximo, reside na normalização, a qual reduz os efeitos de degradação da calibração do sensor.

O NDVI é uma relação entre medidas espectrais (reflectância - ρ) de duas bandas, a do infravermelho próximo (700-1300 nm) e a do vermelho (600-700 nm). Visa eliminar ou atenuar diferenças sazonais do ângulo solar e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica. A Equação (2.1) apresenta sua expressão como

$$NDVI = \frac{(NIR - V)}{(NIR + V)} \quad (2.1)$$

onde:

NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada;

NIR é a radiação refletida na faixa de comprimentos de onda do infravermelho próximo;

V é a radiação refletida na faixa de comprimentos de onda do vermelho visível.

O NDVI é um índice baseado na grande diferença entre a reflectância nas plantas das regiões do espectro eletromagnético pertencentes ao vermelho e ao infravermelho próximo. A reflectância do vermelho decresce com o aumento da absorção de clorofila pela planta; por outro lado, a reflectância no infravermelho próximo aumenta com o

aumento da biomassa verde. Assim, o NDVI é sensível à presença, densidade e condição da cobertura vegetal (COPPOLA *et al.*, 2009)

Os valores do NDVI variam no intervalo de -1 e 1 para cada píxel. A vegetação está associada aos valores positivos. Materiais que refletem mais intensamente na porção do vermelho em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água e neve) apresentam NDVI negativo. Solos descobertos e rochas refletem o vermelho e o infravermelho próximo quase na mesma intensidade. Por conseguinte, seu NDVI aproxima-se de zero (LILLESAND e KIEFER, 1999 *apud* GOMES, 2007). Para a vegetação, de forma geral, valores altos do NDVI indicam saúde e densidade, enquanto valores baixos caracterizam uma vegetação estressada e esparsa.

2.3 RESILIÊNCIA DA VEGETAÇÃO

A propriedade de resiliência é essencial para bem entender o papel da cobertura vegetal como componente atuante no âmbito do sistema climático. Em síntese, exprime a capacidade dos ecossistemas para tolerar perturbações e recuperar seu estado inicial.

A resiliência pode ser interpretada como uma medida da taxa de recuperação da vegetação de choque ambiental (ODUM, 1983). Quanto maior a resiliência, menor o tempo de recuperação. Espera-se que a resiliência seja reduzida em áreas afetadas por estresse prolongado de origem antrópica ou climática.

Os tempos de recuperação são parâmetros básicos da resposta da vegetação a diversas forçantes e, portanto, são naturalmente importantes para descrever a vegetação de forma fidedigna dentro de modelos dinâmicos. A vegetação saudável tende a se recuperar rapidamente do choque e a persistir no crescimento e na expansão. Pelo contrário, o estresse climático e antrópico pode reduzir a resiliência, favorecendo, assim, a diminuição persistente da atividade vegetativa (SIMONIELLO *et al.*, 2008). Resiliência altamente reduzida é, na verdade, um sinal potencialmente precoce de degradação da terra e desertificação.

Ecossistemas e clima, por sua vez, influenciam um ao outro em escalas de tempo que variam de segundos a milhões de anos, tendo essas interações de resposta de curto prazo na vegetação e no solo face aos processos atmosféricos, bem como condicionando a evolução de longo prazo nos ecossistemas e na estrutura do solo (SELLERS *et al.*, 1995;

PIELKE et al., 1998). Atividades antrópicas complicam ainda mais os efeitos das interações desses mecanismos, representando força externa sobre o sistema (WANG et al., 2006). Mudanças no uso e manejo da terra e pressão humana podem realmente afetar as variáveis climáticas, como, por exemplo, precipitação e temperatura, em escala local e global (FEDDEMA, 2005).

A título de ilustração, as respostas da vegetação ao aquecimento, incluindo mudanças na fenologia, no índice de área foliar e na profundidade da raiz, são capazes de influenciar a disponibilidade de umidade do solo e as taxas de evapotranspiração. Modelos hidrológicos que não incorporam tais reações bióticas diretas podem levar a previsões errôneas do balanço hídrico e de energia do ecossistema (ZVALETA et al., 2003).

No sentido oposto, na presença de condições favoráveis, espera-se que a vegetação cresça e se expanda por longos períodos de tempo, permanecendo, assim, em um estado não estacionário direcionado à condição do clímax, que pode ser denominado de estado estacionário das fases maduras (ODUM, 1983). Portanto, estimar os tempos de recuperação pode fornecer parâmetros dinâmicos realísticos para caracterizar o estado da cobertura vegetal. Se corretamente relacionados a aspectos estruturais, antrópicos e climáticos do território em questão, os tempos poderiam fornecer dicas úteis sobre os elos complexos existentes entre esses fatores e a vegetação dentro da dinâmica hidrológica e climática.

Os tempos de recuperação são parâmetros básicos da resposta da vegetação a um evento e, portanto, são essenciais para descrever a vegetação de forma realística dentro de modelos dinâmicos. A vegetação saudável tende a se recuperar rapidamente do choque e a persistir no crescimento e expansão. Pelo contrário, os estresses climático e antrópico podem reduzir a resiliência, favorecendo a diminuição persistente da atividade de vegetação

2.4 ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES EM SÉRIES ESPAÇO-TEMPORAIS

O estudo e o desenvolvimento de técnicas de reconhecimento de padrões têm merecido especial atenção nas áreas de hidrologia e de sensoriamento remoto, áreas do

conhecimento em que se insere esta dissertação. Nesse sentido, a coleta periódica e análise correspondente de dados permite proceder a prospecção sobre o comportamento temporal de uma variável de interesse em um dado recorte espacial. Mais especificamente, os registros podem ocorrer em diferentes resoluções temporais e em intervalos regulares e irregulares coletados em diferentes pontos do espaço. Em resumo, pelo menos quatro (4) objetivos para estudo das análises de séries espaço-temporais poderiam ser levantados: investigar o mecanismo gerador da série; descrever seu comportamento; fazer previsões de comportamento futuro; e investigar periodicidades.

Em processos de classificação de imagens de satélite, por exemplo, está envolvido um processo de reconhecimento de padrões. Os classificadores podem ser divididos em classificadores píxel a píxel e classificadores por regiões:

- classificadores píxel a píxel utilizam apenas a informação espectral da cada píxel para achar regiões homogêneas; esses classificadores podem ser separados em métodos estatísticos (utilizando regras de teoria da probabilidade) e determinísticos (não utilizam probabilidade);
- classificadores por regiões utilizam, além da informação espectral de cada píxel, a informação espacial que caracteriza a relação com seus vizinhos; procuram simular o comportamento de um foto-intérprete, reconhecendo áreas homogêneas de imagens, baseados nas propriedades espectrais e espaciais de imagens; a informação de borda é utilizada inicialmente para separar regiões e as propriedades espaciais e espectrais para unir áreas com mesma textura.

No presente trabalho, como ficará mais bem exposto na metodologia, lançou-se mão de um procedimento de natureza píxel a píxel. Por outro lado, fica desde já registrado que algoritmos que operam por meio de análise de textura, são uma alternativa interessante a ser explorada futuramente.

NICÁCIO (2008), trabalhou sobre o mapeamento de umidade do solo e evapotranspiração usando imagens Landsat e MODIS na bacia do São Francisco. O destaque é aqui feito, pois, na parte inicial de seu trabalho, estuda os padrões de precipitação na bacia do rio São Francisco empregando a rede de postos pluviométricos disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA). A partir do uso de método K-médias, de natureza não supervisionada e do tipo píxel a píxel, com base em distância

Euclidiana, identifica regiões homogêneas, definindo o alto, médio, sub-médio e baixo São Francisco. Note-se que o método K-médias é frequentemente usado também em procedimentos de classificação não supervisionada de imagens de satélite.

Por outro lado, SANTOS (2002) investigou o uso de algoritmos de textura em contraposição a algoritmos classificadores pixel a pixel com aplicação em imagens óticas e de radar. Mais especificamente, aplicou o método NGLDM (*Neighbour Grey Level Dependence Matriz*) (SUN e WEE, 1983), envolvendo, no caso do trabalho, o uso de semivariograma para caracterização da correlação espacial na imagem, que permitiu identificar a dimensão da janela empregada para percorrer a imagem e calcular diferentes estatísticas. De fato, estatísticas de textura podem ser definidas como, por exemplo, número não-uniforme (NNU), ênfase nos números pequenos (SNE), ênfase nos números grandes (LNE), segundo momento (SMT) e entropia (ENT). As texturas caracterizam e quantificam a distribuição de entradas na matriz do NGLDM. O método mostrou-se robusto especialmente no caso de imagens de radar, que apresentam um grau de ruído elevado, elevando o grau de precisão em processos de classificação de imagens.

Sob o ponto de vista hidrológico, XAVIER (2002) empregou análise geoestatística mediante o uso de semivariogramas e processos de interpolação Bayesiana para caracterizar e simular campos pluviométricos. Esses campos pluviométricos foram analisados no contexto de análise de sensibilidade quanto a incerteza na produção da vazão mediante modelagem chuva-vazão com suporte do modelo semidistribuído Topmodel (KIRKBY e BEVEN, 1978). Esse tipo de abordagem geoestatística situa-se dentro do contexto de análises que envolvam a correlação espacial e merecem ser melhor explorados na área de reconhecimento de padrões aplicados a imagens de satélite, seja na área de chuva ou de medição de variáveis ambientais de forma geral. LEITE (2002), em particular, avança na questão de atribuição de valor à informação hidrometeorológica, notadamente informatividade da chuva quando empregada em estudos de previsão de chuva integrados com a previsão de vazões por modelos hidrológicos.

Cabe ainda destacar estudos de DIAS (2014) e de MOLINARI (2015), que empregaram métodos de regionalização de informações com base em componentes principais. DIAS (2014) usa dados TRMM para identificação de proposição de rede hidrométrica da bacia do Dois Rios, situada na região serrana do Rio de Janeiro. Em especial, emprega análise geoestatística e análise de componentes principais. MOLINARI (2015), por sua vez, desenvolve a modelagem da qualidade de água na bacia do rio

Piabanha, contígua à bacia do Dois Rios, situada na região serrana do Rio de Janeiro. Como parte de seu trabalho, caracteriza os padrões de coleta de qualidade de água na bacia do Piabanha a partir de estações disponíveis de medição com base no método de componentes principais.

Estudos de definição e proposição de rede hidrometeorológica estimula efetivamente o emprego de técnicas de reconhecimento de padrões. Entre outros estudos, SOUZA (2015) desenvolve sua pesquisa na bacia do rio Machadinho em Rondônia, Amazônia. No caso, explora a proposição de uma rede hidrossedimentológica. No estudo, emprega o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para o balanço hídrico e análise de produção de vazão e de sedimentos. Ao final, por meio de identificação de limitações da rede de medição atualmente existente, prospecta padrões hidrogeomorfológicos na bacia, propondo diretriz de rede de medição hidrossedimentológica para a região estudada.

Quanto à abordagem de reconhecimento de padrões no sentido de identificação de alterações da cobertura vegetativa, temática mais diretamente abordada no presente trabalho, WAYLEN *et al.* (2014), por exemplo, afirmam que um conjunto de técnicas que avaliam e modelam especificamente mudanças sazonais e fenológicas dentro de uma série temporal de imagens engloba enfocam mudanças de tempo, magnitude e direção de mudança tanto em períodos sazonais quanto em períodos mais longos.

Embora exista extensa quantidade de dados de curto, médio e longo prazo detectados remotamente, a aplicação de métodos de detecção de mudança de séries temporais enfrenta desafios. Estimar a mudança a partir de dados de sensoriamento remoto não é necessariamente simples, uma vez que séries temporais contêm uma combinação de mudanças sazonais, graduais e abruptas, além do ruído que se origina de erros geométricos remanescentes, dispersão atmosférica e efeitos de nuvens (COPPIN *et al.*, 2004).

LU *et al.* (2004) argumentam que métodos que se concentram em séries temporais de poucas imagens (entre 2 e 5 imagens) apresentam alto risco de confundir a variabilidade com a mudança, uma vez que distúrbios podem ocorrer entre aquisições de imagens. A detecção de mudanças de padrões deve ser, portanto, cautelosamente analisada.

VERBESSELT *et al.* (2010) abordam diversas propostas para análise de séries temporais de imagens, como análise de componentes principais (ACP), decomposição por ondaletas (wavelets), análise de Fourier e análise vetorial de mudança (AVM). Essas

abordagens de análise de séries temporais discriminam o ruído do sinal por suas características temporais, mas envolvem algum tipo de transformação projetada para isolar componentes dominantes da variação ao longo de anos de imagens através do espaço espectral multitemporal.

Complementarmente, o método de Hurst representa mais uma ferramenta para análise de séries temporais. Foi originalmente desenvolvido na década de 1950 (HURST, 1951) no campo da hidrologia, porém bastante aplicado nas ciências econômicas. Chamado também de análise de amplitude reescalada (R/S), é um método para determinação da autocorrelação das séries. O expoente de Hurst é uma ferramenta potencial para descrever a escala de evolução de séries temporais, sensível à memória de curto e longo prazo. Essa análise classifica as séries temporais como antipersistência ou anticorrelação, onde valores ou fenômenos tendem a se reverter aleatoriamente no futuro ou que apresentam uma persistência ou memória, onde valores passados influenciam os resultados futuros. HOTT *et al.* (2015) utilizou o expoente de Hurst para analisar dados de NDVI do sensor MODIS relativos a pastagens na região da Zona da Mata mineira. Como resultado, foi encontrada grande área de pastagens com antipersistência, denotando tendência de pouca sustentabilidade nas pastagens dessa região.

Quando se trata de análises de séries temporais, análises simples podem mostrar resultados interessantes. A caracterização da direção e da força de uma tendência pode ser realizada com a análise de regressão (YAFEE *et MCGHEE*, 2000). A inclinação é uma medida da direção da tendência, assim como a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) de um ajuste linear ou polinomial e a significância da inclinação são medidas da magnitude da tendência. Tendência é a trajetória temporal geral de um indicador. As tendências do tempo são facilmente entendidas pelos interessados, no entanto, geralmente, não são captadas como tendenciosas de maneira óbvia (O'MALLEY *et WING*, 2000).

O estudo de ECKERT *et al.* (2015) examinou as séries temporais de dados de NDVI oriundos do satélite MODIS para detectar áreas de degradação e regeneração de terras na Mongólia. Mudanças de precipitação no período de tempo parecem ter influenciado as grandes áreas de tendências do NDVI. A metodologia de análise de tendências da série temporal NDVI detectou com sucesso as mudanças devido ao desmatamento, incêndios florestais, atividades de mineração, expansão urbana e regeneração de pastagens. Os resultados mostram que a análise de tendências de séries

temporais NDVI é adequada para detectar áreas de mudança de vegetação e para identificar a degradação e a regeneração da terra.

Quando realizada a análise de tendência, esta pode estar aumentando, diminuindo ou manter-se estável. No entanto, se uma tendência não for considerada em relação a uma referência, os resultados poderão ser enganosos.

WASHINGTON-ALLEN *et al.* (2006) defendem o conceito de condições de referência e a interpretação de séries temporais em relação a alguma referência. Tais referências podem incluir uma condição inicial, mudança de uma média ou outra medida de tendência central, ou alguma forma de condição limite crítica, tal como percentil, máximo ou mínimo, entre outras medidas estatísticas. Essa abordagem fornece uma base comparativa para comportamentos de séries temporais, como “estáveis”, “crescentes” ou “decrecentes”.

Cabe ressaltar ainda que a análise da tendência permite avaliar a resiliência ecológica, isto é, a resposta e a recuperação de um ecossistema em relação a um distúrbio (WESTMAN, 1985 *apud* WASHINGTON-ALLEN *et al.*, 2006).

2.5 ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA DA VEGETAÇÃO

A análise de persistência de dados é um processo que afere a mudança na tendência da série temporal de um dado a partir de um tempo de referência. Como trabalho pioneiro em tal contexto, LANFREDI *et al.* (2004), utiliza os dados de NDVI do sensor AVHRR para analisar a persistência desse índice em toda a Itália. De acordo com estudos de LANFREDI *et al.* (2004), SIMONIELLO *et al.* (2008) e COPPOLA *et al.* (2009), a análise de persistência mostra-se um método útil para estudo das propriedades estacionárias da dinâmica das vegetações. Em particular, a análise de persistência é capaz de capturar possíveis escalas de tempo características (probabilidade de persistência exponencial) que se inclinam para processos estacionários.

WALEY *et al.* (2014) utiliza o conceito de persistência para avaliar tres métodos simples aplicados ao estado da Flórida, nos Estados Unidos. Os métodos utilizados em seu trabalho determinam a significância estatística de três métricas separadas da persistência da cobertura vegetal ou mudanças dentro de uma paisagem. A principal diferença na abordagem está na escolha do nível de referência adotado para a análise de

persistência em comparação com diferentes referências selecionadas; persistência direcional (alterações no sinal em relação a algum valor de referência fixo), persistência direcional relativa (alterações no sinal em relação ao valor anterior) e persistência maciça (alterações na magnitude em relação ao valor anterior).

Essas escalas de tempo características (tempos médios de recuperação) estão ligados ao conceito de resiliência, isto é, a capacidade da vegetação para se recuperar de distúrbios. As condições de equilíbrio para a vegetação que se recuperam eficientemente dos choques são caracterizadas por padrões que parecem ser estacionários de longo prazo (SIMONIELLO *et al.*, 2008).

O tempo médio de recuperação depende de muitos fatores relacionados ao tipo de vegetação, recursos, clima local, entre outros. Na presença de recursos suficientes, assimetrias em padrões negativos e positivos podem ser observadas porque a vegetação tende a se desenvolver. Os tempos médios de recuperação que são necessários para restaurar as condições anteriores após um distúrbio negativo são relativamente curtos para uma vegetação saudável, dado que boas condições permitem um maior número de padrões positivos persistentes, ou seja, uma escala de tempo característica mais longa. Um desvio desse cenário é uma indicação de comportamentos coletivos que devem ser direcionados às causas certas. Portanto, a estimativa de persistência também é útil para discriminar áreas onde mudanças são potencialmente impulsionadas por mudanças climáticas e por impacto humano de zonas onde as mudanças são inerentes à fisiologia da cobertura vegetal (LANFREDI *et al.*, 2004).

A metodologia de análise de persistência é baseada nas estatísticas de primeira passagem (*first-passage*) (REDNER, 2001), que inclui o cálculo da probabilidade de persistência, probabilidade de que determinada flutuação nos dados desvie do nível do tempo de referência para um determinado intervalo de tempo t antes de retornar ao mesmo. Este método é dedicado à estimação da probabilidade de persistência que, por sua vez, permite estimar possíveis escalas de tempo características (tempos médios de recuperação) relacionadas à resiliência da cobertura vegetal.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo apresenta a metodologia proposta para atender ao objetivo central deste trabalho, ou seja, a avaliação do estado e evolução da vegetação através de análise de persistência dos dados de NDVI. Igualmente, métodos e processos relacionados aos objetivos específicos são abordados.

Primeiramente, são descritos os processos para aquisição e tratamento de dados observados, seguidos pelos adquiridos por sensoriamento remoto. Alguns métodos estatísticos são utilizados para a análise de desempenho dos dados de sensoriamento remoto relacionados a pluviosidade, que possuem correspondente medida observada, com objetivo de mostrar a validade do uso desses dados como caracterizadores da bacia.

Mais detalhadamente, é exposto o tratamento dos dados de NDVI, que será objeto da análise de persistência na busca por avaliar a evolução do estado da vegetação de uma bacia hidrográfica. A tarefa envolve a caracterização da bacia hidrográfica de estudo, apresentando o perfil de variáveis fisiográficas e hidroclimáticas a fim de expressar suas dinâmicas e suas correspondentes relações com o NDVI.

Um resumo da estrutura dos procedimentos realizados é mostrado no fluxograma contido na Figura 3.1, mostrando suas etapas bem como a seleção e a aquisição de dados para a caracterização da bacia hidrográfica de estudo.

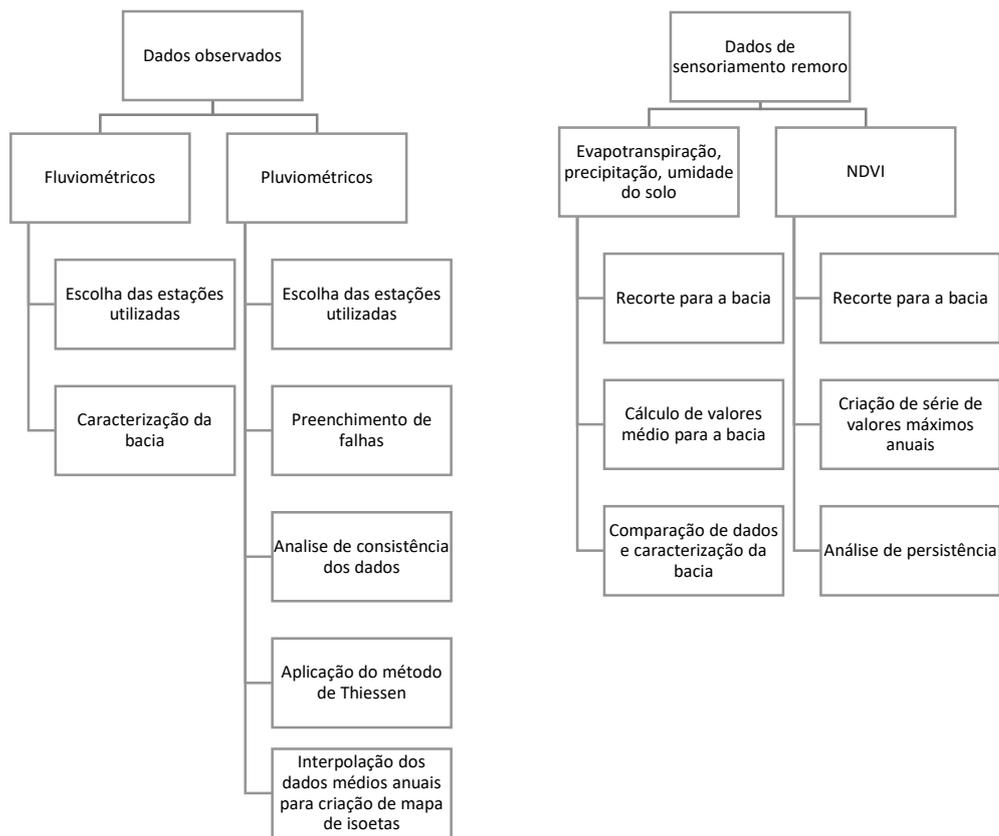


Figura 3.1 Síntese da metodologia

Ao longo do capítulo, mostra-se, em detalhes, o método utilizado para avaliação do estado e evolução da vegetação da bacia de estudo. É ilustrado o processo de tratamento de dados, processamento para análise de persistência e atribuição das probabilidades associadas. No próximo item, fazem-se observações quanto aos dados empregados e procedimentos de análise

3.2 DADOS OBSERVADOS

Os dados pluviométricos foram obtidos através do banco de dados *Hidroweb*, ferramenta de disponibilização de dados da ANA (Agência Nacional de Águas). Os dados brutos das estações foram obtidos do endereço eletrônico da ANA. Em uma primeira avaliação, descartou-se uma estação que apresentava falhas sistemáticas.

As etapas de tratamento dos dados discriminados a seguir encontram-se em PINTO *et al.* (1976). A segunda etapa no tratamento dos dados foi o preenchimento de falhas. O preenchimento foi realizado para os dados mensais segundo

$$P_x = \frac{1}{3} \left(\frac{M_x}{M_a} P_a + \frac{M_x}{M_b} P_b + \frac{M_x}{M_c} P_c \right) \quad (3.1)$$

onde:

P_x é a precipitação no posto analisado;

P_a , P_b e P_c são as precipitações do mesmo mês de P_x das três estações mais próximas da estação X;

M_x , M_a , M_b e M_c são as médias de precipitação de cada estação.

Esse método de preenchimento de falha assume que a precipitação em determinada estação deve ser proporcional às precipitações registradas nas estações vizinhas. Pressupõe-se, também, que o coeficiente de proporcionalidade entre os postos seja a relação entre suas médias. Em outras palavras, assume-se que as precipitações são diretamente proporcionais às suas médias.

Após o preenchimento de falhas, a análise de consistência dos dados foi realizada mediante uma análise de dupla massa.

Nessa análise, cada posto pluviométrico é testado individualmente. Os valores acumulados do período estudado são confrontados com os valores acumulados médios dos postos selecionados como apoio. No caso deste estudo, todos os postos foram utilizados para o apoio.

De posse dos valores acumulados do posto analisado e dos apoios para fazer análise de dupla massa, deve-se dispor graficamente esses dados conforme ilustra Figura 3.2.

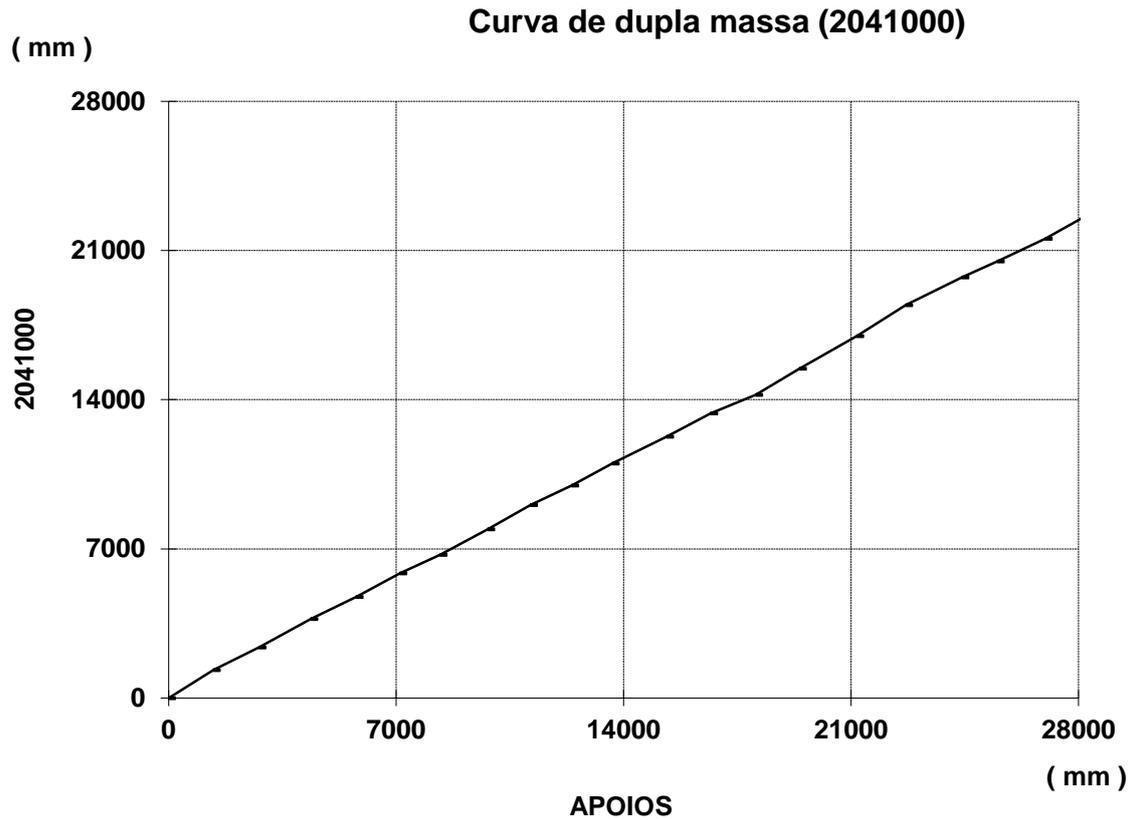


Figura 3.2 Exemplo de curva de dupla massa para a estação 2041000

Os pontos do gráfico devem ser colocados, aproximadamente, segundo uma linha reta, como apresentado no exemplo. Uma mudança brusca na direção dessa reta indica qualquer anormalidade havida com o posto, tal como mudança de local ou das condições de exposição do aparelho às precipitações. Caso haja constatação de problemas com os dados da estação, pode-se efetuar a correção de acordo com a expressão

$$P_a = \frac{M_a}{M_0} P_0 \quad (3.2)$$

onde:

P_a são as observações ajustadas à condição atual de localização ou de exposição do posto;

P_0 são os dados observados a serem corrigidos;

M_a é o coeficiente angular da reta do período mais recente;

M_0 é o coeficiente angular da reta no período em que se fizerem observações P_0 .

Uma vez com os dados preenchidos e consistidos, a precipitação média da bacia foi calculada segundo método de Thiessen. O método de Thiessen para a determinação da precipitação média da bacia hidrográfica leva em consideração os postos de medição nelas encontrados e o peso definido pela sua área de influência.

As áreas de influência de cada posto pluviométrico são definidas pelos polígonos de Thiessen, obtidos através do cruzamento das mediatrizes definidas a partir dos segmentos que unem os postos com os segmentos que unem postos empregados na análise. Os polígonos de Thiessen para a bacia do Itapemirim foram calculados com auxílio de código computacional executados no QGIS e são apresentados na Figura 3.3.

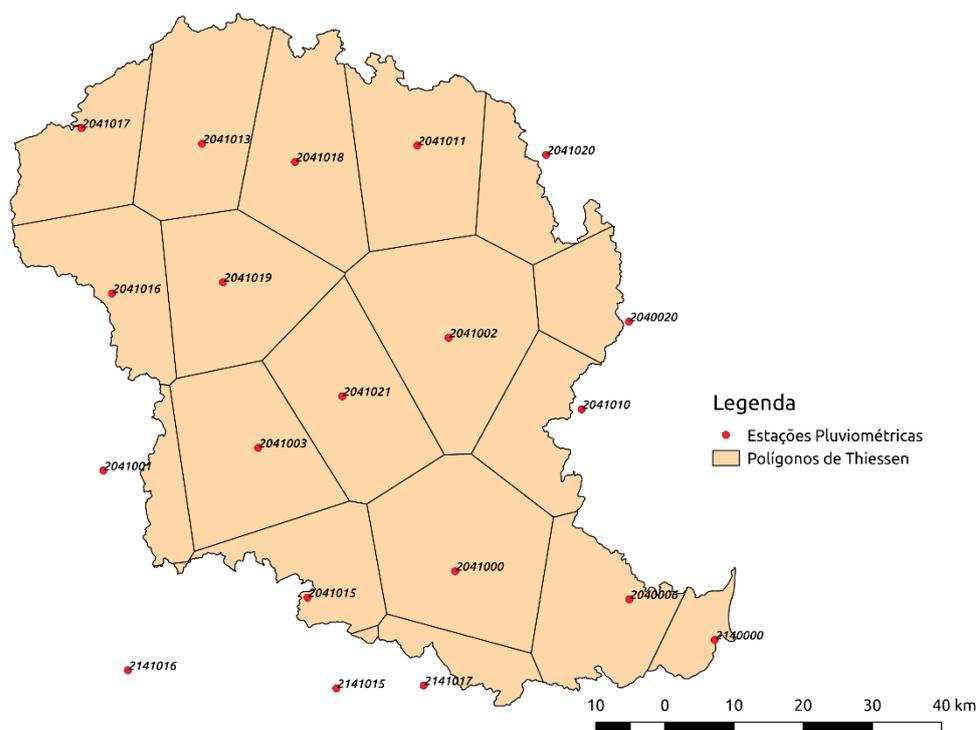


Figura 3.3 Polígonos de Thiessen que definem a área de influência de cada estação pluviométrica sobre a bacia

A precipitação média da bacia é obtida pela ponderação dos valores registrados em cada estação pluviométrica e de suas áreas de influência. Considerando quatro postos com informação disponível (postos a, b, c e d), a precipitação média estimada por esse método é representada na forma

$$P_m = \frac{A_a \cdot P_a + A_b \cdot P_b + A_c \cdot P_c + A_d \cdot P_d}{A} \quad (3.3)$$

onde:

P_a, P_b, P_c, P_d são as precipitações nos postos a, b, c e d, respectivamente;

A_a, A_b, A_c, A_d são as áreas de influência dos postos a, b, c e d;

P_m é a precipitação média na bacia;

A é a área da bacia que, no caso, corresponde à soma das áreas de influência dos postos.

Os dados de vazão foram igualmente obtidos através do *Hidroweb*.

3.3 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Além dos dados observados, foram extraídos para a bacia dados de sensoriamento remoto a fim de caracterizá-la fisiográfica e hidroclimaticamente, sendo eles: modelo digital do terreno, pluviosidade, evapotranspiração, NDVI e umidade do solo. Os dados de sensoriamento remoto foram extraídos e calculados como parâmetros médios para a bacia.

Os dados de chuva são oriundos de duas fontes, o TRMM e o CHIRPS, duas missões espaciais da NASA. Os dados de evapotranspiração e NDVI provêm do MODIS, satélite da NASA, produtos MOD16 e MOD13C2. Já a umidade do solo é decorrente do SMOS. A Tabela 3.1 apresenta as missões espaciais, as variáveis obtidas e as respectivas resoluções espaciais e temporais dos dados utilizados.

Tabela 3.1 Informações de resolução espacial e temporal para os dados hidroclimatológicos obtidos por sensoriamento remoto

Missão	Variável medida	Resolução Espacial	Resolução Temporal
SMOS	Umidade do solo	35 – 50 Km	1 a 3 dias
MODIS - MOD16	Evapotranspiração	500 m	8 dias
MODIS - MOD13C2	NDVI	500 m	mensal
MODIS - MOD13Q1	NDVI	250 m	16 dias
TRMM	Pluviosidade	25 km	8 horas
CHIRPS	Pluviosidade	5 km	1 dia

Os dados de NDVI, além dos valores médios que serviram à caracterização da bacia, foram objeto de estudo da análise de persistência, com a finalidade de avaliar a resiliência dos diferentes tipos de vegetação. Por essa razão, os dados de NDVI serão tratados separadamente.

3.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Os dados de sensoriamento remoto de precipitação, por apresentarem correspondentes medições locais, passaram por processo de comparação entre essas séries.

Para tais comparações foram usadas medidas estatísticas para validação da chuva estimada por satélite recomendadas pelo *International Precipitation Working Group* (IPWG) por meio do *WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification (World Weather Research Programme/Working Group on Numerical Experimentation)* (WWRP/WGNE, 2016). Para o presente trabalho, usamos os parâmetros bias, erro médio e coeficiente de correlação de Pearson.

O *bias*, expressão em inglês que significa viés, é um parâmetro estatístico que relaciona os dados de chuva medidos localmente com as informações obtidas por satélite de acordo com expressão

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n Z/n}{\sum_{i=1}^n P/n} \quad (3.4)$$

onde:

Z é a estimativa feita por sensoriamento remoto;

P são os valores medidos por pluviômetros;

n é o número de medições.

Os valores de *bias* calculados superiores a 1 significam que os dados de sensoriamento remoto superestimam a chuva obtida pelos pluviômetros. Já quando inferior, há subestimação.

O erro médio (EM) indica a diferença média entre as intensidades de chuva por satélite e pluviômetro.

$$EM = \frac{\sum_i^n P - Z}{n} \quad (3.5)$$

O coeficiente de correlação (r) representa a associação linear entre duas variáveis. Esse parâmetro apresenta valores entre -1 a 1, onde 1 representa correlação linear positiva total, 0 onde não há correlação linear e -1 é para correlação linear negativa total. O coeficiente de Pearson é motrado na forma

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.6)$$

onde:

x e y são os dados das variáveis a serem comparadas;

n é o número de dados.

No caso da comparação dos dados de pluviosidade medidos por pluviômetros de por sensoriamento remoto, x e y são substituídos por tais dados (P e Z nas equações anteriores).

O coeficiente de correlação de Pearson foi também utilizado para comparar séries de diferentes variáveis ao longo de suas séries históricas.

3.5 SÉRIE DE NDVI

Dentre os produtos gerados a partir dos dados coletados pelo MODIS, o índice de vegetação NDVI (*normalized difference vegetation index*), contido no produto MOD13Q1, é voltado especialmente para medida de biomassa.,

Esse produto fornece o valor de NDVI em uma base por píxel com resolução espacial de 250 metros. Seu algoritmo escolhe o melhor valor de píxel disponível de todas as aquisições do período de 16 dias. O critério utilizado é a baixa quantidade de nuvens, baixo ângulo de visão e o valor de NDVI mais alto, formando uma composição máxima de 16 dias. Por tais razões, esse produto viabiliza o monitoramento da vegetação com grande frequência de observação ao longo de seu ciclo vegetativo e produtivo, fundamental sobretudo no caso de culturas agrícolas

A série de NDVI do sensor MODIS foi adquirida para o presente trabalho de forma a abranger uma série de 16 anos. Os dados vão de 18 de fevereiro de 2000 a 31 de dezembro de 2015, totalizando 343 imagens. Os dados do MODIS podem ser obtidos no endereço eletrônico da NASA pelo *Earth data*, necessitando de alguns passos para ser utilizado.

3.5.1 PREPARAÇÃO DE DADOS DE NDVI

A Figura 3.4 mostra um esquema dos procedimentos realizados para tratamento dos dados de NDVI para prepará-los para a análise de persistência posteriormente realizada. Uma rotina computacional foi gerada para baixar todos os dados diretamente do endereço eletrônico da NASA, onde encontram-se disponíveis em formato *hdf*. Posteriormente, os dados foram convertidos para *Geotiff*, formato matricial (*raster*) que

possibilita leitura dos dados, com auxílio de uma rotina na linguagem *Python* mediante uso da ferramenta GDAL (Anexo B, item B.1).

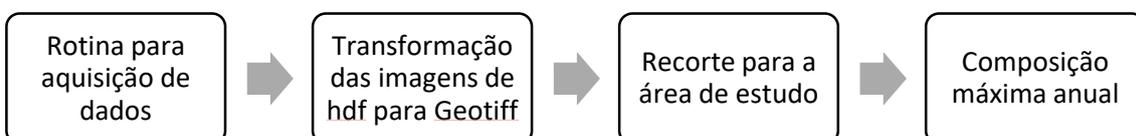


Figura 3.4 Procedimento de tratamento dos dados de NDVI

Após a transformação de formato das imagens, elas foram recortadas para a bacia com uso de um *shapefile* com auxílio de rotina em *Python*, também com utilização da biblioteca GDAL (Anexo B, item B.2). A Figura 3.5 mostra um exemplo de imagem antes e depois do processamento.

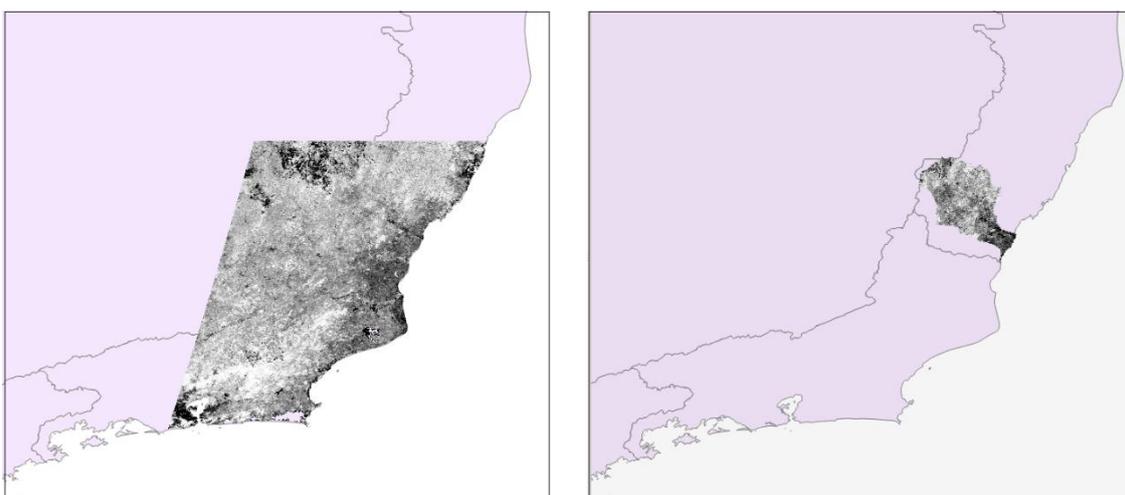


Figura 3.5 Exemplo de imagem MODIS com dados de NDVI original (esquerda) e recortada para a bacia (direita)

3.5.2 COMPOSIÇÃO DE VALORES MÁXIMOS ANUAIS

A composição de valores máximos (CVM) é uma forma de utilização do dado de NDVI recorrentemente utilizado. Os próprios dados do sensor MODIS apresentam produtos decorrentes dessas composições de 16 dias com o objetivo de obter imagens com melhores ângulos de obtenção de imagens e menores interferências de nuvens. As CVMs anuais de NDVI (HOLBEN, 1976) minimiza além de minimizar os efeitos

atmosféricos eliminam os ruídos intra-anuais causados por diferentes características de estações fenológicas das vegetações, como justificado por LANFREDI *et al.* (2004). Informações sobre os valores máximos da atividade da vegetação são também reconhecidas por apresentarem uma forte ligação com as mudanças no clima (HEUMANN *et al.*, 2007).

A composição de valores máximos anuais tem a vantagem de eliminar da análise de tendência as variações decorrentes da sazonalidade da vegetação que ocorrem dentro do ciclo anual. A escolha de trabalhar com uma imagem representativa por ano torna a análise simples, de fácil aplicabilidade e rápida computacionalmente. Dessa forma, para uma análise de longo prazo da série representativa da vegetação com foco em seu comportamento geral, optou-se por utilizar o valor máximo anual como variável para a análise de tendência.

Para cada ano da série histórica dos dados de NDVI, foi produzida uma imagem composta pelos valores máximos medidos naquele ano. Para obtenção dessa imagem, foi utilizado um programa na linguagem *Python* (Anexo B, item B.3).

Vale ressaltar que as imagens do produto MODIS não necessitam de correções adicionais, pois já passaram previamente por correções atmosférica, geométrica e radiométrica (SOARES *et al.*, 2007 *apud* BISPO, 2013).

3.6 ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA

O método de análise de persistência dos dados objetiva avaliar a evolução da vegetação de forma geral e com enfoque em longo prazo. Baseado em um período de referência, analisam-se as mudanças no NDVI através de suas tendências. Esse método contempla uma análise pixel a pixel da área de estudo e assume que há independência entre os mesmos.

A probabilidade de persistência mede a probabilidade de que a flutuação de determinada série desvie dos níveis de referência em um intervalo de tempo t antes de retornar ao mesmo. Esse conceito está relacionado à probabilidade de primeira passagem (REDNER, 2001), que tem sido usado em estudos para caracterizar a dinâmica de fenômenos espacializados.

Para este estudo, trata-se o índice de vegetação como um campo escalar, sendo NDVI (x, y, t) o valor do índice medido no tempo t e local (x, y) . As diferenças dos valores de NDVI (x, y, t) no espaço, em determinado tempo t , podem ser consideradas como uma questão de diferenças na morfologia da superfície, uma vez que a superfície de estudo não é homogênea, apresenta diferentes usos do solo e características climáticas. Se for selecionado um nível de referência, essa morfologia pode ser vista como uma estrutura caracterizada por vales e picos, onde os picos representam valores mais altos de NDVI, como áreas densamente vegetadas, e os vales os valores mais baixos, com vegetação anuais esparsa.

Em uma bacia hidrográfica, esses vales e picos estarão associados, principalmente, ao uso e cobertura do solo, que, em não havendo mudanças nesses usos, manterão suas características de serem picos e vales ao longo da série, embora não sem variações de seus valores ao longo do tempo. Essas estruturas são determinadas principalmente por causas não dinâmicas do solo. A perda de identidade de tais estruturas estará ligada a mudanças drásticas na paisagem devido a eventos como incêndios, desmatamento, furacões, entre outros.

Neste estudo, o interesse está em avaliar as mudanças nos valores de NDVI dentro de classes com determinadas características. Dessa forma, busca-se investigar processos mais gerais que afetam a altura de picos ou a profundidade dos vales, buscando detectar e analisar essas variações.

No algoritmo desenvolvido e adaptado para emprego nesta dissertação, o histograma da distribuição de sinais é estimado a partir dos sinais (positivos ou negativos) das inclinações das tendências lineares obtidas ajustando sequências de tempo cada vez mais longas: o primeiro tempo de retorno é definido como a primeira vez que o declive é zerado. Esse fato ocorre quando a sequência parece estar parada e pode-se assumir que o estado atual é estatisticamente equivalente ao inicial (SIMONIELLO *et al.*, 2008).

O algoritmo desenvolvido por LANFREDI *et al.* (2004) para a análise de persistência, representado graficamente na Figura 3.6, estima primeiramente as tendências lineares ao longo de um período inicial de referência $[0, t_i]$ para todos os píxeis (x, y) da área de estudo. A escolha do período de referência é um fator importante para a análise. Como colocado por WAYLEN *et al.* (2014), a referência escolhida para a análise de persistência dependerá do tópico de pesquisa, podendo ser um valor particular de interesse teórico, determinado por um limiar específico empiricamente definido, ou,

como neste caso, em que a persistência é de especial interesse, pelos valores iniciais da série temporal.

Ano a ano, os dados vão sendo incrementados à série. Aqueles locais onde a adição da atual flutuação interanual não é capaz de eliminar a tendência previamente estimada, ou de alterar seu sinal, são classificados como persistentes. LANFREDI *et al.* (2004) enfatizam que o ajuste linear para esse caso é usado apenas como uma ferramenta para destacar as tendências líquidas positivas ou negativas em comparação com o mapa de referência selecionado. Não se está interessado na melhor representação da mudança, mas apenas em avaliar se o NDVI está aumentando ou diminuindo para estimar os momentos em que essas tendências são eliminadas ou invertidas.

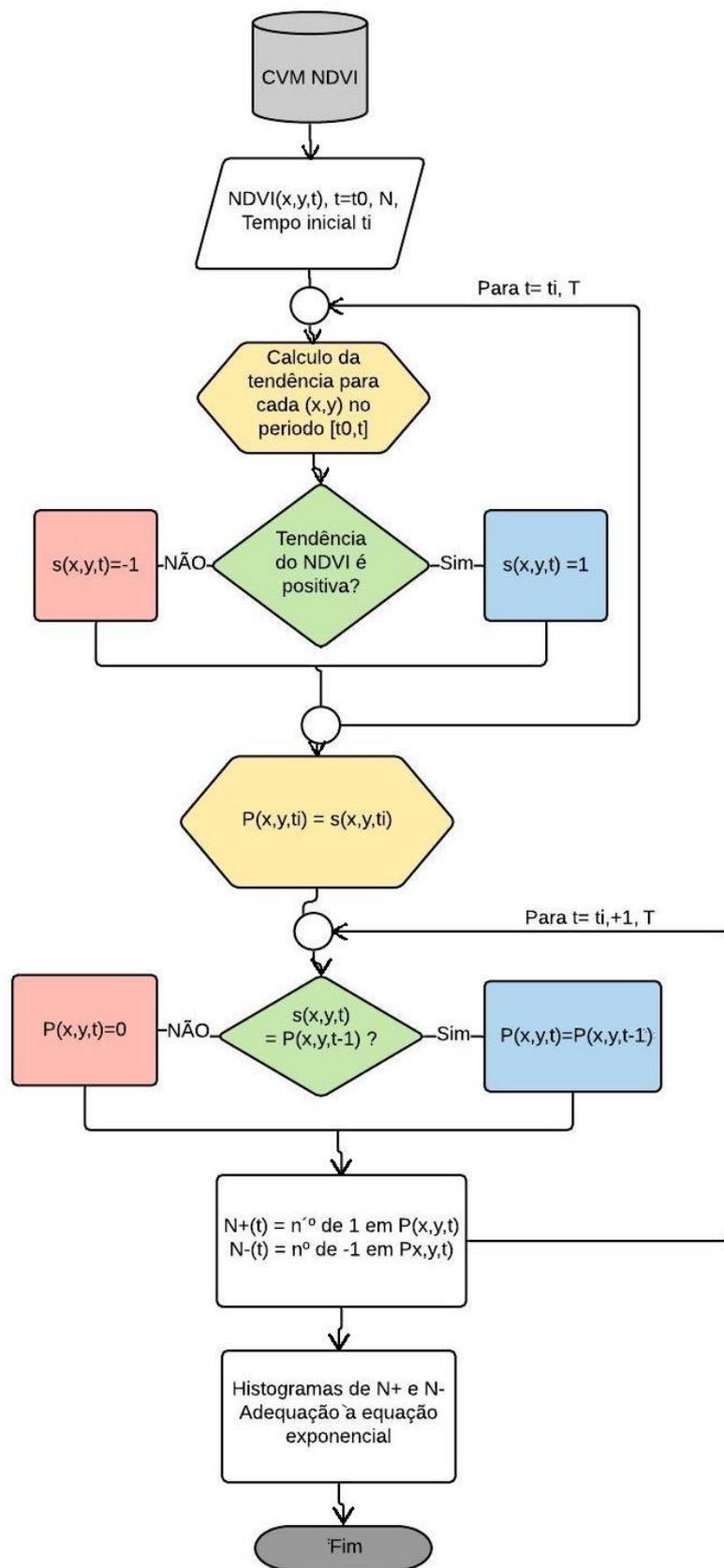


Figura 3.6 Fluxograma com procedimentos para a avaliação da persistência temporal. Fonte: adaptado de LANFREDI et al. (2004).

Como o objeto de estudo é a identificação de mudanças e não sua medida quantitativa, apenas os sinais das tendências são usados.

Seja NDVI (x, y; 0) o valor da CVM-NDVI medido no primeiro ano das séries temporais consideradas no local (x, y), enquanto NDVI (x, y; t) representa o valor de CVM-NDVI no tempo t e local (x, y). O algoritmo (LANFREDI *et al.*, 2004), primeiramente, estima tendências lineares ao longo de um período inicial de referência [0, t_i] para todos os píxeis (x, y). O sinal das tendências, que expressa a tendência do NDVI de aumentar ou diminuir, dura no tempo até que as variações interanuais não se integrem destrutivamente. Então, na passagem de um ano para o outro, aqueles locais onde a adição do novo dado anual não é capaz de alterar o sinal da tendência da série são classificados como persistentes.

Chamamos de superfície s (x, y, t) o campo dos sinais de tendência em um período [0, t], que recebe o valor de 1 nos píxeis (x, y) onde uma tendência positiva é detectada no período dado e valor -1 caso contrário. No tempo inicial t = t_i, constrói-se uma superfície s (x, y, t_i). Então, progressivamente adicionam-se novos anos e guardam-se as informações em mapas de persistência P (x, y, t) que são construídos de acordo com a regra

$$P(x, y, t_i) = s(x, y, t_i) \quad (3.7)$$

$$P(x, y, t) = \begin{cases} 0 & \text{se } s(x, y, t) \neq P(x, y, t - 1) \\ P(x, y, t - 1) & \text{se } s(x, y, t) = P(x, y, t - 1) \end{cases}$$

$$t > t_i$$

No tempo de observação T, obtém-se um campo cumulativo de acordo com

$$P_{t_i}^T(x, y) = \sum_{t=t_i}^T P(x, y, t) \quad (3.8)$$

Em todos os píxeis (x, y), a magnitude de tal campo indica o número de anos durante os quais flutuações interanuais não foram capazes de mudar a tendência inicial, e seu sinal indica se a tendência era de aumentar ou diminuir. De acordo com esse raciocínio, a seguir, diz-se que uma tendência se mantém se ainda tiver o mesmo sinal do

inicial, mesmo que com força diferente. O Anexo B (item B.4) apresenta a rotina computacional utilizada para realização da análise de persistência.

Nessa estrutura, captar o tempo de retorno preciso não é possível por causa do caráter discreto das séries temporais. Detecta-se o primeiro tempo de passagem quando o campo flutuante acabou de passar o tempo de retorno e a tendência muda o sinal.

A Figura 3.7 mostra um exemplo da aplicação do algoritmo para um determinado pixel.

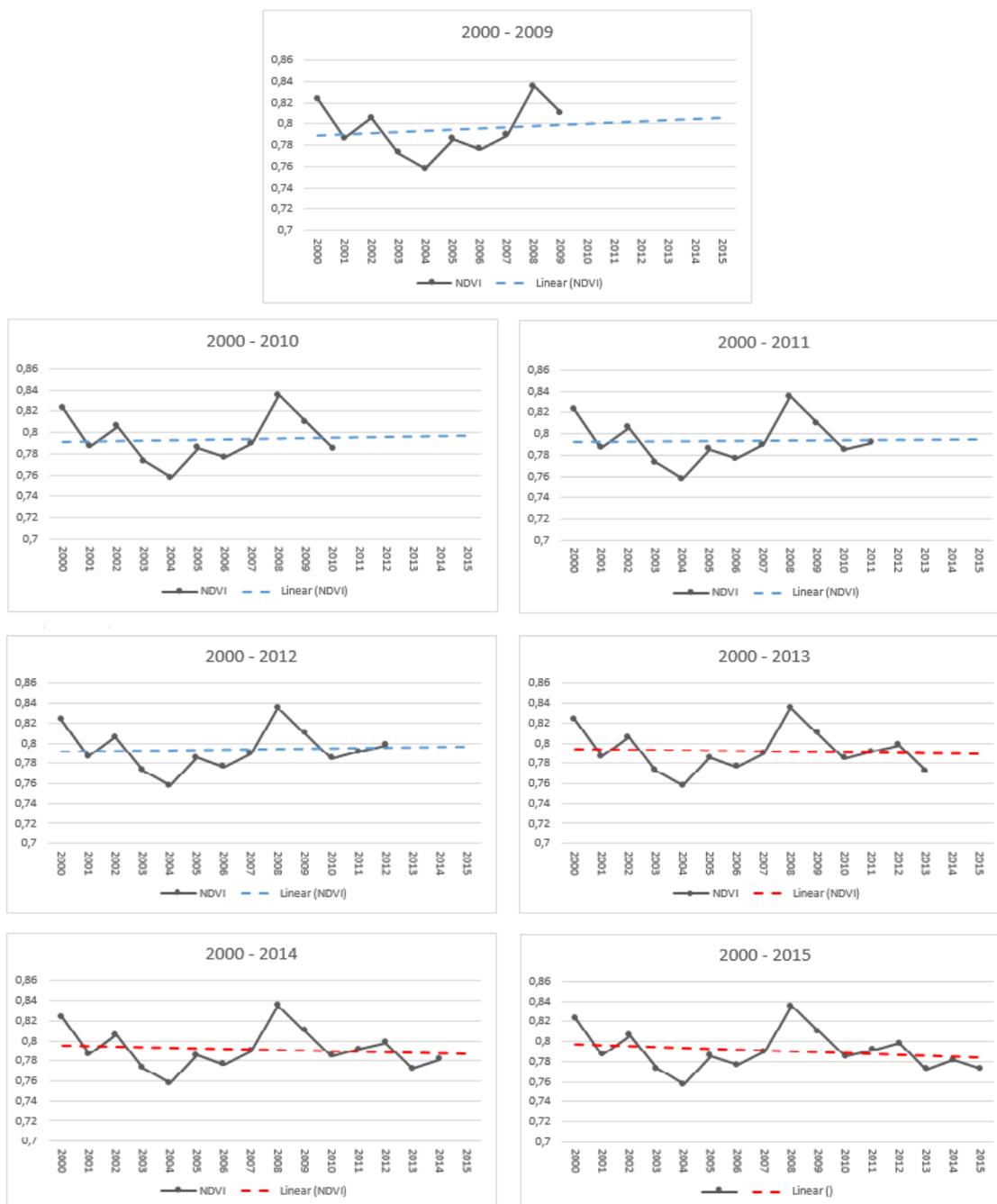


Figura 3.7 Exemplo de cálculo de persistência para um pixel classificado como persistência 3 positiva.

A série histórica de dados de NDVI utilizada neste estudo contempla o intervalo de 2000 a 2015. Os primeiros 10 anos foram escolhidos para formar o período de referência (2000-2009). Os dados dos demais anos servirão de incremento para avaliação da persistência. Dessa forma, o valor da persistência dos píxeis (x,y) variará de -6 a 6.

Na Figura 3.7, o píxel é classificado com persistência 3 positiva. Nesse exemplo, o primeiro gráfico mostra a regressão linear do período definido como inicial. Nos demais gráficos, ano a ano, seus respectivos valores são inseridos na série, e a tendência

recalculada. No exemplo, até 2012 a tendência da reta de regressão linear permanece positiva, apresentando a mesma tendência do período inicial. Quando introduzido o dado de 2013, a tendência passa a ser negativa, identificando-se, nesta mudança o momento onde há mudança na tendência.

Na aplicação descrita neste trabalho, a probabilidade de persistência foi avaliada em toda a área de estudo, isto é, todos os píxeis que representam a bacia hidrográfica em questão. O mapa cumulativo da persistência é um conjunto de tempos que a tendência inicial permanece ao longo da série temporal para cada píxel da amostragem espacial.

Para entender se existem diferenças na persistência de tendências crescentes e decrescentes, enfoca-se na probabilidade de persistência de flutuações negativas e positivas separadamente. Seja $N(t)$ o número de tendências com o mesmo sinal. Estatisticamente, a probabilidade de uma tendência ainda manter o mesmo sinal no tempo t é definida por

$$q(t) = \frac{N(t)}{N(t_i)} \quad (3.9)$$

onde:

$N(t)$ é o número de valores com persistência com mesmo sinal em determinado tempo t , ou seja, a quantidade de píxeis que não tiveram sua tendência positiva ou negativa alterada até o tempo t ;

$N(t_i)$ é o número de píxeis com determinado sinal do período de referência.

Desta forma, em cada tempo t calcula-se a probabilidade dos píxeis manterem seus sinais de tendência. O ajuste da curva de probabilidade de persistência a uma equação exponencial simples (Equação 3.10) proporciona a obtenção de parâmetro característico importantes para a análise de persistência e que se alinha a um parâmetro de resiliência na forma.

$$e^{-\frac{t}{\Gamma}} \quad (3.10)$$

Nessa função, o fator Γ é um parâmetro característico que representa o tempo médio de vida. Para o caso da probabilidade de persistência, o tempo médio de vida (Γ) representa o tempo que determinada tendência mantém o seu sinal (positivo ou negativo)

igual ao do período inicial, em média. Quanto maior o valor de Γ , maior a persistência da tendência, em média.

Para avaliar o ajuste da função exponencial aos dados de probabilidade de persistência, é calculado o coeficiente de determinação (R^2), determinado pela expressão

$$R^2 = \frac{\sum_t (\widehat{N}_t - \overline{N}_t)^2}{\sum_t (N_t - \overline{N}_t)^2} \quad (3.11)$$

onde:

N_t é o número de píxeis que mantêm a tendência no tempo t ;

\overline{N}_t é a quantidade média de píxeis com determinada tendência e \widehat{N}_t são os valores estimados de N_t pelo ajuste.

Os seus valores variam de 0 a 1, indicando o quanto o modelo corresponde aos dados existentes; quanto maior o valor de R^2 , melhor o ajuste do modelo.

Segundo LANFREDI *et al.* (2004), análise feitas em áreas suscetíveis a incêndios mostram que, na ausência de forçantes sistemática climática e/ou antrópica significativas, a vida útil média poderia ser responsável pelos tempos de recuperação de choque da vegetação local em condições saudáveis.

SIMONIELLO *et al.* (2008) salienta que, nessa metodologia, não é aplicado qualquer limite baseado na confiança estatística da tendência. Essa escolha foi feita porque o objetivo não é detectar mudança, mas estudar comportamentos coletivos da atividade da vegetação. Procura-se avaliar se as flutuações interanuais tendem a se integrar construtivamente (índice de persistência positivo) ou destrutivamente (índice de persistência negativo). No contexto de modelos climáticos e hidrológicos, a correlação espacial da resiliência da vegetação é uma propriedade importante, assim como a correlação temporal.

Quando tendências de significância baixas são agregadas no espaço, sua correlação espacial indica um comportamento coletivo que não pode ser considerado aleatório de forma alguma (SIMONIELLO *et al.*, 2008).

O método descrito de análise de persistência foi realizado para a bacia em sua totalidade e igual análise foi realizada para diferentes usos do solo e classes de altitude em separado. Tais segmentações foram realizadas com auxílio dos mapas de uso e ocupação do solo (Figura 4.8) e mapa de relevo (Figura 4.2).

O método descrito de análise de persistência foi realizado para a bacia em sua totalidade, e similar análise foi realizada para diferentes usos do solo e classes de altitude em separado. Tais segmentações foram realizadas com auxílio dos mapas de uso e ocupação do solo (Figura 4.8) e mapa de relevo (Figura 4.2).

Uma das principais características e vantagens do método de análise de persistência exposto é sua simplicidade e facilidade de aplicação. A aplicação da metodologia descrita pressupõe algumas opções a serem tomadas no tipo de análise que impactarão no resultado final da persistência encontrada. Como anteriormente mencionado, o tempo de referência utilizado é um desses fatores. Neste trabalho, tendo em vista os dados disponíveis de 16 anos, optou-se por definir o período de referência como os 10 primeiros anos da série histórica. Tal escolha foi baseada no estudo de LANFREDI *et al.* (2004), que igualmente utilizou tal período para sua análise.

Como se deseja uma avaliação da série da tendência do NDVI de longo prazo, optou-se por uma análise que eliminasse as variações de sazonalidade da vegetação que ocorrem intra-anualmente. Dessa forma, como imagem representativa anual, optou-se por usar uma composição de valores máximos.

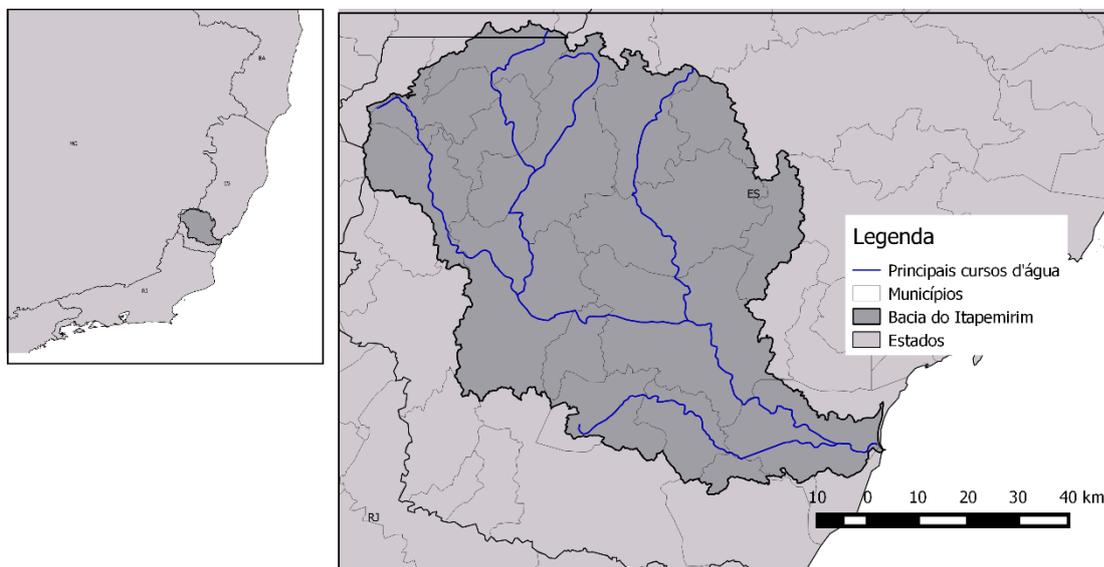
Para as análises quanto ao uso do solo, utilizou-se, como base, o mapa realizado para os anos entre 2012 e 2015. Assumiu-se tal mapa como representativo do período de estudo.

CAPÍTULO 4 BACIA DO RIO ITAPEMIRIM - ES

A bacia hidrográfica do rio Itapemirim está localizada no sul do estado do Espírito Santo entre os meridianos 40°48' W e 41°52' W e entre os paralelos 20°10' S e 21°15' S. Drena as águas de uma área de aproximadamente 5.920 km². Abrange, no total, dezenove municípios, sendo dez municípios totalmente inseridos na bacia, a saber: Alegre, Atílio Vivácqua, Cachoeiro de Itapemirim, Castelo, Conceição do Castelo, Ibitirama, Jerônimo Monteiro, Marataízes, Muniz Freire e Venda Nova do Imigrante. Os outros nove municípios são parcialmente incorporados, conforme discriminados a seguir: Ibatiba, Iúna, Irupí, Muqui, Itapemirim, Marataízes, Presidente Kennedy, Vargem Alta e Laginha, sendo este último no estado de Minas Gerais.

A região é caracterizada por relevo acidentado (IEMA, 2014) e clima tipo Cwa (Köppen), com inverno seco e verão chuvoso (GASPARINI, 2014).

O rio Itapemirim é formado pelo rio Castelo e pelos rios Braço Norte Direito e Braço Norte Esquerdo, cujas nascentes situam-se no Parque Nacional do Caparaó. Os principais afluentes do rio Itapemirim são os rios Castelo, Muqui do Norte, Braço Norte Direito e Braço Norte Esquerdo.



*Figura 4.1 Localização da bacia do Itapemirim e sua principal rede hidrográfica.
Fonte: dados ANA (2018).*

A bacia hidrográfica do Itapemirim tem topografia acidentada de forma geral, porém as altitudes das serras só se acentuam quando se aproximam do contorno da bacia, especialmente ao longo dos divisores de oeste, onde se situa a Serra do Caparaó. Nesta região, localiza-se o Pico da Bandeira, que possui cerca de 2.800 m, e o Pico do Norte, que é circundado por um conjunto de montanhas onde a altitude, frequentemente, ultrapassa a 1.000 m.

A variação topográfica em tão curto espaço físico, ou seja, na pequena distância entre o litoral e o Parque Nacional do Caparaó, aliada à grande diversidade climática e sobretudo à variabilidade de solos, confere à região uma situação ímpar no contexto do bioma mata Atlântica, seja nos diversos tipos de ecossistemas associados, nos ambientes extremamente frágeis do ponto de vista da exploração dos recursos naturais, seja também na diversificação de aptidão agrícola e outras atividades humanas voltadas ou não para o setor produtivo (SETLER, 2006).

Interessante observar que o rio Itapemirim não divide a bacia simetricamente. De um modo geral, o curso, na parte média, aproxima-se do contorno meridional, enquanto, na parte alta, do ocidental. Apesar de estreita, perto da foz, a bacia expande-se na parte central, chegando a ocupar praticamente toda a faixa latitudinal entre os paralelos 20° S e 21° S. Sendo uma unidade hidrográfica, relativamente pequena, a resposta das vazões às precipitações é rápida, de modo que o regime fluvial coincide com o pluvial. Os níveis máximos ocorrem em dezembro e janeiro, enquanto os mínimos em agosto e setembro.

Segundo (ANA, 2015), progressivo grande desmatamento ocorrido na bacia, ao longo do tempo, agravou os problemas das cheias, diminuindo os tempos de concentração e acentuando os níveis das enchentes. A exaustão dos recursos florestais que cobriam esta bacia é atribuída a três (3) formas de uso, que se sucederam através dos tempos: a monocultura da cana de açúcar, o cultivo do café e atividade agropastoril. Agravando o problema da degradação ambiental, constata-se que estas atividades rurais foram desenvolvidas sem prévio estudo das aptidões agrícolas dos solos. A situação facilita sobremaneira o carreamento de solo para os cursos de água, e que aliada aos rejeitos das indústrias de mármore e granito da região, causam assoreamento e grande turbidez das águas do Itapemirim nas épocas de chuvas.

No trecho montanhoso desta bacia hidrográfica, tem crescido a procura por atividades turísticas, alterando a rotina da população tradicional e interferindo nos recursos naturais remanescentes. Todavia, tanto a Mata Atlântica, em estágio médio e avançado de regeneração, quanto os ecossistemas associados (mangues e restingas), que

ainda revestem os solos da bacia, pertencem à reserva da biosfera da mata Atlântica, homologada pela Unesco, em 1992.

Este capítulo busca fazer uma caracterização fisiográfica e hidroclimatológica da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Essa caracterização foi feita através de pesquisa e compilação de diversos dados de origem observada *in situ* e de sensoriamento remoto.

A caracterização fisiográfica é composta pelos valores de altitude, declividade, índice topográfico e uso e ocupação do solo. Essas variáveis foram obtidas através de informações contidas no modelo digital do terreno fornecida pelo SRTM e por meio de dados fornecidos pela SEAMA (Secretaria Estadual de Meio Ambiente/ES). A altitude será um parâmetro posteriormente associado à análise de persistência proposta na metodologia. A declividade e o índice topográfico compõem a caracterização da bacia para melhor entendimento geral de sua dinâmica. O mapa de uso do solo é importante apoio na futura análise da vegetação por categoria.

A caracterização hidroclimatológica da bacia busca dar um panorama geral de seu comportamento e validar o NDVI como variável representativa dos parâmetros hidroclimatológicos. O referido índice de vegetação será o principal objeto de estudo da análise de persistência, com o objetivo de avaliar o comportamento da vegetação ao longo do tempo.

Por fim, há a caracterização da cultura cafeeira na bacia. A atividade constitui uma parcela representativa importante na economia da bacia do Itapemirim, sendo que a análise final da evolução de sua vegetação receberá destaque por sua importância na temática desta dissertação.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

A caracterização fisiográfica da bacia do rio Itapemirim compreende as informações espacializadas sobre relevo e declividade. Adicionalmente, no intuito enriquecer a exposição das características da bacia, é apresentado o mapa de índice topográfico, importante parâmetro representativo do comportamento hidrológico da bacia.

As características de uso e ocupação do solo também foram levantadas. Essas informações são importantes fatores de entrada para modelos hidrológico, pois associado a cada tipo de uso do solo tem-se um padrão de comportamento hidrológico particulares

4.1.1 RELEVO

A Figura 4.2 apresenta o mapa de relevo da bacia com a altitude em metros obtidas através do modelo digital do terreno na escala 1:30.000 disponibilizado pela NASA através *Earth Explorer* com dados do sensor SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A partir desse modelo, diversas informações foram produzidas com apoio de algoritmos do código computacional QGIS.

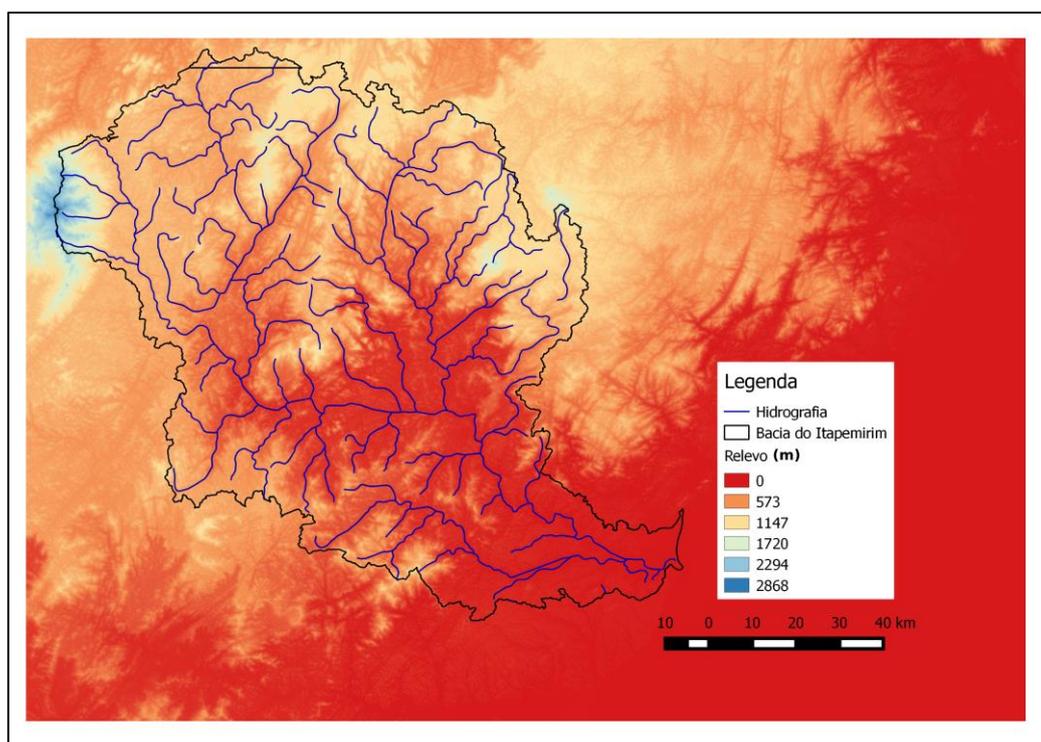


Figura 4.2 Mapa de relevo da bacia. Fonte: dados SRTM/NASA (2016)

A maior altitude encontrada na bacia é de 2868 metros, presente na região que compreende a Serra do Caparaó. Nessa serra encontra-se o Pico da Bandeira, o terceiro ponto mais alto do país. A bacia apresenta baixas altitudes do seu trecho médio para o final, no entanto, sua parte alta apresenta grandes altitudes inclusive dentro do contexto nacional.

A altitude média da bacia é de 567 metros, sendo o desvio padrão dos dados de 398 metros. Figura 4.3 apresenta o histograma dos dados de altitude da bacia.

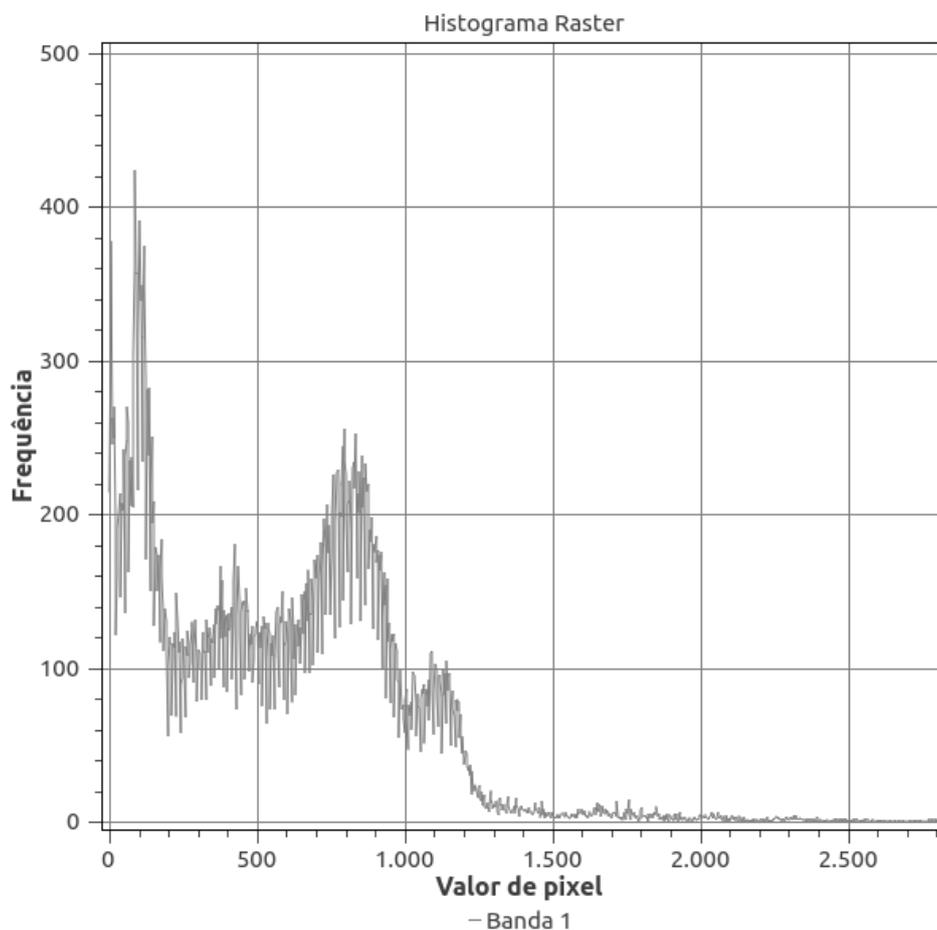


Figura 4.3 Histograma dos dados de altitude da bacia do Itapemirim. Fonte dados: SRTM/NASA (2019)

Considerável parte do terreno da bacia apresenta altitudes superiores a 800 metros de altitude. Como visto anteriormente, as grandes altitudes são características importantes para a cultura do café, que caracteriza a bacia do Itapemirim com grande vocação para esse tipo de cultivo.

Os valores de altitude obtidos serão aproveitados de forma a contribuir para a análise de persistência do NDVI utilizando esse parâmetro em classes divididas posteriormente.

4.1.2 DECLIVIDADE

Com base nos dados do SRTM e auxílio do *software* QGIS, foi calculado o mapa de declividade da bacia de acordo com as classes definidas pela EMBRAPA (1979). Na Figura 4.4 pode-se observar que a bacia possui declividades agudas em sua parte superior. Sua parte alta é uma região montanhosa e bastante ondulada.

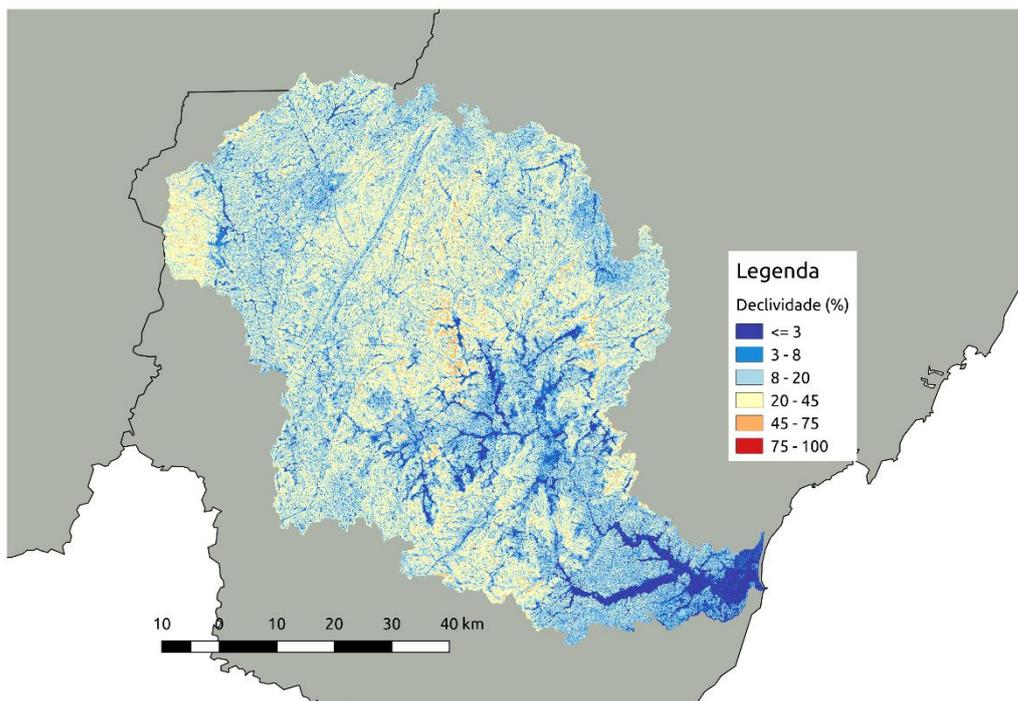


Figura 4.4 Mapa de declividade da bacia do Itapemirim segundo classes da EMBRAPA (1979). Fonte: dados SRTM/NASA (2016)

A declividade média da bacia é de 17%, sendo o valor máximo de 79% e o mínimo declividade 0. O desvio padrão é de 10%. A Figura 4.45 mostra o histograma de frequência dos dados de declividade da bacia.

Ao contrário da altitude, a declividade acentuada impõe dificuldade para as culturas, incluindo a de café, principalmente por dificultar a mecanização no momento da colheita, impactando negativamente na produtividade. Em geral, as plantações de café na bacia do Itapemirim são realizadas em encostas íngremes, contando principalmente com a colheita manual.

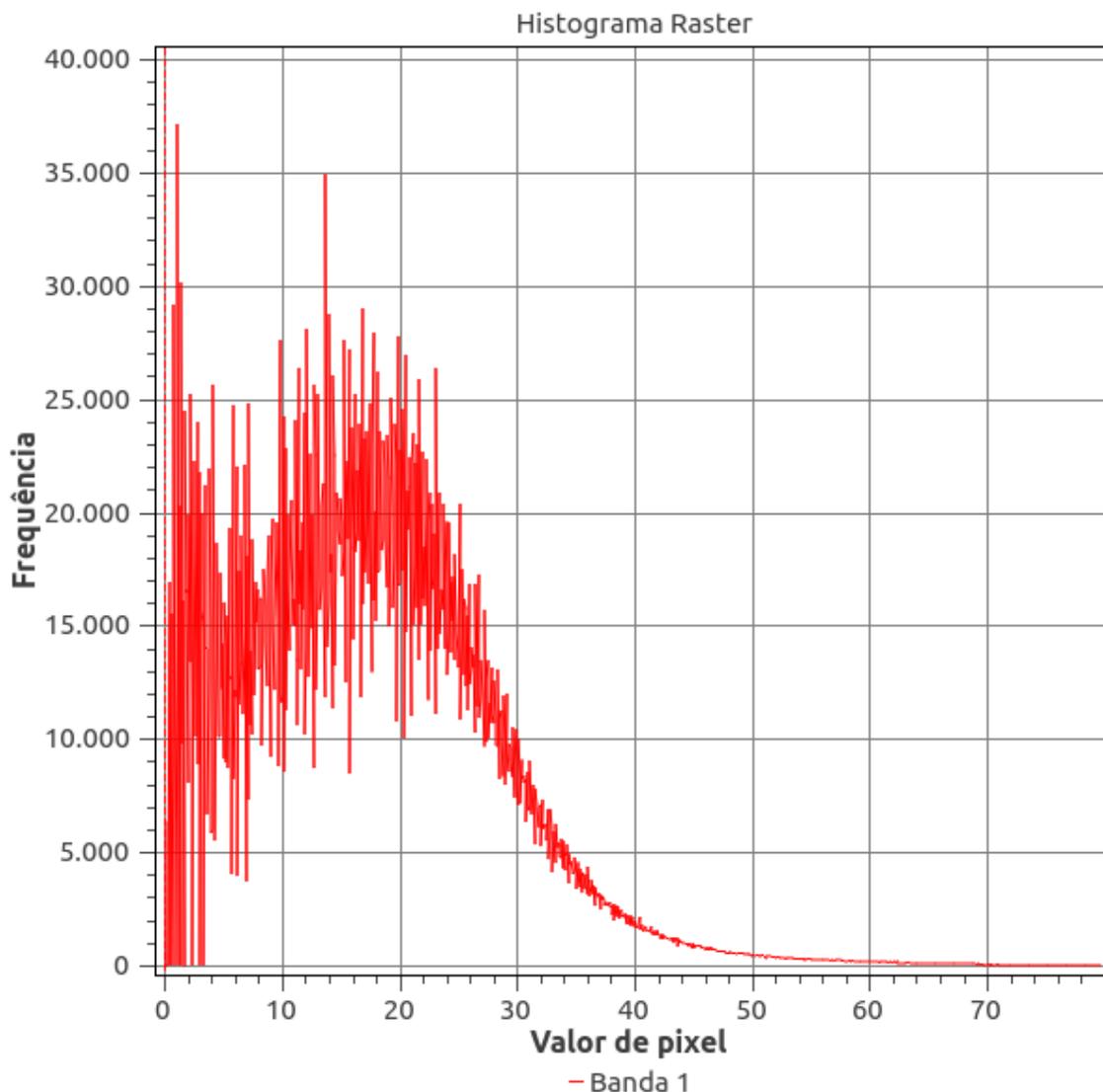


Figura 4.5 Histograma de distribuição dos dados de declividade da bacia do Itapemirim. Fonte: dados SRTM/NASA (2016)

A declividade é fator importante na dinâmica hidrológica da bacia, pois interfere diretamente no tempo de escoamento da precipitação. Desta forma a declividade é um dado de entrada importante para um índice hidrológico chamado índice topográfico (KIRKBY e BEVEN, 1978), que será abordado a seguir.

4.1.3 ÍNDICES TOPOGRÁFICOS

O índice topográfico é um parâmetro utilizado como critério de similaridade hidrológica onde são levados em consideração a declividade e a área de drenagem de um determinado ponto.

Os valores desse índice são conhecidos dados de entrada do modelo hidrológico Topmodel (BEVEN, 1979) e são representados pela expressão

$$\ln \frac{a_i}{tg\beta_i} \quad (4.1)$$

onde:

$tg \beta_i$: declividade média do terreno, calculada no ponto i

a_i : área de drenagem por unidade de contorno associada ao ponto i (m).

No modelo Topmodel, a bacia é representada através de uma função de distribuição do índice topográfico, composta por um número definido de sub-bacias homogêneas, correspondente ao número de classes de índice topográfico adotado.

No Topmodel, o parâmetro índice topográfico é utilizado para a discretização do modelo; após o cálculo desse parâmetro para cada unidade elementar considerada, os elementos são agrupados segundo seu índice topográfico. Em outras palavras, os elementos que possuem índices topográficos semelhantes são agrupados em uma mesma classe, que é considerada como unidade homogênea nos cálculos do modelo. Neste procedimento encontra-se implícito o conceito de similaridade hidrológica, segundo o qual diferentes regiões de uma bacia, ou diferentes bacias hidrográficas, podem ser consideradas hidrológicamente semelhantes segundo certo conjunto de características comuns (XAVIER, 2002).

O Topmodel fundamenta-se em duas premissas básicas: a dinâmica da zona saturada pode ser aproximada por uma série de “regimes estacionários” e o gradiente hidráulico da zona saturada pode ser aproximado pela inclinação da superfície do solo ($tg \beta_i$) num determinado local. Essas premissas conduzem a relação simples entre o armazenamento de água na bacia e os níveis locais do lençol freático, no qual o principal fator é o índice topográfico (XAVIER, 2002).

A Figura 4.6 apresenta os índices topográficos calculados para a bacia do rio Itapemirim. O índice foi obtido através do modelo digital de elevação SRTM e calculado usando o *software* ARCGIS, com as ferramentas da extensão *spatial analyst*, seguindo método descrito por G4G (2016).

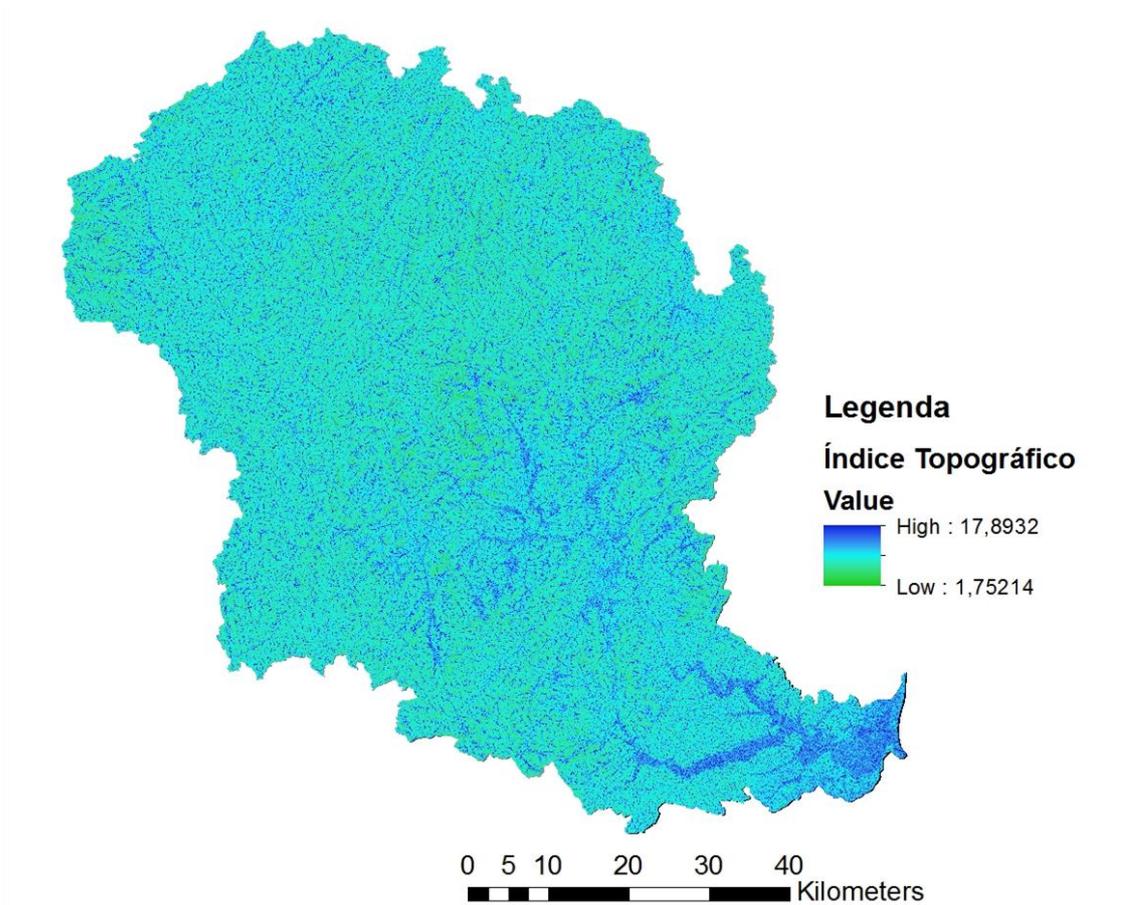


Figura 4.6 Índice topográfico. Dados: SRTM/NASA (2016)

Uma comparação dos valores de índices topográficos calculados com a hidrografia da bacia torna possível observar que os valores mais altos do índice se encontram nas regiões coincidentes com a rede hidrográfica. Esse é um resultado consistente, pois as áreas próximas a rede hidrográfica são áreas mais baixas, com menores declividades.

A Figura 4.7 apresenta a distribuição dos valores de índice topográfico da bacia.

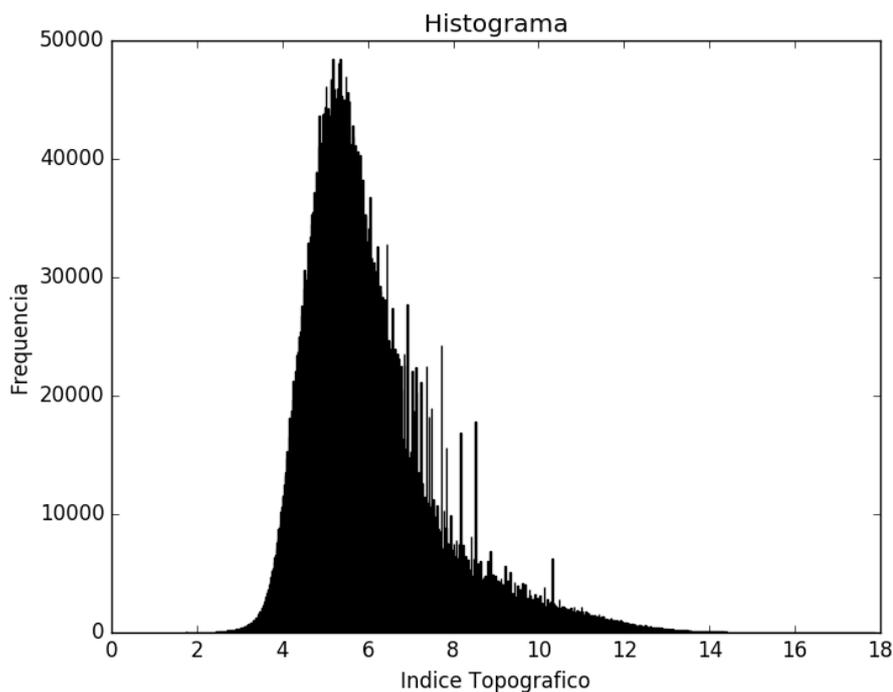


Figura 4.7 : Histograma dos valores de índice topográfico na bacia do rio Itapemirim

4.1.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

As características de uso e ocupação do solo são importantes fatores tanto no entendimento da dinâmica hidroclimatológica da bacia como econômica. As informações sobre esses tipos de uso para a bacia do rio Itapemirim serão um importante apoio à análise da evolução da vegetação, possibilitando que as informações sejam separadas por tipo de vegetação.

A bacia do rio Itapemirim apresenta três (3) categorias de uso do solo, que, juntas, representam 75% da ocupação do solo da bacia. Elas são: pastagem (44%), mata nativa (17%) e cultura de café (14%). Os demais usos estão distribuídos entre outros tipos de cultura, afloramentos rochosos e solos expostos, espelho de água e área urbana.

A Figura 4.8 mostra o mapa de uso e ocupação do solo da bacia para o ano de 2015. O mapa é bastante detalhado, apresentando 24 classes de uso do solo, tendo sido desenvolvido pelo IEMA, órgão ambiental estadual do Espírito Santo através de ortofotos, modelo digital de elevação e mapeamentos de campo.

A bacia do Itapemirim é uma área com grandes extensões de cobertura vegetal e pequenas áreas urbanas, representando menos de 1% da área da bacia. A maior parte de sua área é ocupada por pastagem, com pecuária de leite e, mais recentemente, com pecuária de corte. Juntamente com a cultura do café, estas atividades constituem a base de sua economia. A grande ocupação das áreas por essas atividades mostra a importância de estudos relacionados, relevantes para minimizar os impactos ambientais e sociais que essa atividade pode proporcionar.

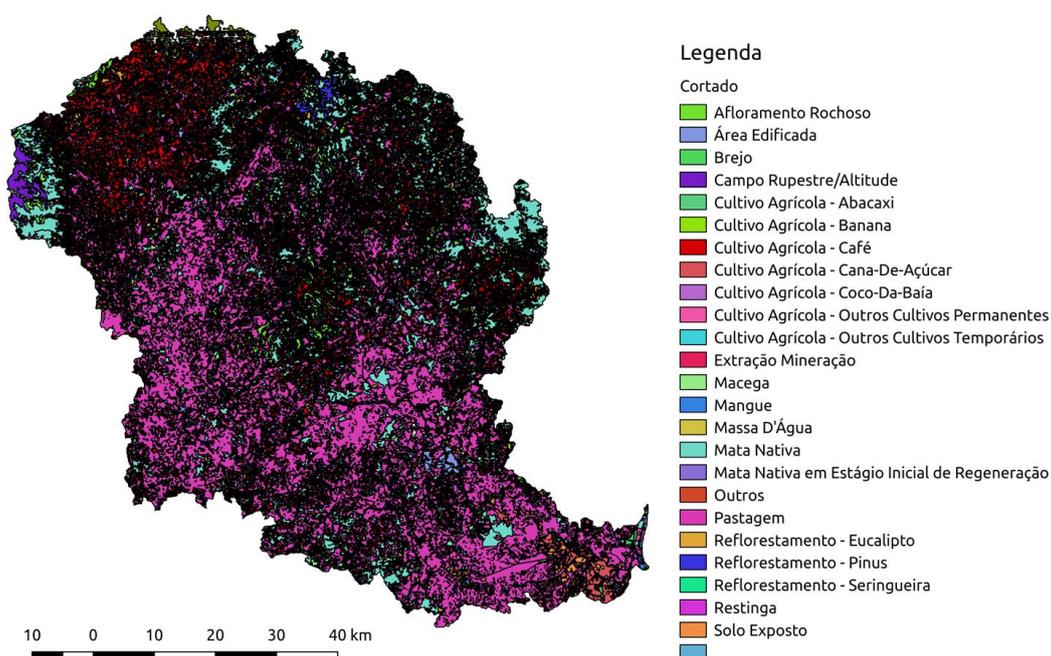


Figura 4.8 : Mapa de uso e ocupação do solo 2012-2015. Fonte: dados IEMA (2015)

A mata nativa é predominantemente constituída pela mata Atlântica, e de acordo com ALMEIDA (2017), apenas 8,3% da cobertura vegetal original da mata Atlântica permanece na bacia.

Na Tabela 4.1, algumas classes de uso do solo foram agrupadas para simplificar a caracterização da área. Os cultivos agrícolas foram colocados em uma única categoria, com exceção do cultivo de café. Também foram agregados solo exposto e rochas e áreas de reflorestamento, com separação do eucalipto. A Figura 4.9 mostra um gráfico com a distribuição percentual da área de cobertura de cada classe.

Tabela 4.1 Classes de uso do solo simplificadas, área de ocupação e percentual da área total

Uso do solo	Área (Km ²)	Percentual da área total (%)
Mata nativa	982	17,2
Mata nativa em estágio inicial de regeneração	298	5,2
Solo exposto e afloramento rochoso	324	5,7
Macega	278	4,9
Reflorestamento - eucalipto	239	4,2
Reflorestamento – outros	24	0,4
Cultivo agrícola – café	798	14,0
Outros cultivos agrícolas	162	2,8
Pastagem	2.491	43,7
Massa de água	28	0,5
Área edificada	41	0,7
Outros	181	3,2

Distribuição do uso do solo na Bacia do Itapemirim

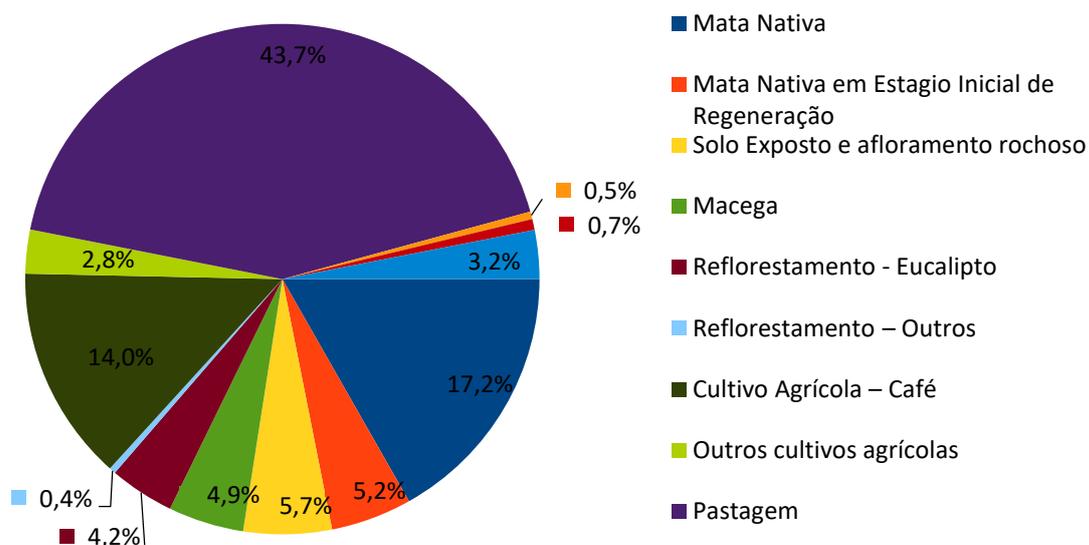


Figura 4.9 Distribuição percentual da área de ocupação dos usos do solo da bacia do Itapemirim

Na bacia hidrográfica do Itapemirim, a totalidade das áreas hoje ocupadas por pastagens, era ocupada, no passado, pelo bioma mata Atlântica e por seus ecossistemas associados. A introdução da pastagem é, portanto, oriunda da remoção da vegetação nativa, embora uma parte tenha substituído as lavouras de café em momentos distintos no histórico de ocupação dos solos da região (ESPÍRITO SANTO, 1999).

No histórico da ocupação da região, observa-se um ritmo acelerado na exploração dos recursos naturais, bem como alteração e/ou substituição de ecossistemas. Os modelos produtivos utilizados, desde então, vêm levando a região a uma crescente degradação dos referidos recursos naturais, refletindo-se na baixa capacidade produtiva dos solos, associada a outros danos ambientais também de significativa importância (SATLER, 2006).

4.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMATOLÓGICA

As variáveis hidroclimatológicas exploradas neste tópico envolvem a pluviosidade, vazão, evapotranspiração, umidade do solo e NDVI. Esse último é um

importante índice, reconhecido na literatura por representar a vitalidade e densidade da vegetação, relacionando-se com variáveis hidroclimatológicas, como mencionado previamente.

A pluviosidade e a vazão são, inicialmente, as duas variáveis abordadas. Em particular, a medição da chuva conta com dados observados *in situ* e dados adquiridos via sensoriamento remoto. Em seguida, inserem-se as demais variáveis obtidas por sensoriamento remoto (NDVI, evapotranspiração e umidade do solo), que, junto aos dados observados, caracterizarão, de forma geral, a bacia hidrográfica. Foram empregadas séries históricas anuais e mensais na análise.

4.2.1 PLUVIOSIDADE

Os dados de pluviosidade para a bacia do Itapemirim foram obtidos através de dados observados, fornecidos pela ANA e dados de sensoriamento remoto dos sensores TRMM e CHIRPS com características descritas no 2.2.1 deste trabalho.

Os dados observados foram obtidos por pluviômetros instalados na bacia. A Figura 4.10 mostra a bacia do rio Itapemirim com a localização dos postos pluviométricos utilizados nesse trabalho.

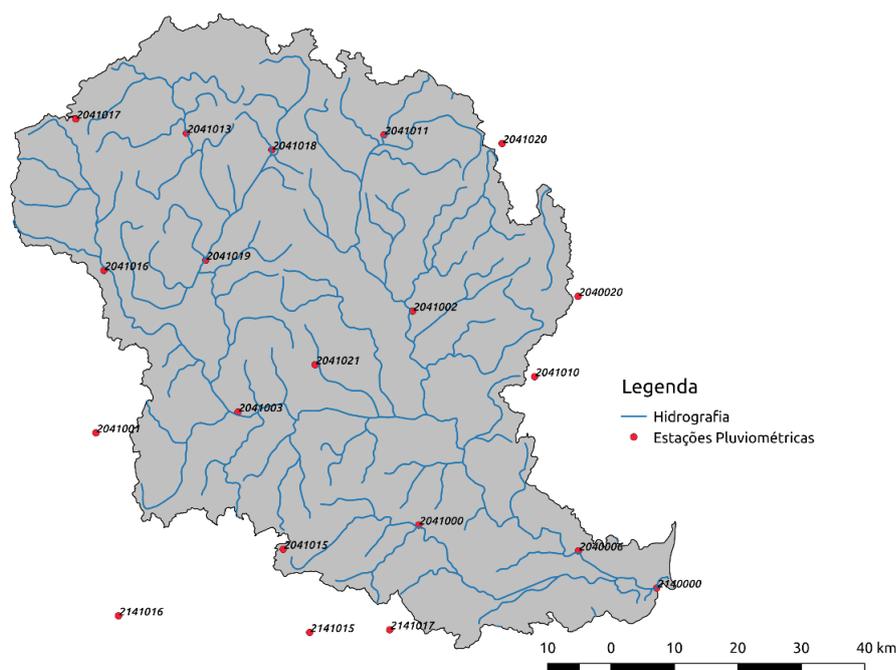


Figura 4.10 Estações pluviométricas utilizadas. Fonte: dados ANA (2018)

Foram selecionados pluviômetros com mais de 30 anos de operação e descartados os postos com falhas recorrentes. Os postos selecionados, suas localizações, altitudes e período de dados disponíveis estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Estação pluviométricas utilizadas

Código	Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Início da série
2141015	MIMOSO DO SUL (DNOS)	-21,0647	-41,3625	67	1953-07-01
2141017	SÃO JOSÉ DAS TORRES	-21,0625	-41,2411	120	1947-08-01
2141016	SÃO JOSÉ DO CALÇADO	-21,0367	-41,6522	150	1952-09-01
2140000	BARRA DO ITAPEMIRIM (DNOS)	-21,0075	-40,8353	4	1947-06-01
2040006	USINA PAINEIRAS	-20,9528	-40,9533	40	1947-07-01
2041015	FAZENDA MONTE ALEGRE	-20,9447	-41,4008	450	1952-01-01
2041000	ATÍLIO VIVACQUA	-20,9128	-41,195	76	1935-08-01
2041001	GUAÇUÍ	-20,7736	-41,6817	576	1937-08-01
2041003	RIVE	-20,7469	-41,4661	127	1939-10-01
2041010	JACIGUA (DNOS)	-20,7019	-41,0164	580	1947-07-01
2041021	BURARAMA	-20,6806	-41,3483	180	1964-02-01
2041002	CASTELO	-20,6056	-41,1997	107	1939-10-01
2040020	VILA NOVA MARAVILHA	-20,5875	-40,9492	980	1964-05-01
2041016	IBITIRAMA	-20,5406	-41,6656	794	1954-02-01
2041019	ITAICI	-20,5283	-41,5114	380	1961-07-01
2041018	USINA FORTALEZA	-20,3714	-41,4089	580	1956-03-01
2041020	ARACE (DNOS)	-20,3667	-41,0611	1075	1962-01-01
2041011	CONCEIÇÃO DO CASTELO (DNOS)	-20,3522	-41,2394	600	1948-03-01
2041013	IUNA	-20,3458	-41,5375	615	1948-03-01
2041017	SANTA CRUZ - CAPARÃO	-20,3228	-41,7042	920	1956-03-01

A Figura 4.11 mostrada a média mensal de cada posto de observação de onde os dados pluviométricos foram obtidos. Há uma tendência de maior pluviosidade nas regiões mais altas da bacia. A estação de Vila Nova Maravilha (2040020) é a que apresenta maior pluviosidade anual. Embora essa estação esteja localizada fora da bacia, segundo método de Thissen, ela influencia parte de sua área. A menor pluviosidade anual encontra-se na

estação com menor altitude, Barra do Itapemirim (2140000), a apenas 4 metros do nível do mar.

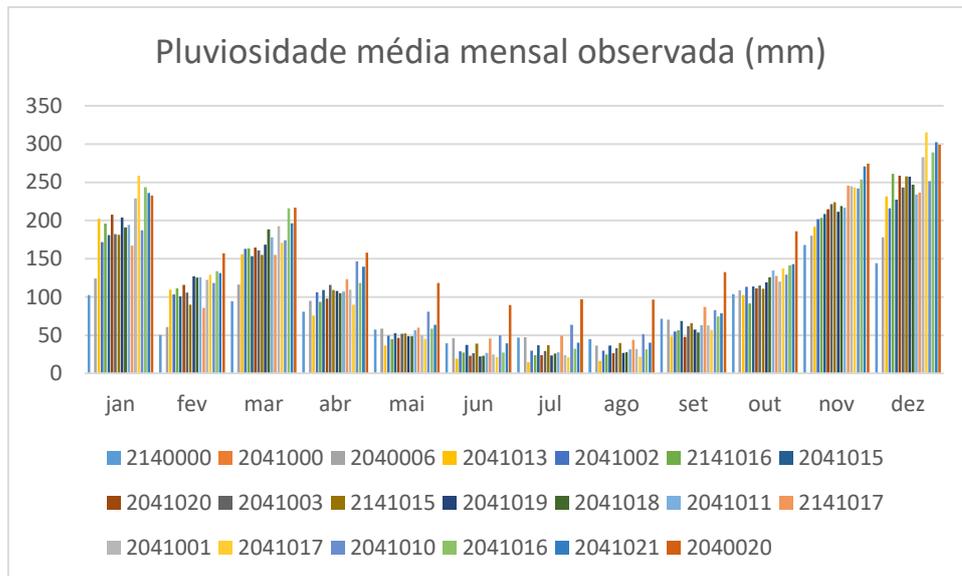


Figura 4.11 Média mensal dos postos pluviométricos localizados na bacia do rio Itapemirim

A partir dos dados de precipitação foi construído com apoio do *software* de geoprocessamento QGIS, o mapa de isoietas representado na Figura 4.12. Os dados utilizados foram médias anuais para a série histórica de 1969 a 2016. Para construção do mapa foi criada imagem matricial (*raster*) com dados interpolados das estações pluviométricas e depois feito o contorno dos valores do mapa de 50 mm em 50 mm

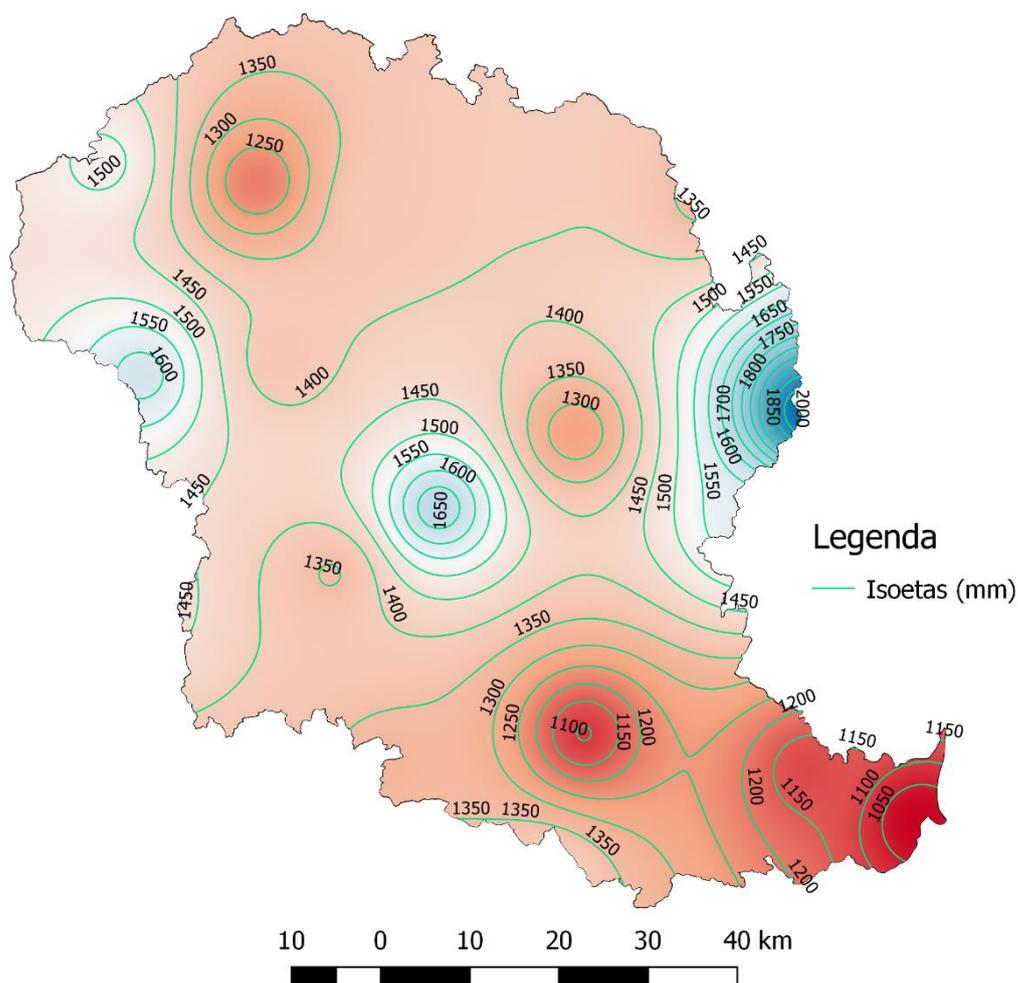


Figura 4.12 Mapa de isoietas a partir de dados pluviométricos médios anuais de estações da ANA de 1969 a 2016.

Observando o mapa de distribuição das chuvas é possível aferir maiores índices pluviométricos nas bordas da bacia e concentrada em determinado ponto em seu interior. Esses pontos são também áreas com maiores altitudes da bacia, mostrando uma relação entre essas duas características da bacia. O coeficiente de correlação de Pearson entre altitude e pluviosidade das estações estudadas é de 0,57, mostrando que há correlação, com tendência de maiores índices em áreas mais altas. A Figura 4.13 mostra o gráfico de dispersão dos dados de pluviosidade média anual para cada posto de medição e suas respectivas altitudes. A altitude, parâmetro abordado na caracterização fisiográfica da

bacia, será posteriormente utilizado para a segmentação da análise da vegetação, incorporando os resultados que atendem ao objetivo final desta dissertação.

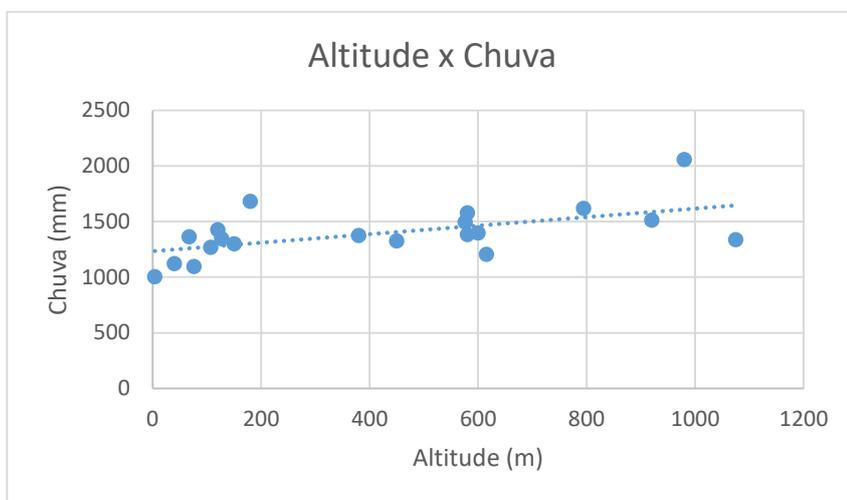


Figura 4.13 Dispersão dos dados de altitude e média anual de chuva para os postos pluviométricos

Para fim de comparação da distribuição espacial da chuva, a Figura 4.14 mostra os valores acumulados das estações pluviométricas no período de 1969 a 2016. A estação de Vila Nova Maravilha (2040020) destaca-se novamente por receber os maiores níveis de precipitação em toda a série, descolando-se das demais estações.

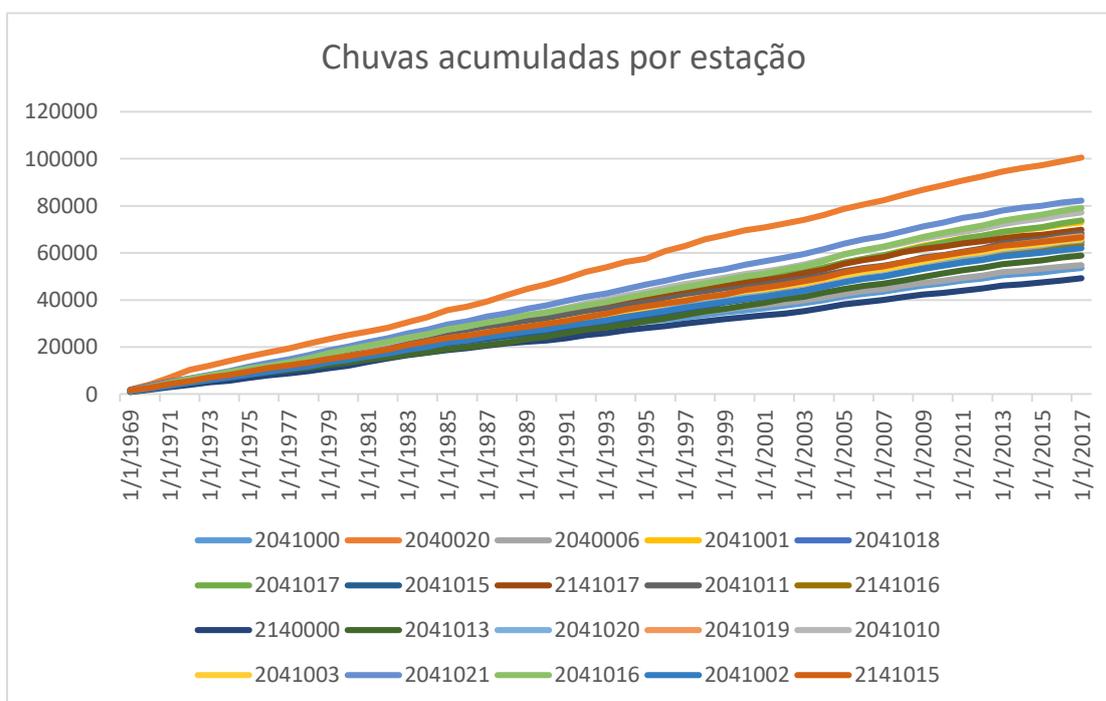


Figura 4.14 Valores de chuvas observados acumulados das estações pluviométricas na bacia do Itapemirim (1969 – 2017)

Figura 4.15, mostra a série histórica dos dados de precipitação observados médios para a bacia do Itapemirim obtida através dos dados das estações pluviométricas presentes na bacia e ponderação da média usando os polígonos de Thiessen e dados obtidos através de sensoriamento remoto (TRMM e CHIRPS). O acompanhamento da série histórica anual mostra que há excelente aderência entre os dados observados e de sensoriamento remoto. Nos picos da série, os dados de sensoriamento remoto são suavizados. Em geral, as medidas por sensoriamento remoto mostram-se menos sensíveis em eventos extremos, mas se mostram boas ferramentas para escalas de tempo grandes e cobertura de grandes áreas. Uma vez que os dados de sensoriamento remoto representam uma área (área do pixel) em contraponto ao pluviômetro que exerce uma medição local.

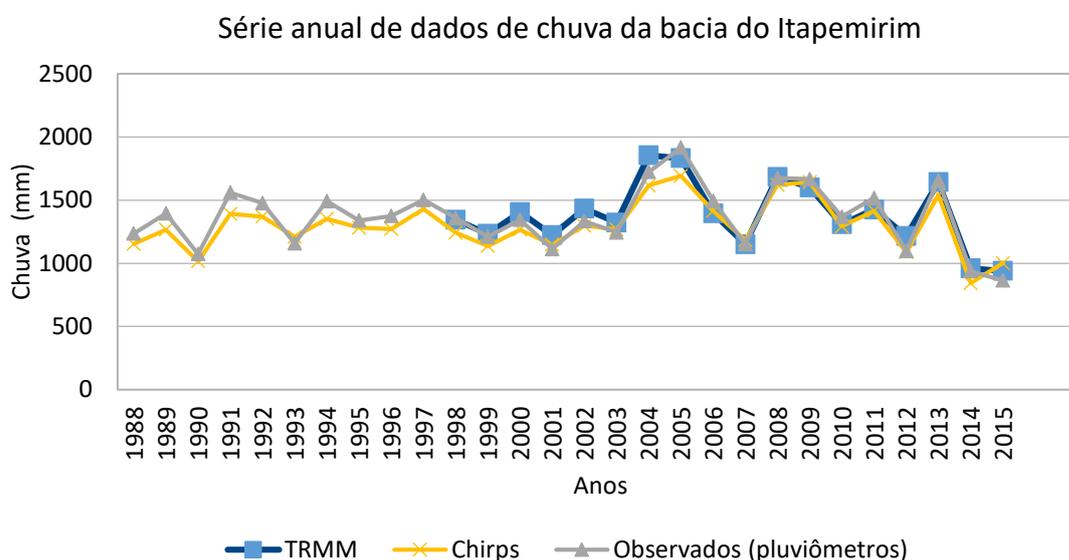


Figura 4.15 Pluviosidade anual observada média para a bacia do Itapemirim obtida pelo através dos dados dos postos e ponderação pelo método de Thiessen e dados de sensoriamento remoto. Fonte: dados ANA (2018) e NASA (2016)

É possível observar na série histórica apresentada que os anos de 2004 e 2005 foram os mais úmidos, enquanto os anos de 2014 e 2015 apresentaram-se como anos secos, com pluviosidade inferior a 1000 mm.

A média de pluviosidade anual para a bacia medida pelo TRMM é de 1.388 mm, já para o CHIRPS a média acumulada mensal de pluviosidade é de 1308 mm enquanto, para os dados observados, é de 1368 mm.

A Figura 4.16 mostra os valores médios mensais anuais de pluviosidade para os dois sensores e para os dados observados. A Figura 4.17 mostra os dados acumulados.

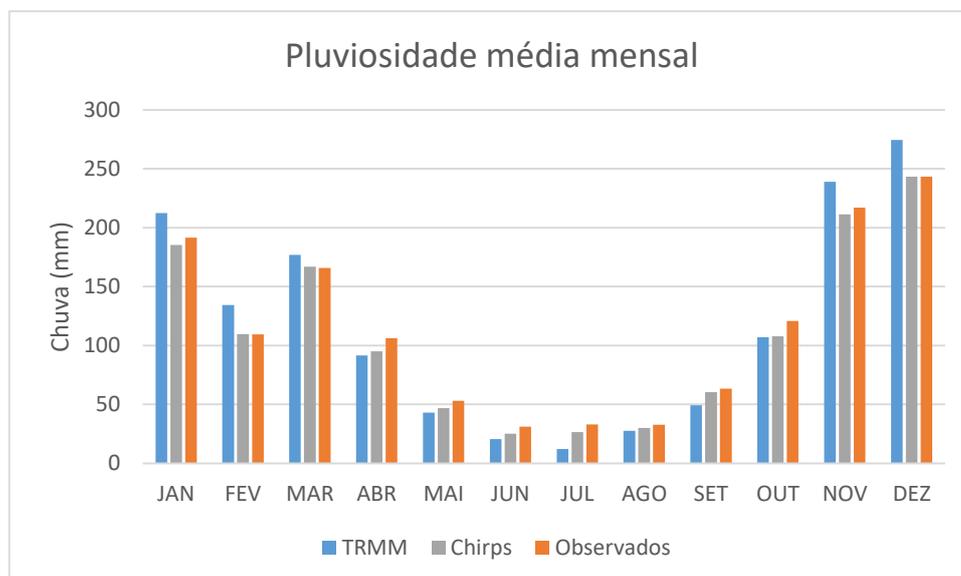


Figura 4.16 Comparação da pluviosidade média mensal medidas pelo TRMM, CHIRPS e dados observados (1981-2015).

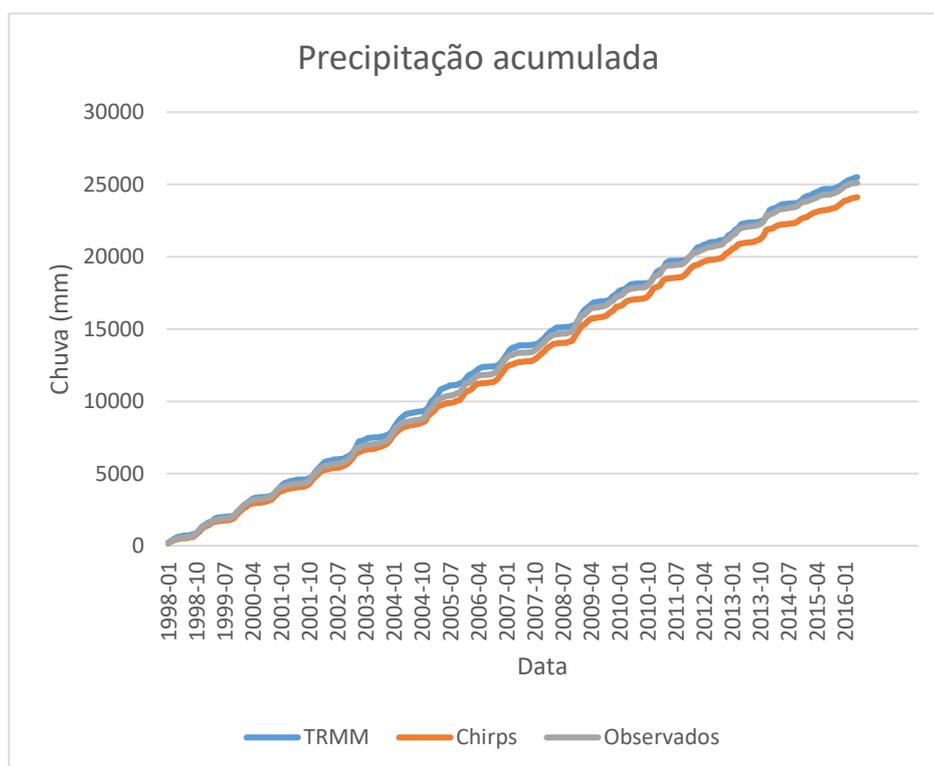


Figura 4.17 Precipitação acumulada média para a bacia obtida por dados do TRMM, CHIRPS e dados observados.

A Figura 4.18 apresenta os valores pluviométricos médios mensais para a bacia da série histórica de 1998 a 2016 do satélite TRMM, CHIRPS e dados observados por pluviômetros na bacia. É possível observar que os dados do TRMM superestimam as chuvas nos picos, enquanto normalmente o CHIRPS subestima. Já nos vales, o efeito inverso acontece. As séries possuem boa aderência.

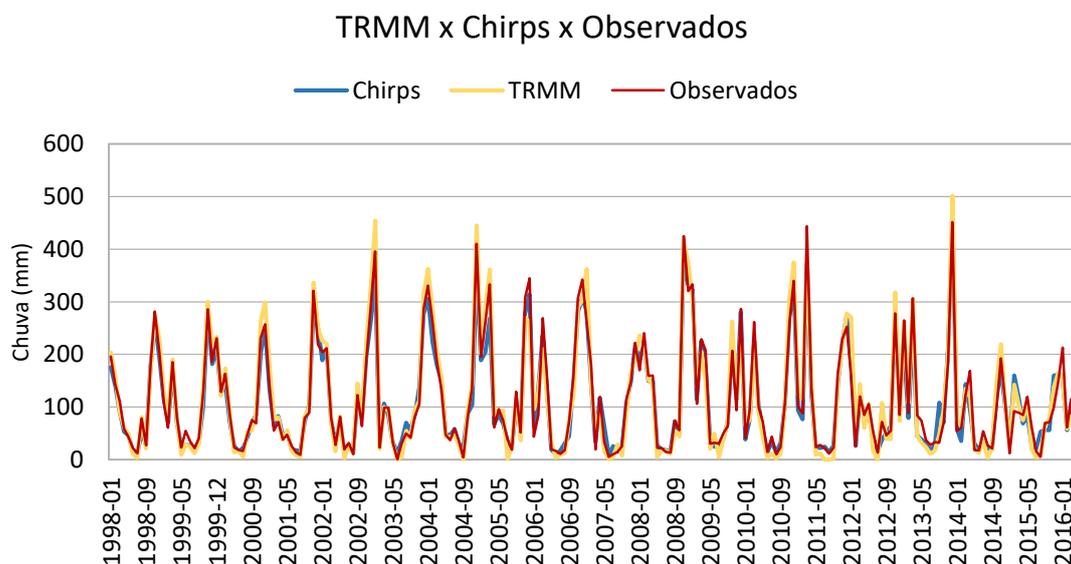


Figura 4.18 Pluviosidade mensal média para a bacia do TRMM, CHIRPS e dados observados

A fim de mostrar a eficiência dos dados obtidos por sensoriamento remoto para a bacia, uma análise de desempenho dos dados de satélite foi realizada utilizando alguns parâmetros estatísticos recomendados pelo *International Precipitation Working Group* (IPWG), comparando as séries medidas por satélite e as medidas observadas pelos postos pluviométricos.

As estatísticas quantitativas de chuva usadas para essa análise foram os parâmetros bias, erro médio e coeficiente de correlação de Pearson, A Tabela 4.3 mostra os valores desses parâmetros calculados para os dois sensores abordados em comparação aos dados observados.

Tabela 4.3 Parâmetros estatísticos para comparação dos valores de pluviosidade registrados por sensoriamento remoto e observados

	CHIRPS	TRMM
BIAS	0,95	1,01
EM	5,25	-1,13
r	0,98	0,97

Os valores muito próximos a 1 tanto do bias como do coeficiente de correlação, mostram excelente correlação entre os registros. O erro médio representa a diferença média entre os totais anuais de precipitação estimados a partir da manipulação das imagens de satélite e dos registros pluviométricos. O erro médio encontrado foi positivo para o CHIRPS (5,25 mm) e negativo para o TRMM (-1,13 mm). Esse fato mostra para ambos os sensores erros pequenos e constatação de que a precipitação estimada a partir das imagens de satélite pelo TRMM apresentou valores maiores que as precipitações registradas nos pluviômetros, enquanto as estimativas feitas pelo CHIRPS mostram uma pequena subestimação dos registros.

Os resultados das relações entre dados medidos e estimados por sensores embarcados em satélites artificiais é interessante para mostrar a eficiência de tais dados, servindo informações complementares e eficientes de baixo custo, alta recorrência e confiabilidade.

4.2.2 VAZÃO

As maiores vazões na bacia do rio Itapemirim costumam ocorrer em novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março e as mínimas em julho, agosto e setembro. O ano hidrológico da bacia inicia-se em setembro e tem final em agosto. A Figura 4.19 mostra os valores de média mensal para a série histórica da estação fluviométrica de Usina Paineiras (57580000), estação mais a jusante da bacia.

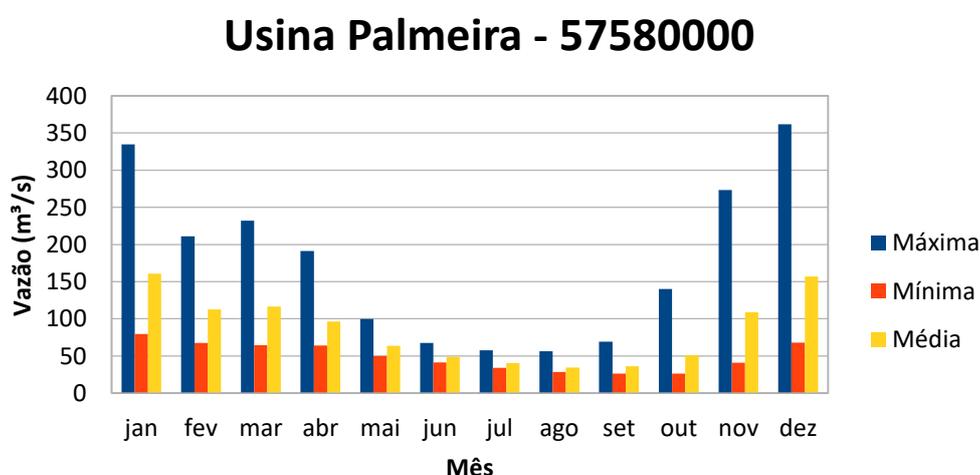


Figura 4.19 Médias mensais de vazões da estação Usina Paineiras (57580000) (1981-2015)

Estudo realizado por GASPARINI (2014) mostram que a bacia do Itapemirim é uma região hidrologicamente homogênea. Esse estudo foi realizado com dados de 11 estações fluviométricas da ANA que monitoram a vazão em pontos distribuídos pela bacia. A Tabela 4.4 lista as estações sob operação da ANA.

Tabela 4.4 Estações fluviométricas utilizadas na bacia do Itapemirim

Código	Nome	Rio	Período de dados
57350000	Usina Fortaleza	Rio Braço Norte Esquerdo	1969 – 2011
57360000	Iúna	Rio Pardo	1952 – 2011
57370000	Terra Corrida Montante	Rio Pardo	1968 – 2011
57400000	Itaici	Rio Braço Norte Esquerdo	1961 – 2011
57420000	Ibitirama	Rio Braço Norte Direito	1953 – 2011
57450000	Rive	Rio Itapemirim	1936 – 2011
57476500	Fazenda Laginha	Rio Castelo	1984 – 2011
57490000	Castelo	Rio Castelo	1937 – 2011
57550000	Usina São Miguel	Rio Castelo	1968 – 2011
57580000	Usina Paineiras	Rio Itapemirim	1968 – 2011
57650000	Fazenda Caxeta	Rio Muqui do Norte	1984 – 2011

A Figura 4.20 mostra a localização das estações fluviométricas listadas na Tabela 4.4 no mapa da bacia do Itapemirim.

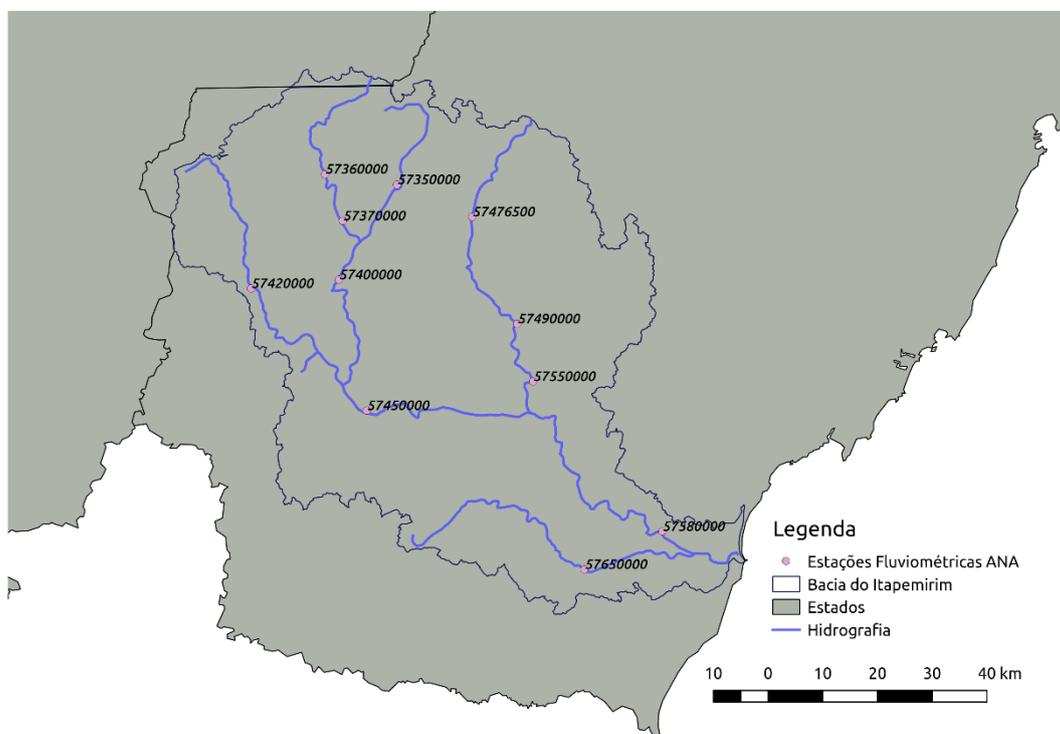


Figura 4.20 Localização das estações fluviométricas na bacia do rio Itapemirim

As variáveis físicas das estações fluviométricas são apresentadas na Tabela 4.5, onde Ad representa a área de drenagem, Lp, o comprimento do curso principal, Lt o comprimento total da hidrografia a montante e Dm a declividade média em porcentagem.

Tabela 4.5 Características fisiográficas das estações fluviométricas

Código	Nome	Ad (km ²)	Lp (km)	Lt (km)	Dm (%)
57490000	Castelo	975,4	31,9	2260,8	37,5
57650000	Fazenda Caxeta	480,8	62,4	1044,6	31,4
57476500	Fazenda Laginha	435,8	28	1000,7	36
57420000	Ibitirama	341,5	32,8	1012	35,2
57400000	Itaici	1045,4	25,9	2712,6	32
57360000	Iúna	432,3	36,5	1188,6	28,9
57450000	Rive	2218,4	46,5	5897,9	32,1
57370000	Terra Corrida Montante	586,5	13,9	10608	28,7
57350000	Usina Fortaleza	195,8	29,8	455,5	35,3
57580000	Usina Paineiras	5167,9	99,6	12745,5	31,9
57550000	Usina São Miguel	1458,8	18	3393,8	36,3

A estação mais a jusante, Usina Paineiras apresenta os maiores valores de todas as variáveis, exceto declividade, como esperado de locais a jusante da bacia. A Tabela 4.6 mostra as vazões características para as séries históricas das estações fluviométricas do Itapemirim.

Tabela 4.6 Vazões características das estações fluviométricas

Código	Nome	Q7,10	Q90	Qmld
57490000	Castelo	2,21	4,37	14,22
57650000	Fazenda Caxeta	0,25	1,65	8,31
57476500	Fazenda Laginha	1,01	2,16	7,03
57420000	Ibitirama	1,55	2,6	12,11
57400000	Itaici	3,65	6,47	18,45
57360000	Iúna	2,16	3,28	7,49
57450000	Rive	8,42	13,8	42,59
57370000	Terra Corrida Montante	2,94	4,3	10,28
57350000	Usina Fortaleza	0,79	1,47	4,75
57580000	Usina Paineiras	16,34	25,63	81,11
57550000	Usina São Miguel	4,97	7,91	22,91

4.2.3 MÉDIAS CLIMATOLÓGICAS

As informações de médias climatológicas apresentadas nesse tópico são os valores média mensais anuais para a série histórica dos dados de 2000 a 2015 para todas as variáveis, exceto umidade do solo obtida pelo SMOS, que apresenta série mais curta, de 2010 a 2015. Essas informações mostram um perfil da bacia, mostrando seu comportamento médio ao longo de ano. Desta forma, é possível caracterizar a bacia quanto aos seus ciclos intra-anuais.

As variáveis selecionadas para tal caracterização foram a pluviosidade, vazão (dados observados), evapotranspiração, umidade do solo e NDVI (dados de sensoriamento remoto). O NDVI é um importante e reconhecido índice consagrado na literatura por sua interação com as diversas variáveis hidroclimatológicas. Esse índice de vegetação é objeto da análise que compões o objetivo principal do presente estudo.

A Figura 4.21 mostra os parâmetros hidroclimatológicos da bacia para uma média mensal da série histórica tendo como base comparativa o NDVI.

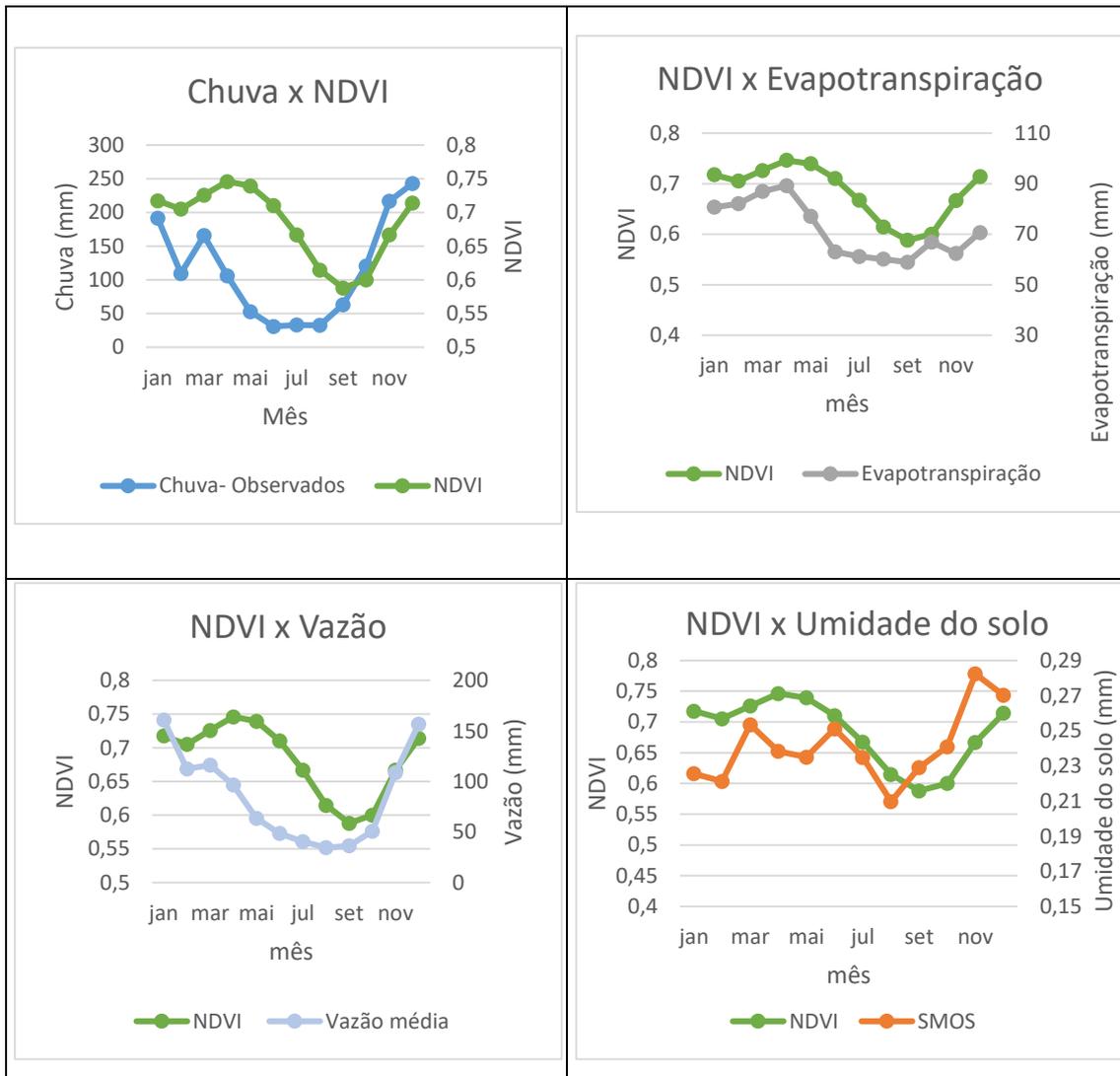


Figura 4.21 Médias climatológicas da bacia do rio Itapemirim - chuva, NDVI, evapotranspiração, vazão (2000- 2015) e umidade do solo (2010-2015)

É possível observar que a bacia apresenta um período bem definido de seca nos meses de inverno. O período chuvoso se apresenta entre outubro e abril.

Os dados de NDVI e Evapotranspiração da bacia foram obtidos através do sensor MODIS. O produto original de NDVI são composições de valores máximos de 16 dias. Para esta caracterização, foi realizada uma média mensal para a bacia para a série histórica, de 2000 a 2015.

É de se esperar que os valores de NDVI da bacia tenham uma aderência aos valores de pluviosidade dado que o vigor da vegetação está diretamente ligado a água disponível para as plantas. A caracterização média das séries históricas indica que há uma defasagem na resposta do NDVI a pluviosidade. Essa defasagem na resposta do NDVI à chuva é notada em diferentes estudos como PETERS e JI (2005), NICACIO *et al.* (2011),

GURLÉN *et al.* (2009), CHUAI *et al.* (2013). Essa diferença varia conforme tipo de vegetação e condições climáticas da região.

Os dados de evapotranspiração do sensor MODIS são obtidos através do método de Penman-Monteith e possuem boa correspondência a série de NDVI

Os dados de umidade do solo obtidos através do sensor SMOS, possuem períodos menos marcados que os demais dados hidroclimáticos. É notável o aumento da umidade no início do período chuvoso, onde igualmente há aumento do NDVI, sendo os demais períodos intra-anuais marcados por oscilações nas medidas de umidade do solo. É importante ressaltar que melhores resultados da aplicação do SMOS se dá em áreas áridas.

4.2.4 SÉRIES TEMPORAIS

Os valores de NDVI estão intimamente relacionadas à quantidade de água disponível para o crescimento das vegetações. Embora a resposta da vegetação não dependa unicamente da pluviosidade, pode-se encarar os índices de vegetação como pluviômetros, capazes de medir períodos secos e chuvosos, porém com uma defasagem na resposta. A Figura 4.22 apresenta os valores médios anuais da série histórica dos dados de NDVI, evapotranspiração, tendo a precipitação como parâmetro comparativo.

Na escala anual, o NDVI mostra-se com boa aderência aos dados de pluviosidade média da bacia. O coeficiente de correlação de Pearson é de 0,65.

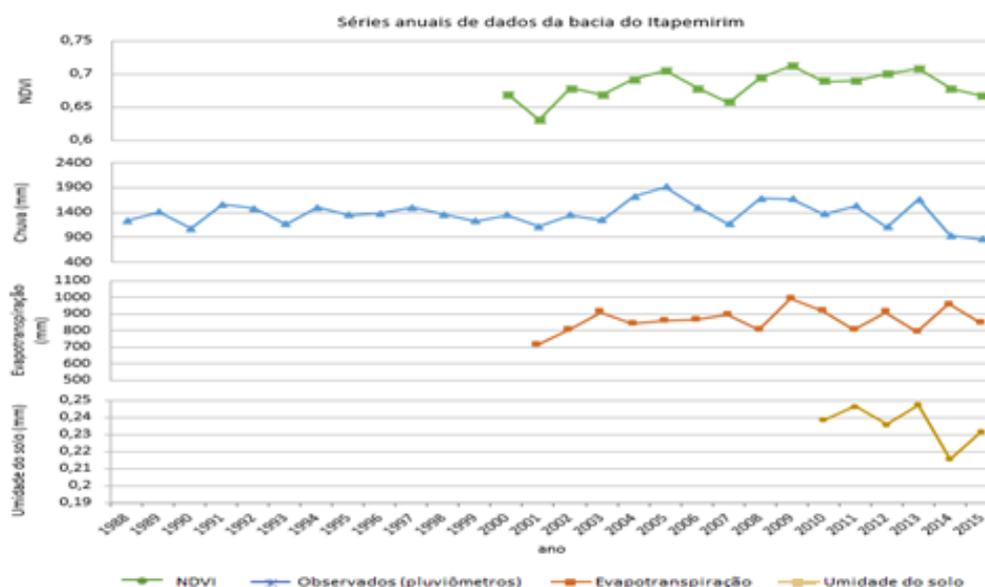


Figura 4.22 Série histórica de médias anuais dos dados de chuva (ANA), evapotranspiração (MODIS), NDVI (MODIS) e umidade do solo (SMOS)

Tabela 4.7 mostra os coeficientes de correlação de Pearson para as séries anuais das variáveis hidroclimatológicas. Na escala anual, a série de NDVI possui boa correlação direta com a pluviosidade, assim como com a evapotranspiração. A umidade do solo estimada pelo SMOS mostra maior correlação com a defasagem de um ano.

Tabela 4.7 Coeficiente de correlação de Pearson para séries anuais das variáveis hidroclimatológicas da bacia - correlações diretas e com defasagem

Correlação	Sem defasagem	Defasagem de um ano	Defasagem de dois anos
NDVI - Pluviosidade	0,65	0,16	-0,38
NDVI - Umidade do solo	0,38	0,51	-0,30
NDVI - Evapotranspiração	0,62	0,55	-0,05

Quando comparados na escala mensal, usando como ferramenta de comparação o coeficiente de correlação de Pearson, as variáveis hidroclimatológicas apresentam por vezes relação direta e/ou com deslocamentos na resposta. A Tabela 4.8 mostra os valores das correlações de Pearson para as séries com diferentes deslocamentos, onde os valores de correlação mais altas são destacados.

Tabela 4.8 Coeficiente de correlação de Pearson para séries mensais das variáveis hidroclimatológicas da bacia - correlações diretas e com defasagem

Correlação	sem defasagem	defasagem de um mês	defasagem de 2 meses	defasagem de 3 meses	defasagem de 4 meses
Pluviosidade - NDVI	0,32	0,58	0,53	0,48	0,39
Pluviosidade - Evapotranspiração	-0,05	0,42	0,36	0,34	0,26
NDVI - Evapotranspiração	0,50	0,36	0,18	0,04	-0,14
Pluviosidade - umidade do solo	0,66	0,09	-0,11	-0,04	0,00
NDVI - Umidade do solo	-0,25	0,31	0,13	0,05	-0,03
Evapotranspiração - umidade do solo	0,28	0,42	0,09	-0,08	0,00

O NDVI comporta-se como uma resposta aos valores de precipitação conforme esperado. Existe correspondência entre as duas séries, sendo os valores de NDVI levemente deslocados dos dados de chuva na escala mensal. A Figura 4.23 mostra a série mensal dessas duas variáveis.

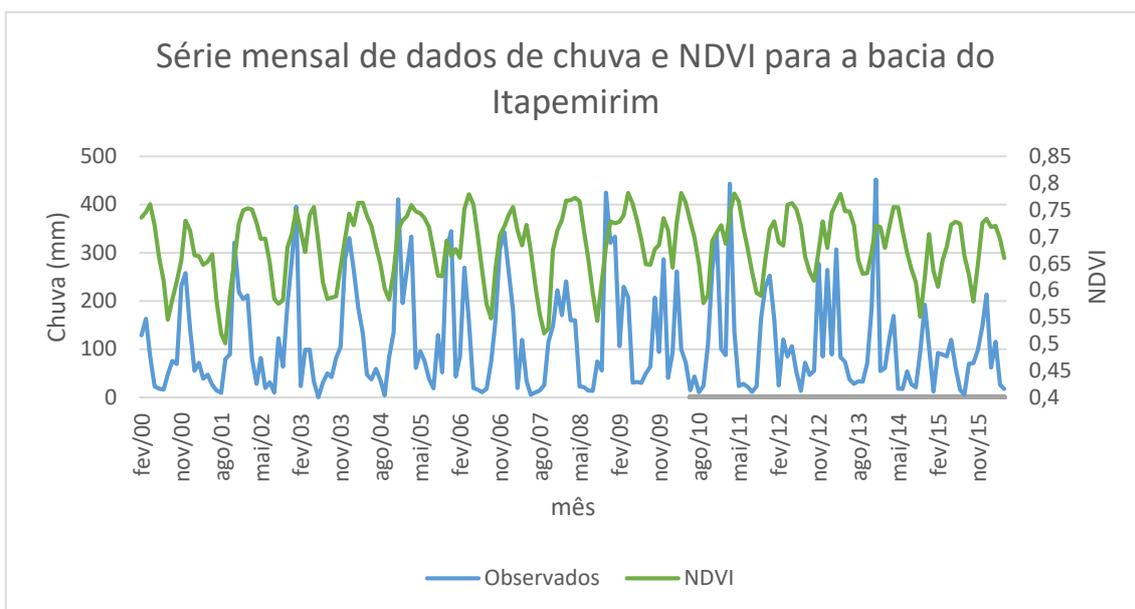


Figura 4.23 Comparação da série de dados médios mensais de NDVI (MODIS) e Pluviosidade (TRMM)

Na comparação entre as séries, é possível observar que há uma defasagem entre os picos de chuva e NDVI. Como a análise é feita na escala mensal, a comparação está suscetível a variações devido à concentração de maiores chuvas no início ou final do mês.

A Figura 4.24 mostra o gráfico de dispersão dos dados de NDVI e chuva para os mesmos meses e com deslocamento de 1 e 4 meses. É possível observar que os dados possuem boa correspondência.

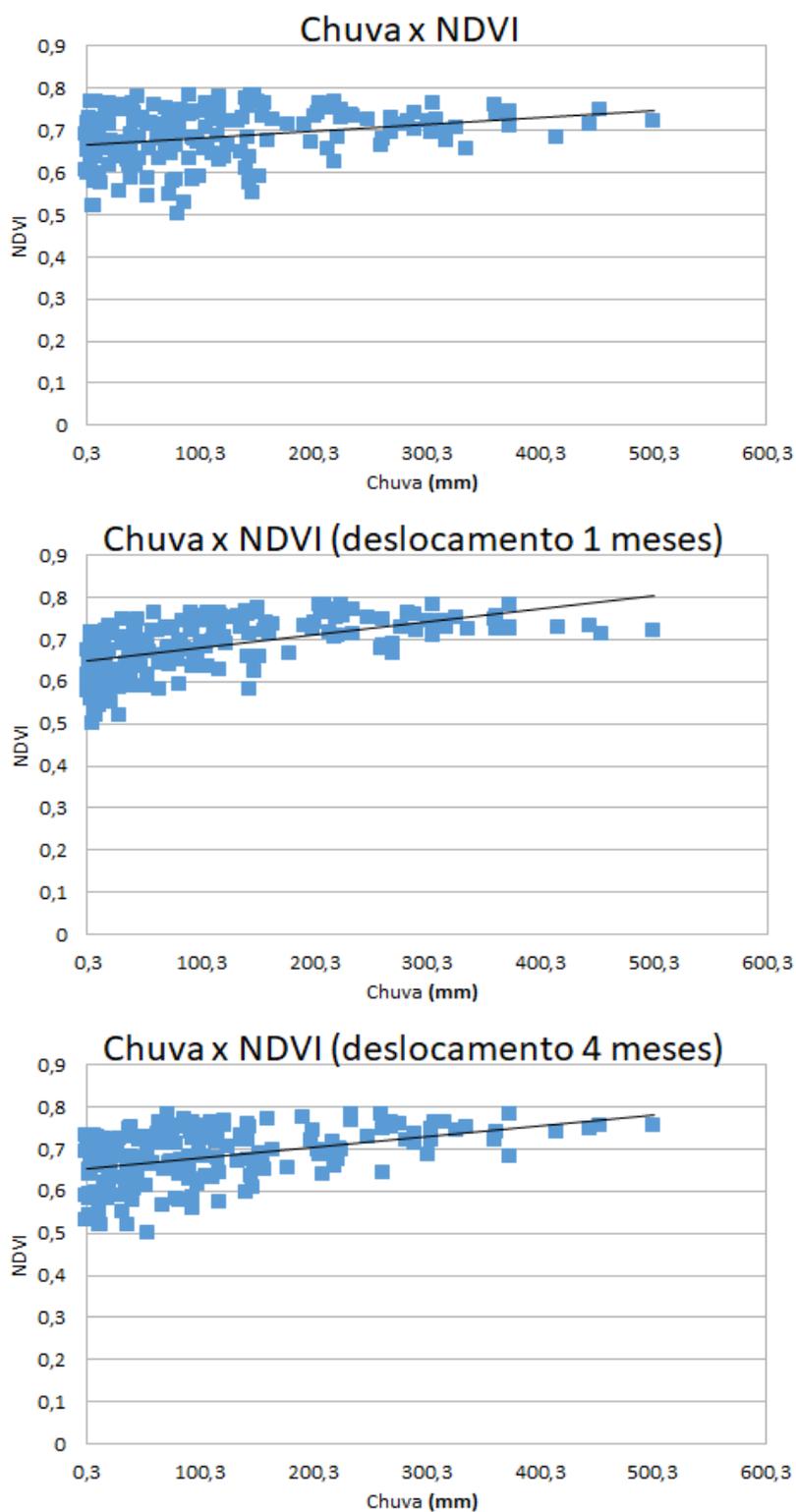


Figura 4.24 Dispersão dos dados de NDVI e Chuva sem deslocamento, deslocamento de 1 mês e deslocamento de 4 meses.

A influência da chuva nas atividades da vegetação pode ser identificada em diversos aspectos, ocasionando impactos com resposta rápida e lenta. Desta forma, uma alta correlação pode ser identificada com deslocamentos diferentes das séries.

A evapotranspiração e o NDVI têm uma boa aderência das séries sem deslocamentos dos picos. Esse resultado é esperado uma vez que ambos os fatores estão diretamente ligados à atividade da vegetação e sua fisiologia. Um valor de NDVI mais alto representa uma vegetação mais densa e com maior vitalidade o que irá resultar numa evapotranspiração mais elevada. Figura 4.25 mostra as séries mensais de NDVI médio e evapotranspiração média sobreposta.

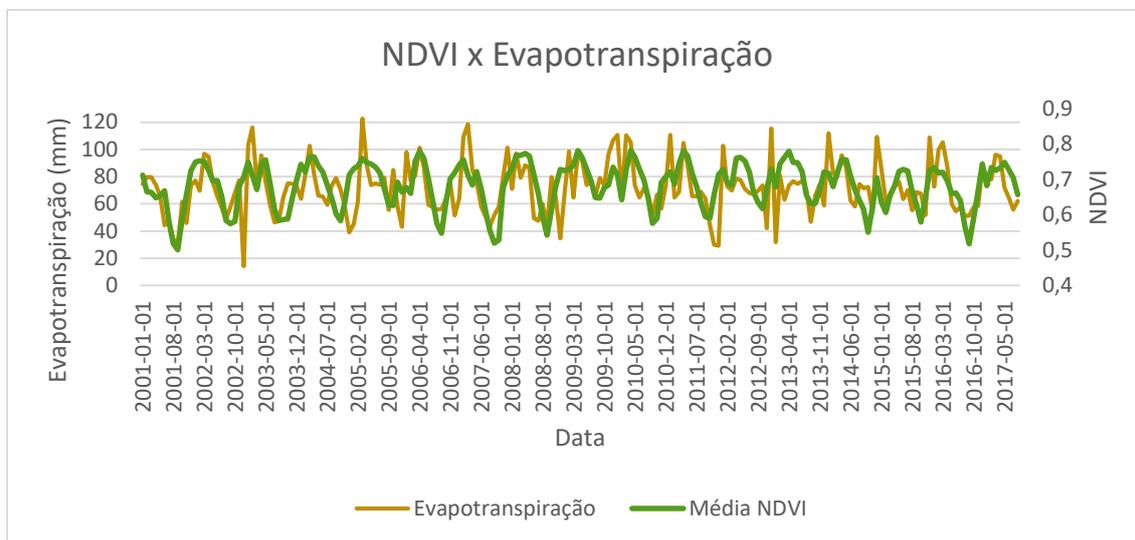


Figura 4.25 Séries mensais de NDVI e Evapotranspiração médios para a bacia

A Figura 4.26 mostra a dispersão dos dados de NDVI e evapotranspiração. A correlação desses dados sem deslocamento temporal é de 0,50.

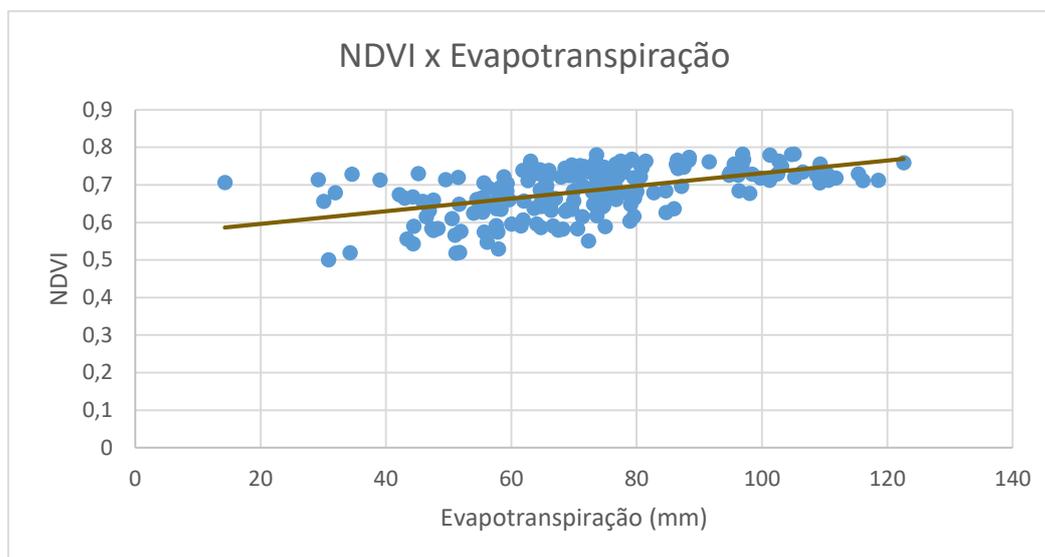


Figura 4.26 Dispersão dos dados de NDVI e evapotranspiração

A relação entre a precipitação e a evapotranspiração se assemelha a relação entre precipitação e NDVI. A Figura 4.27 apresenta a séries de dados mensais de chuva e evapotranspiração sobrepostos.

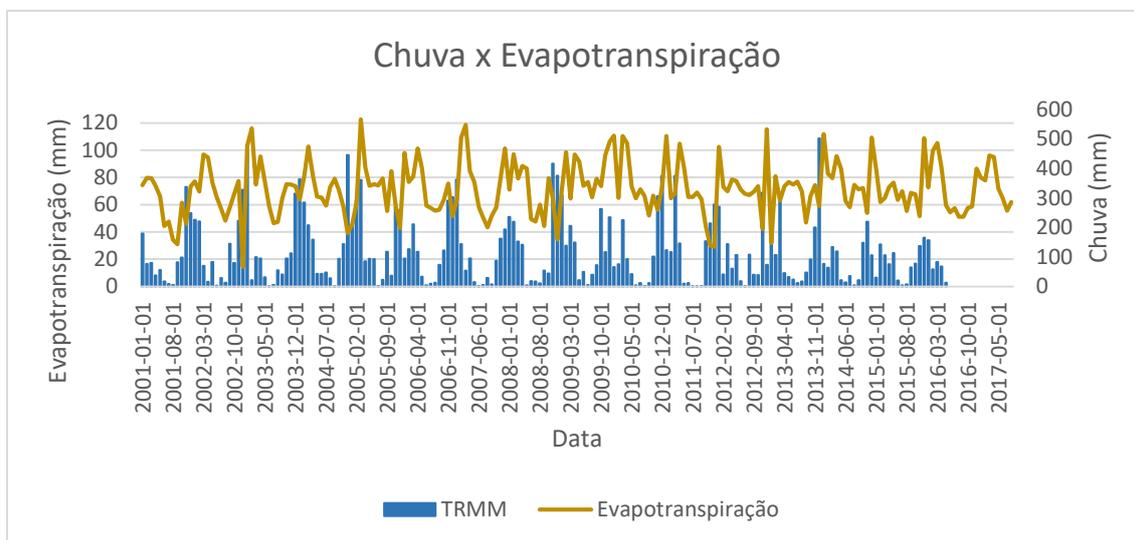


Figura 4.27 Séries de dados mensais de Chuva (TRMM) e evapotranspiração médios para a bacia

Também é esperado que a os valores de umidade do solo da bacia tenham correspondência com os valores de chuva. A Figura 4.28 apresenta uma comparação dos dados de umidade do solo médios mensais estimados pelo sensor SMOS e os dados de chuva observados.

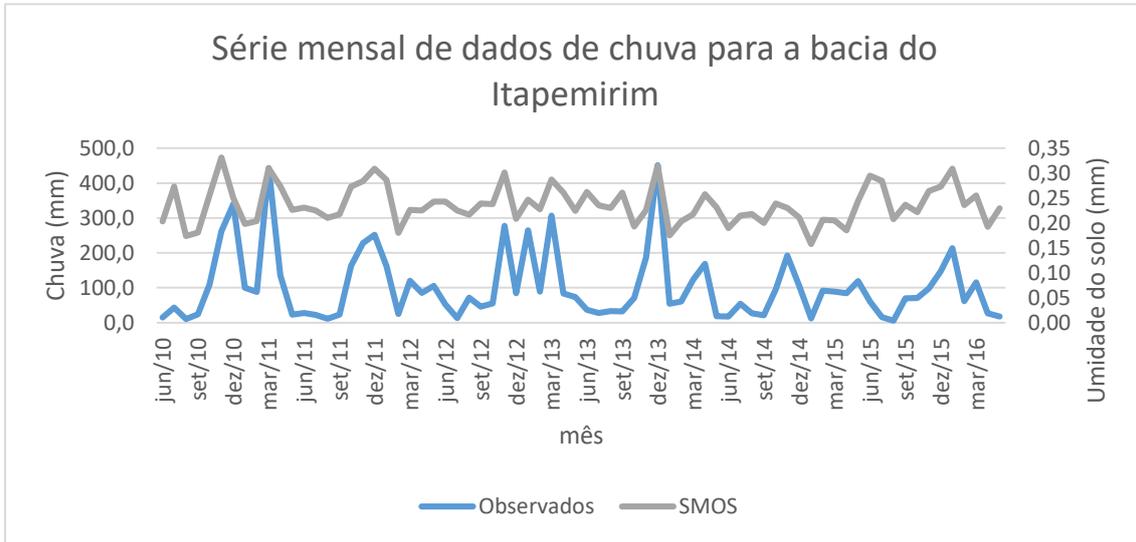


Figura 4.28 Séries mensais de pluviosidade (ANA) e umidade do solo (SMOS) para bacia do Itapemirim

A correlação dos dados é de 0,66. Os valores da umidade do solo respondem rapidamente a precipitação, no entanto, esse fator não é o único que interfere no valor da umidade. Há de se levar em consideração fatores como evapotranspiração, temperatura e cobertura do solo. A Figura 4.29 apresenta a dispersão dos dados.

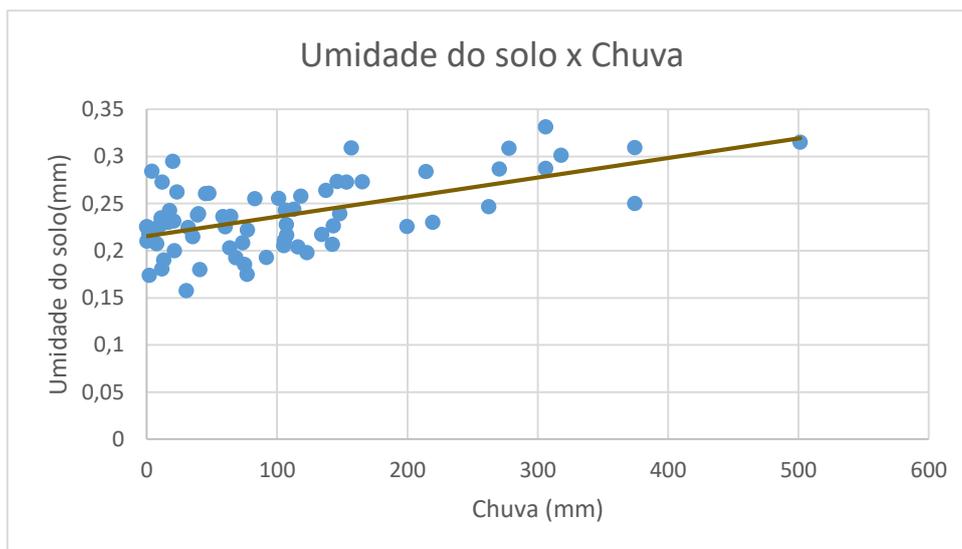


Figura 4.29 Dispersão dos dados de umidade do solo e chuva

4.3 CULTURA DO CAFÉ

A bacia do Itapemirim apresenta forte atividade econômica baseada no cultivo de café, principalmente da espécie arábica. A Figura 4.30 mostra as áreas com plantio de café a partir de mapeamentos realizados pelo IEMA nos anos de 2012 a 2015.

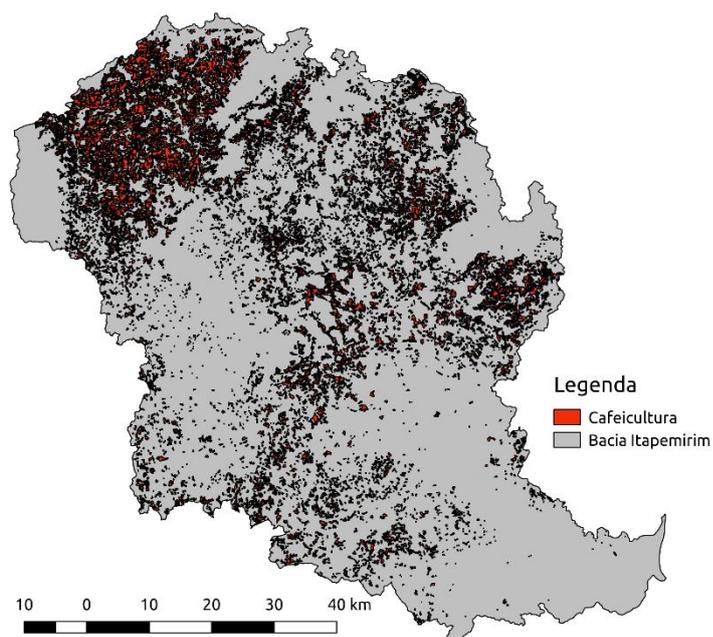


Figura 4.30 Áreas da cultura do café na bacia do Itapemirim

Os dados de área plantada e produção para diversos tipos de culturas perenes e não perenes são fornecidos pelo IBGE através da base SIDRA. Os dados usados nesse trabalho são da Produção Agrícola Municipal – PAM. A Tabela 4.9 mostra média dos dados mencionados por município e o cálculo da produtividade.

Tabela 4.9 Área colhida (ha), produção (ton) e produtividade (ton/ha) dos municípios integrantes da bacia do Itapemirim Fonte: dados IBGE (2017)

Código IBGE	Município	Área colhida (ha)	Produção (ton)	Produtividade (ton/ha)
3202454	Ibatiba	7799	11390	1,460
3205069	Venda Nova do Imigrante	3483	5058	1,452
3202652	Irupi	9310	12681	1,362
3203007	Iúna	15653	19778	1,264
3201704	Conceição do Castelo	4787	5965	1,246
3203106	Jerônimo Monteiro	2182	2707	1,241
3201407	Castelo	10631	12223	1,150
3202553	Ibitirama	7152	8073	1,129
3203700	Muniz Freire	11938	13428	1,125
3201209	Cachoeiro de Itapemirim	6075	6582	1,083
3205036	Vargem Alta	15454	16481	1,066
3200706	Atílio Vivacqua	2514	2590	1,030
3203809	Muqui	3506	3484	0,994
3200201	Alegre	7573	7473	0,987
3204302	Presidente Kennedy	505	453	0,897
3202801	Itapemirim	361	303	0,839

Os municípios que apresentam as maiores áreas de cultivo de café são Iúna, Vargem Alta, Muniz Freire e Castelo. Como é possível observar na Figura 4.31, os municípios com maior área dessa cultura encontram-se nas bordas da bacia, onde se encontram as montanhas e consequentes áreas mais altas.

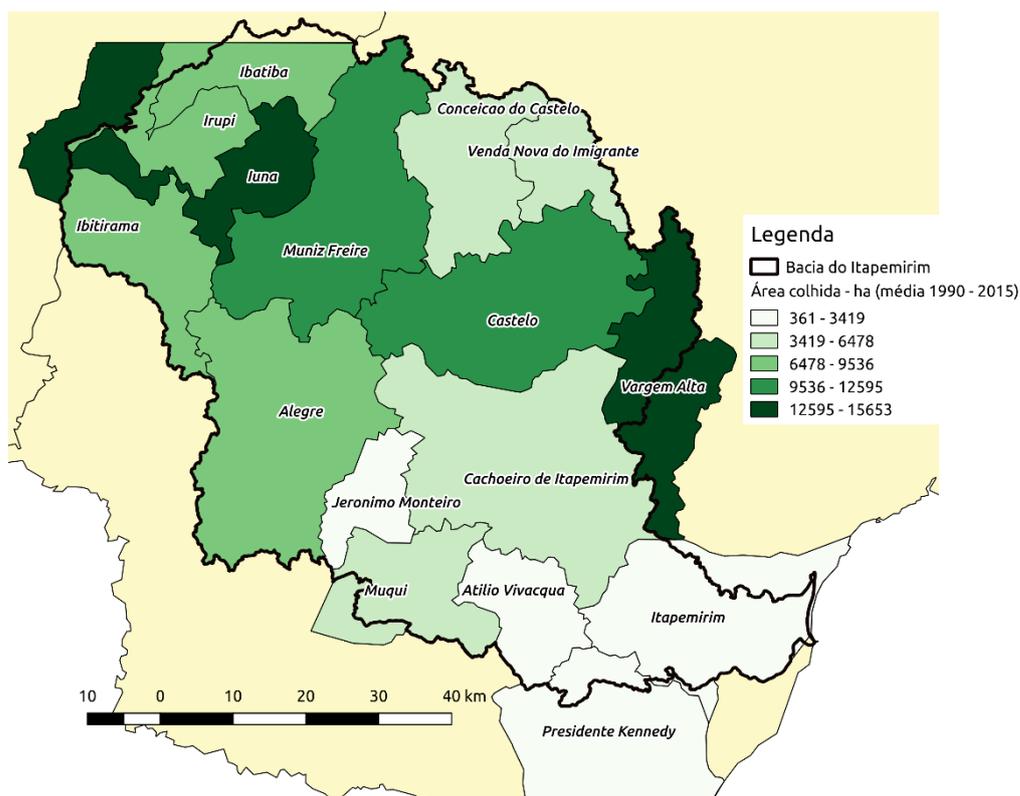


Figura 4.31 Área colhida de café média por município (ha). Fonte: dados IBGE (1990-2015)

Embora Irupi não apareça com as maiores áreas de cultivo dentre os municípios relacionados, sua área de cobertura de cafeeiros relativa à área total do município é a maior encontrada. Irupi, está entre as maiores produções da bacia, atrás apenas de Iúna, Vargem Alta e Muniz Freire.

A Figura 4.31 mostra uma espacialização dos dados de área colhida de café médios para a série de dados disponibilizada pelo IBGE, de 1990 a 2015.

A Figura 4.32 mostra os valores de produção de cultura cafeeira por município de acordo com dados do IBGE. A produção total de café de todos os municípios que englobam a bacia foi de 101.654 toneladas de café no ano de 2015.

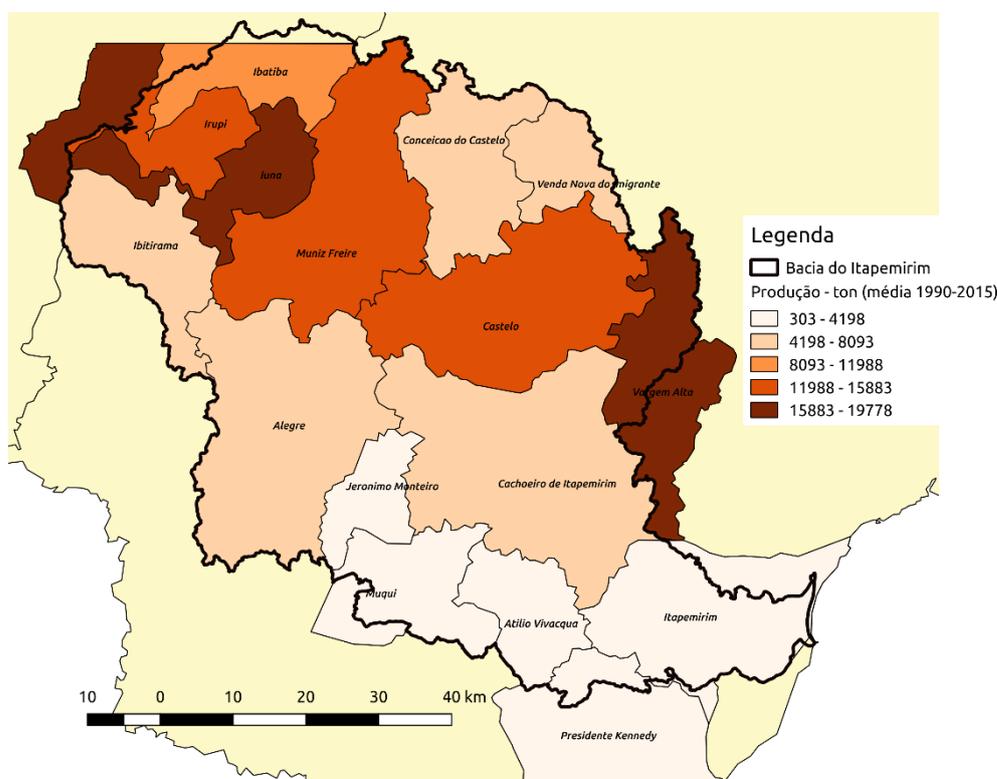


Figura 4.32 Produção média em toneladas de café por município (ton) Fonte: dados IBGE (1990-2015)

A evolução da produção total mostra uma tendência de redução ao longo da série de dados (Figura 4.33). Há uma tendência positiva até o ano 2000, onde a bacia apresenta seu auge na produção. Após esse ano, a produção entra em declínio, caracterizando esse como comportamento geral da série histórica.

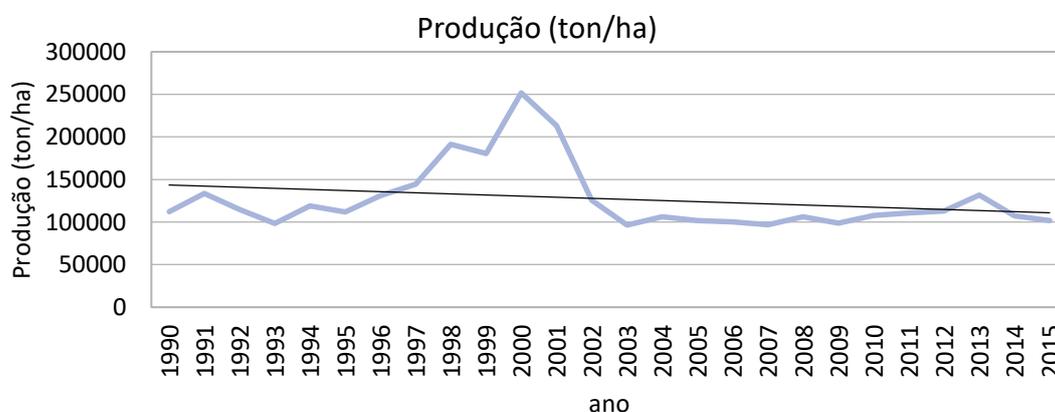


Figura 4.33 Produção total dos municípios pertencentes à bacia (ton/ha). Fonte: dados IBGE (2015)

FREDERICO (2012) mostra, em seu trabalho, um histórico da produção cafeeira no estado do Espírito Santo. Em uma série de dados desde 1900, após constante crescente até meados dos anos 60, há um período de queda na produção. A cafeicultura capixaba encontrava-se depauperada. A baixa produtividade decorrente da presença de solos degradados, as tecnologias insuficientes ao controle de pragas e doenças (broca-do-café e ferrugem) e o esgotamento da fronteira agrícola interna ao norte do estado, somados aos baixos preços internacionais do café, evidenciavam a crise do modelo agrícola dominante desde o final do século XIX., onde surge o momento de renovação da cafeicultura capixaba (Figura 4.34).

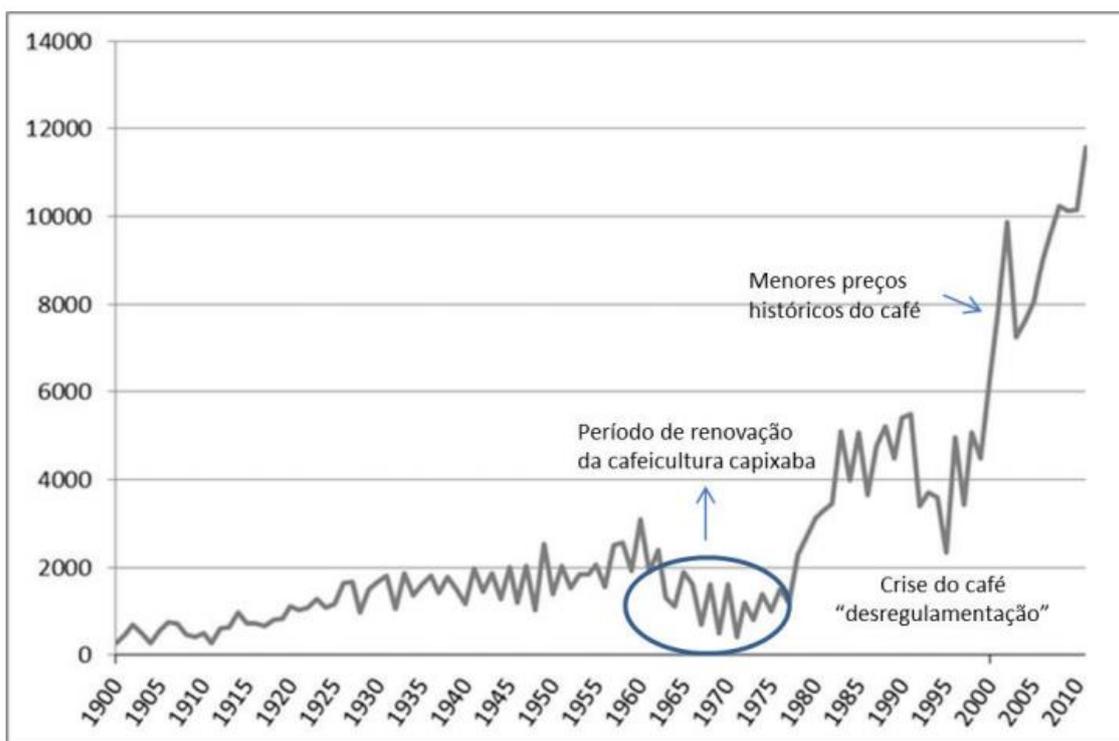


Figura 4.34 Quantidade produzida de café (mil sacas/60kg), 1900 – 2010, Espírito Santo. Fonte: FREDERICO (2012).

A partir da década de 1970, o Plano de Revigoração e Renovação dos Cafezais (PRRC) foi o responsável pela introdução de novas técnicas de manejo, de cultivares mais produtivos e pela oferta de crédito rural nas áreas de Arábica, ao mesmo tempo em que a política estatal de estímulo ao aumento do consumo interno de café e a criação da indústria nacional de café solúvel criaram um grande mercado consumidor para a variedade Conilon.

O ano 2000 é marcado por baixos preços no mercado internacional do café e para a produção na bacia do Itapemirim representa um marco no declínio das produções.

A produtividade é influenciada por vários fatores, tais como a utilização de insumos, preços, avanços técnicos, fatores biológicos e climáticos (CAMARGO *et al.*, 2003). O município com maior produtividade, produção por área plantada, são Ibatiba e Venda Nova do Imigrante com 1,46 e 1,45 ton por ha, respectivamente, seguidos por Irupi (1,366 ton/ha). O município com menor produtividade é Itapemirim (0,88 ton/ha), que também possui uma pequena produção total. Os municípios com baixa produtividade são os mesmos que possuem baixa produção. Eles encontram-se nas partes mais baixas da bacia, onde o clima e a altitude não são propensos ao cultivo do café.

A Figura 4.35 mostra os dados de produtividade especializados por município. Onde é possível observar que as maiores produtividades encontram-se nas bordas da bacia.

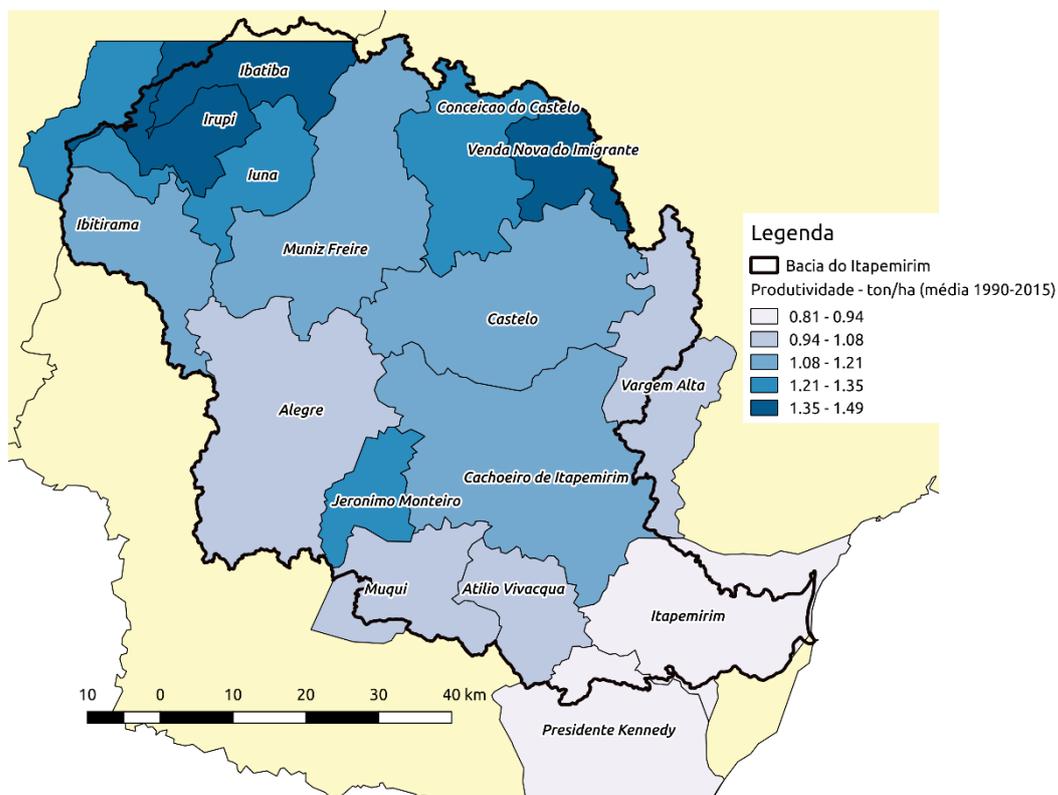


Figura 4.35 Produtividade da cultura cafeeira por município (ton/ha). Fonte: dados IBGE (1990-2015)

A evolução temporal da produtividade dos municípios pode ser observada na Figura 4.36.

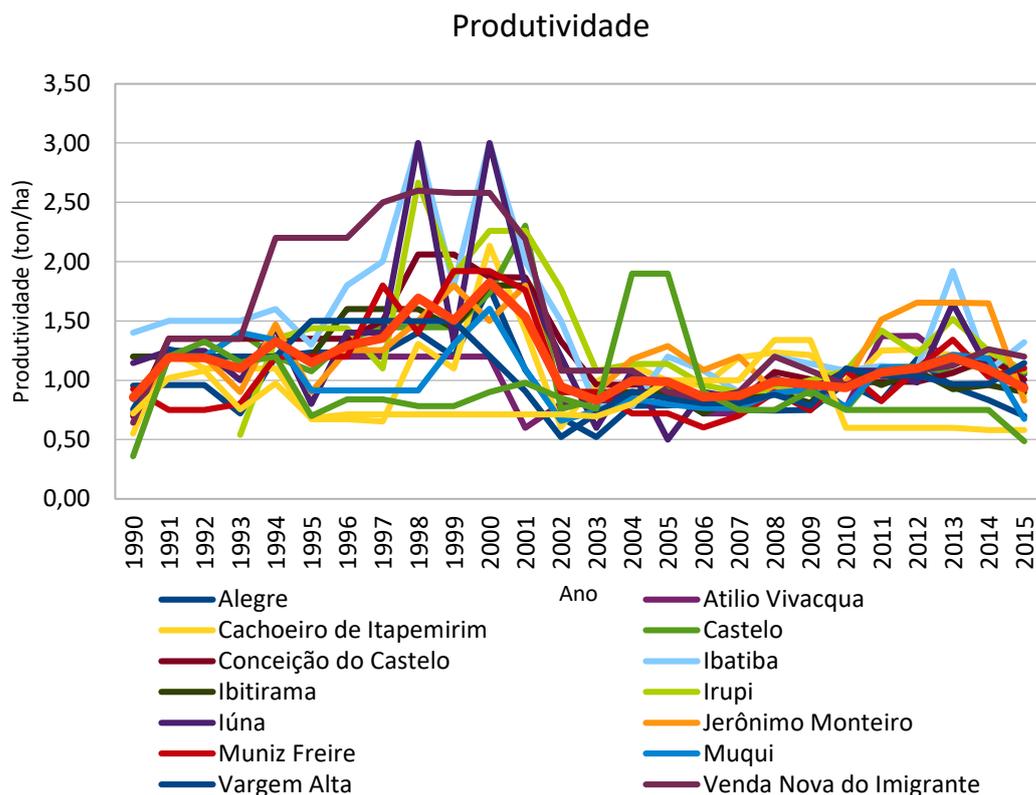


Figura 4.36 Série histórica de dados de produtividade por município. Fonte: dados IBGE (1990-2015)

A Figura 4.37 mostra a produtividade média da bacia ao longo da série histórica. É possível observar na produtividade o mesmo padrão de comportamento percebido na produção. Esse padrão é esperado, uma vez que as áreas de cultivo não sofreram grandes alterações no período. Dessa forma, a variação na produção decorre das tecnologias e cuidados aplicados à cultura aliados a variáveis climáticas. A barra de erro representa o desvio padrão do cálculo da média.

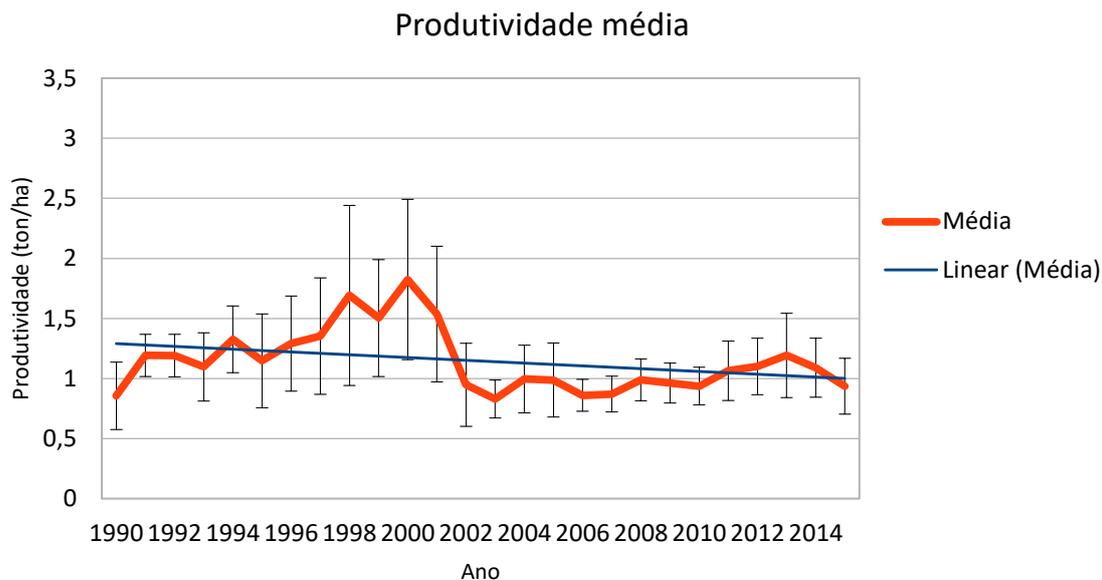


Figura 4.37 Produtividade média da bacia. Fonte: dados IBGE (1990-2015)

Apesar da importância econômica do cultivo do café para a região, a produtividade média é relativamente baixa comparada à média brasileira, que é de 1,39 ton/ha.

Muitas vezes, a produtividade é comprometida pela falta de recursos e informação por parte dos produtores. FERRÃO *et al.* (2009), destacam os seguintes fatores: uso de variedades, mudas e espaçamentos inadequados, pouca utilização de práticas de conservação e correção do solo, associada ao plantio em relevo acidentado, que consequentemente permite pouco uso de máquinas e/ou localizado em áreas impróprias, em solos depauperados; emprego de insumos abaixo da necessidade, devido ao elevado custo e/ou falta de informação; utilização ineficiente das tecnologias de manejo cultural; monitoramento de pragas e doenças realizado de forma errônea e muitas vezes sem critério técnicos sustentáveis, com destaque para a alta incidência da ferrugem, que tem determinado desfolha dos cafezais, associado à falta de controle, comprometendo a produção do ano seguinte.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos na aplicação da metodologia descrita para a análise da evolução da vegetação da bacia hidrográfica do rio Itapemirim através da análise de persistência dos dados de NDVI obtidos pelo sensor MODIS.

Os dados de NDVI foram apresentados ao longo da revisão bibliográfica e caracterização da bacia como importante e reconhecido índice representativo do estado da vegetação e como índice hidroclimatológico, relacionado a demais variáveis representativas de uma bacia hidrográfica.

Como estrutura de apresentação do presente capítulo, primeiramente, no tópico 5.1, são apresentados os dados de NDVI em sua composição máxima anual. Tais composições foram realizadas a fim de eliminar da posterior análise os efeitos da sazonalidade da vegetação com suas variações intra-anuais.

O tópico 5.2 mostra os resultados da análise de persistência da vegetação. Inicialmente, uma análise geral da bacia é realizada e em sequência a probabilidade de persistência é calculada separadamente para diferentes tipos de vegetação, com apoio das informações de uso e ocupação do solo, e por altitude, variável fisiográfica apresentada na caracterização da bacia que apresenta relação com a pluviosidade distribuída.

Os tipos de vegetação que tem sua probabilidade de persistência avaliadas são os três (3) principais usos do solo existentes na bacia, sendo elas pastagem, cultura cafeeira e mata nativa. Uma análise em separado por tipo de uso do solo possibilitou averiguar características coletivas de comportamento e capacidade de regeneração por tipo de vegetação. Especialmente para a cultura do café, uma análise de probabilidade de persistência foi realizada por município, a fim de melhor segmentar o perfil dessa cultura na bacia e com objetivo de comparar com os dados de produtividade por município fornecidos pelo IBGE.

Outra estrutura de análise foi realizada por classe de altitude da bacia, separada em um intervalo de 250 metros. Igualmente, para cada classe definida, foram feitos os cálculos de probabilidade de persistência a fim de explorar as variações das capacidades regenerativas da vegetação da bacia influenciadas por tal fator.

5.1 DADOS DE NDVI

Os dados de NDVI do sensor MODIS foram extraídos, recortados e tratados para representar a bacia do rio Itapemirim com seus valores máximos anuais. Essas composições constituem mapas onde cada pixel apresenta o valor máximo anual obtido para o índice. Os resultados são mostrados na Figura 5.1, onde é possível observar a evolução do NDVI com sua variação ano a ano para a série histórica analisada.

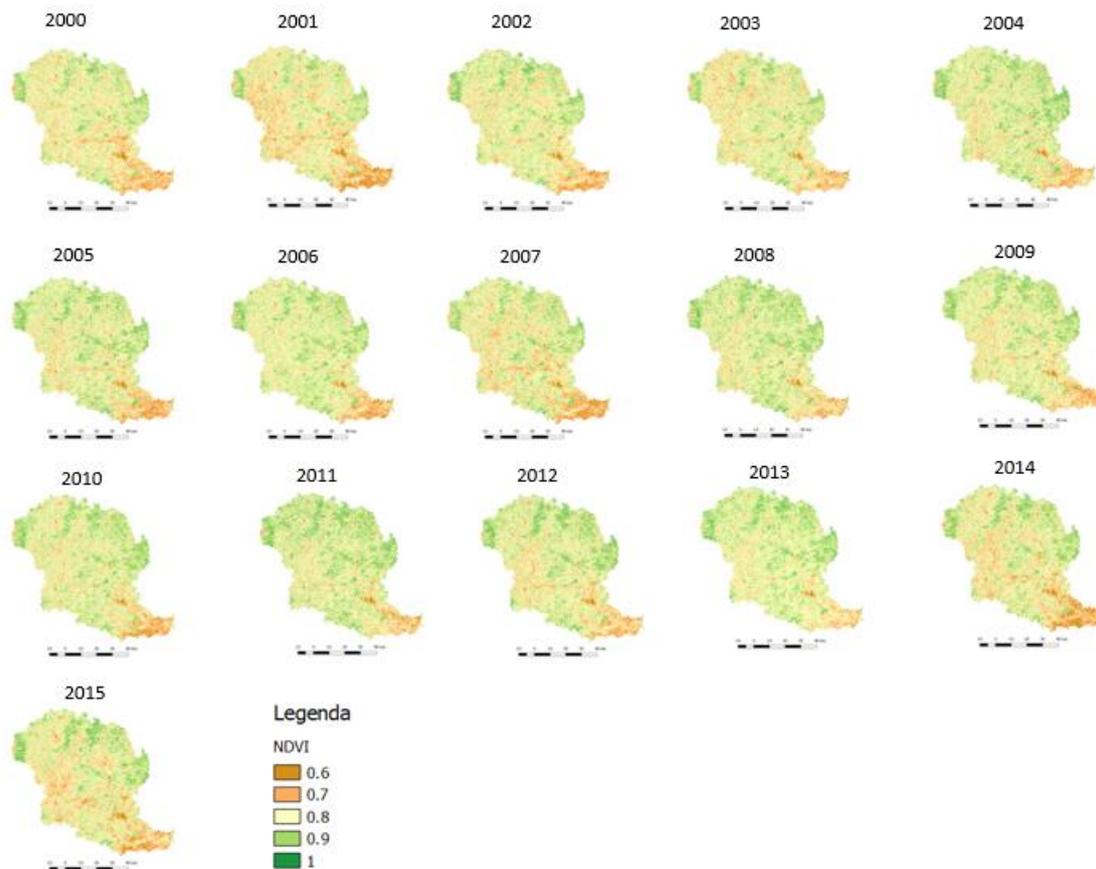


Figura 5.1 Composição máxima anual para os valores de NDVI do sensor MODIS para bacia do rio Itapemirim (2000-2015)

Os valores do índice mais próximos de 1 encontram-se no entorno da bacia, região montanhosa e ondulada. As áreas junto a foz da bacia apresentam recorrentes valores baixos de NDVI, contendo áreas mais planas e com vegetação menos densa.

Uma análise geral dos mapas mostra que os anos de 2001, 2007 e 2014 apresentam um comportamento coletivo na redução do índice na bacia. Esses foram anos marcados por índices pluviométricos baixos, com notado impacto na vitalidade da vegetação.

As variáveis climáticas impactarão diretamente o comportamento da vegetação, no entanto, essa interação não corresponde a uma dinâmica simples. Embora haja um comportamento coletivo de aumento e redução nos valores de índice de vegetação, principalmente relacionados à precipitação, a forma de resposta de cada área e tipo de vegetação diferirá na intensidade do impacto ocorrido e no tempo de recuperação de impactos negativos.

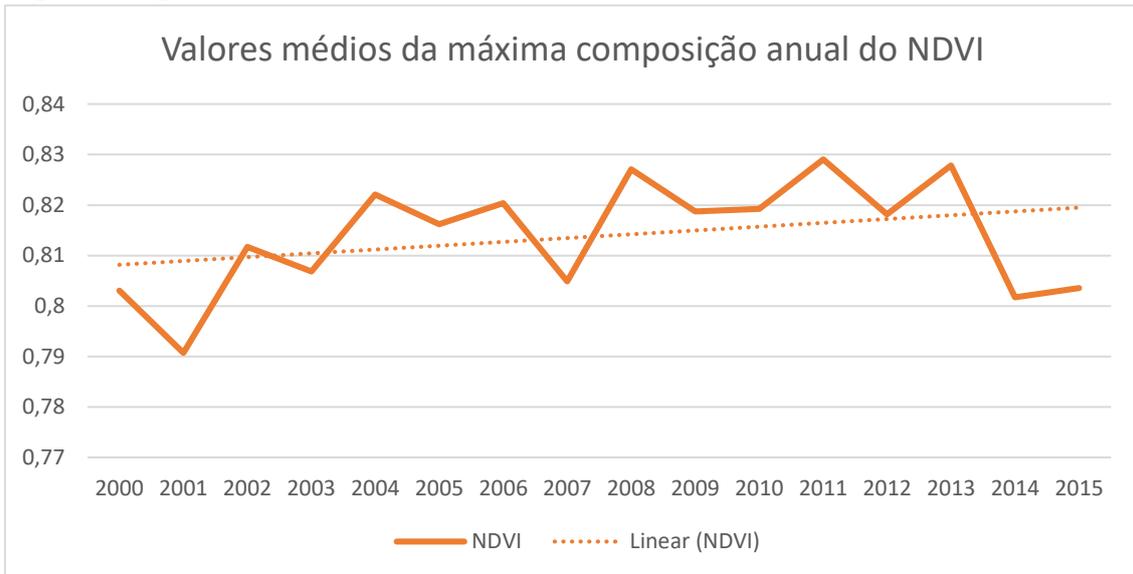


Figura 5.2 Série de valores da composição máxima anual de NDVI médios para a bacia do Rio Itapemirim

O comportamento médio das composições máximas anuais de NDVI para a bacia, mostrado na Figura 5.2., apesar das variações interanuais, indica uma tendência positiva. No entanto, é interessante analisar essa tendência píxel a píxel, a fim de identificar áreas com tendências de redução e, ao mesmo tempo, subsidiar o entendimento do comportamento coletivo de determinado tipo de vegetação.

5.2 ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA

O resultado do cálculo da persistência realizada para a bacia do Itapemirim com base nos dados de NDVI fornecidos pelo sensor MODIS mostram uma variabilidade espacial na distribuição dos valores de persistência, mostrados na Figura 5.3. A persistência dos píxeis varia de -6 a 6, sendo representados por uma gradação de cores variando do vermelho ao azul. É possível analisar, pelo mapa de resultados, que a maior parte dos píxeis apresentam persistência longa e positiva. Setenta e cinco por cento (75%) da área da bacia foi classificado com persistência positiva, enquanto 25% apresentou persistência negativa.

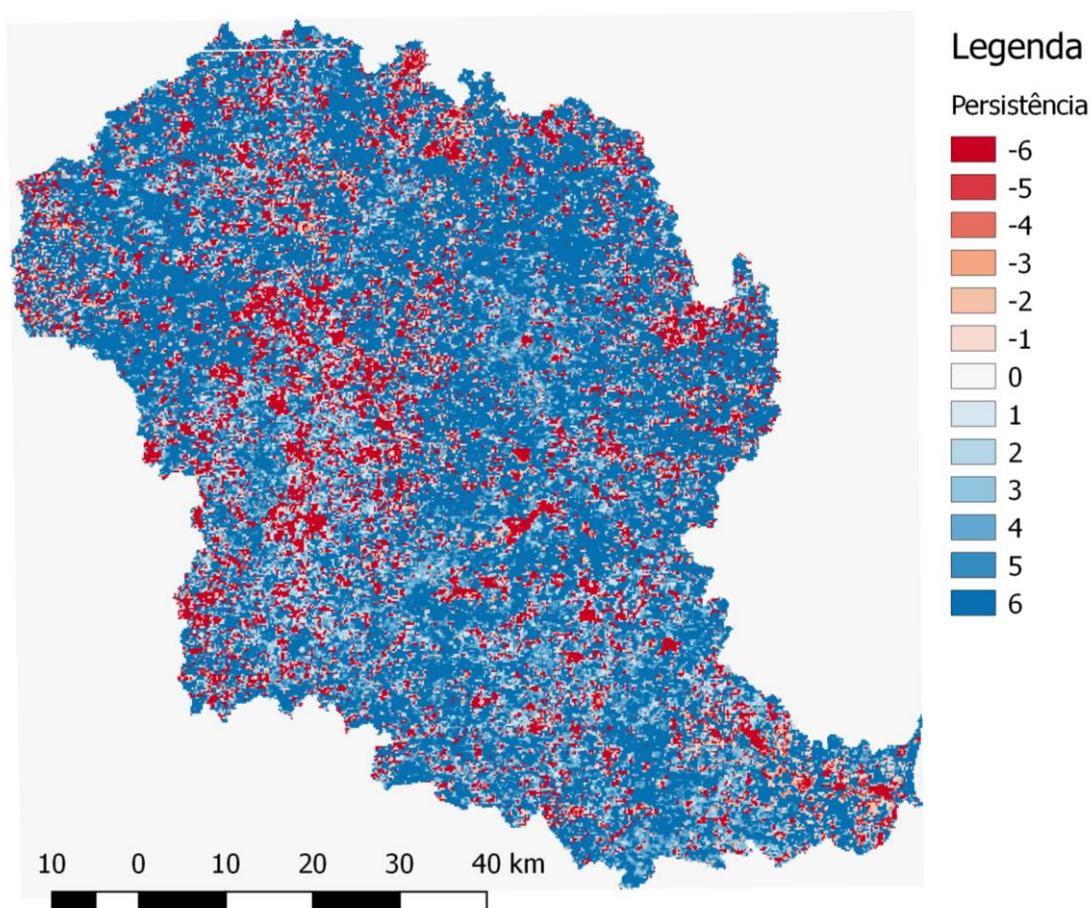


Figura 5.3 Análise de persistência para resolução espacial de 250m.

A Figura 5.4 mostra os mapas de análise de persistência calculados para cada ano acrescentado após o tempo de referência. Sendo as cores azul e vermelhos intensos os píxeis onde há persistência longa positiva e negativa, respectivamente. É possível observar no tempo as áreas onde as características iniciais de tendência vão sendo

eliminadas. A maior parte das áreas onde as tendências são apagadas estão no entorno de regiões caracterizadas inicialmente como tendência negativa.

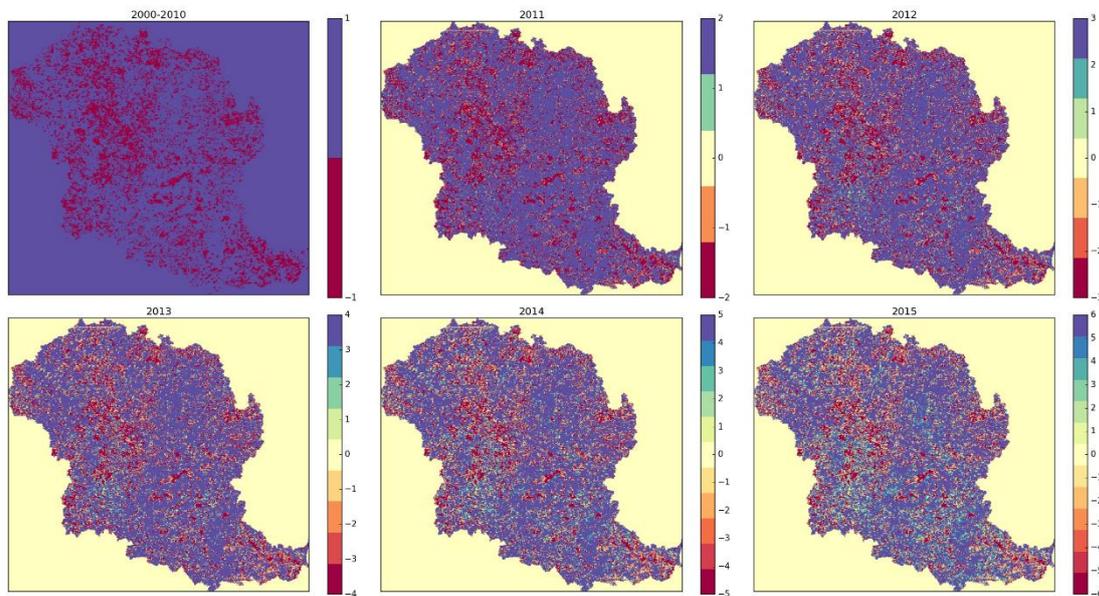


Figura 5.4 Mapas de análise de persistência para os anos subsequentes ao período de referência

As áreas com mudança de tendência são majoritariamente negativas, mostrando um comportamento coletivo da vegetação da bacia no sentido de tendências positivas de NDVI.

As áreas com persistência positiva são dispersas pela bacia, e é possível observar alguns aglomerados de persistências negativas. A Figura 5.5 apresenta o mapa de Kernel, também conhecido como mapa de densidade de ocorrência, das persistências longas negativas. Esse mapa apresenta a densidade de pixels classificados com persistência 6 negativa, isto é, locais onde há maior aglomerados de pontos de ocorrência de pixels que mantiveram durante todo o período da série histórica tendência negativa na evolução do NDVI.

Uma análise em separado da área do maior aglomerado de tendências negativas, sinalizado pela marcação em azul, mostra que 79,9% da área é formada por pastagens, o que também pode ser identificado no mapa de uso do solo apresentado na Figura 4.8. No tópico 5.2.1, será abordado separadamente esse tipo de uso do solo, que, para essa bacia, apresenta sinais de processos de degradação. Esse é o maior aglomerado de persistências negativas, apresenta altitude média de 543 m, sendo a mínima de 109 m e a máxima de 1285 m. Já a declividade média é de 19%, máxima de 70% e mínima zero.

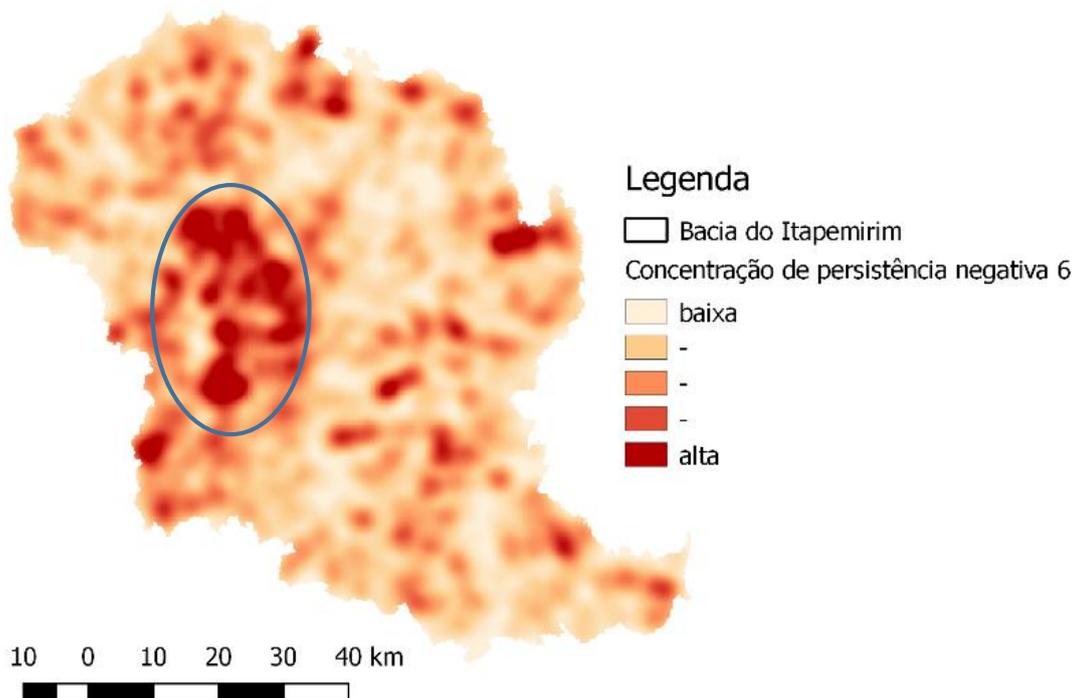


Figura 5.5 Mapa de densidade de ocorrência de persistência máximas negativas

Cabe reparar que, embora a região a jusante da bacia apresente valores relativamente baixos de NDVI recorrentes durante a série temporal, ela não apresenta grandes aglomerados de persistências negativas, mesmo sendo essa região igualmente majoritariamente coberta por pastagens. Uma análise mais aproximada na área mostra alguns pequenos aglomerados negativos associados à hidrografia principal (Figura 5.6).

As persistências negativas próximas às áreas de drenagem da bacia podem estar associadas a erosão, devido ao já citado intenso desmatamento ocorrido na bacia hidrográfica.

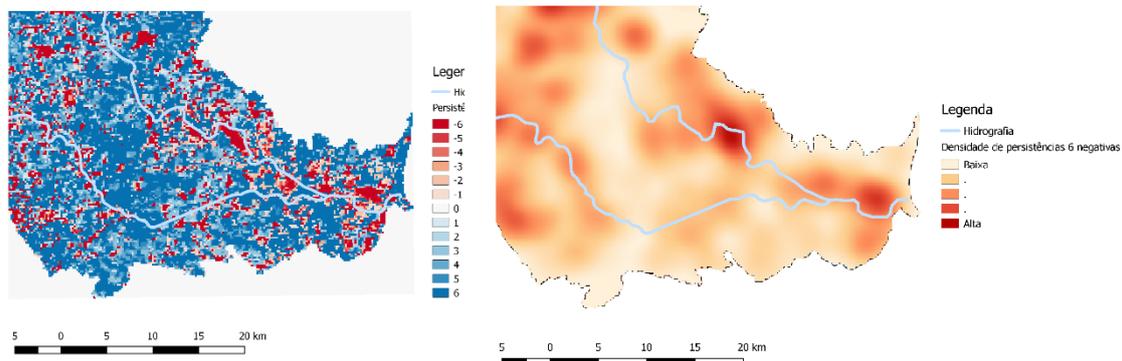


Figura 5.6 Aproximação para a foz da bacia do rio Itapemirim: mapa de persistência (à esquerda) e mapa de densidade de persistências negativas máximas (à direita).

Importante ressaltar neste ponto uma comparação entre os resultados encontrados nesse trabalho e por LANFREDI *et al* (2004) e SIMONIELLO *et al.* (2008). Esses últimos estudos foram desenvolvidos para uma área extensa, a nível de país. Já o presente trabalho realizou uma adaptação da metodologia para aplicação a nível de bacia. LANFREDI *et al.* (2004) trata de uma área mais extensa, contemplando toda a Itália, e em seu estudo é possível observar *cluster* de persistências positivas bem definidos em regiões de vegetação e persistências negativas em áreas urbanizadas. Diferentemente, a análise de persistência da bacia do Itapemirim não apresenta grupamentos (*clusters*) bem definidos de persistências positivas e negativas. A bacia do Itapemirim possui uma pequena porcentagem do território classificado como urbano, logo não observamos persistências negativas decorrentes desse tipo de impacto.

A bacia do Itapemirim é coberta majoritária por áreas vegetadas. Em um estudo com uma escala maior, a de se esperar que a bacia como um todo represente um aglomerado positivo de persistências, devido ao caráter geral encontrado nos resultados. No entanto, a metodologia aplicada em menor escala possibilita uma análise particular dos tipos de vegetação e suas tendências degradativas, como será visto em 5.2.1, podendo inclusive indicar tais processos de maneira localizada.

A Figura 5.7 mostra o melhor ajuste de persistência para o cálculo da probabilidade em cada intervalo de tempo da série histórica de um píxel continuar pertencendo a determinada classes de persistência, positiva ou negativa.

O número de tendências negativas e positivas que sobrevivem por ano é bem ajustado por leis de decaimento exponencial como mostrado pelo fator R^2 (coeficiente de determinação) na Tabela 5.1. A mesma tabela apresenta o tempo médio de vida para as persistências positivas e negativas.

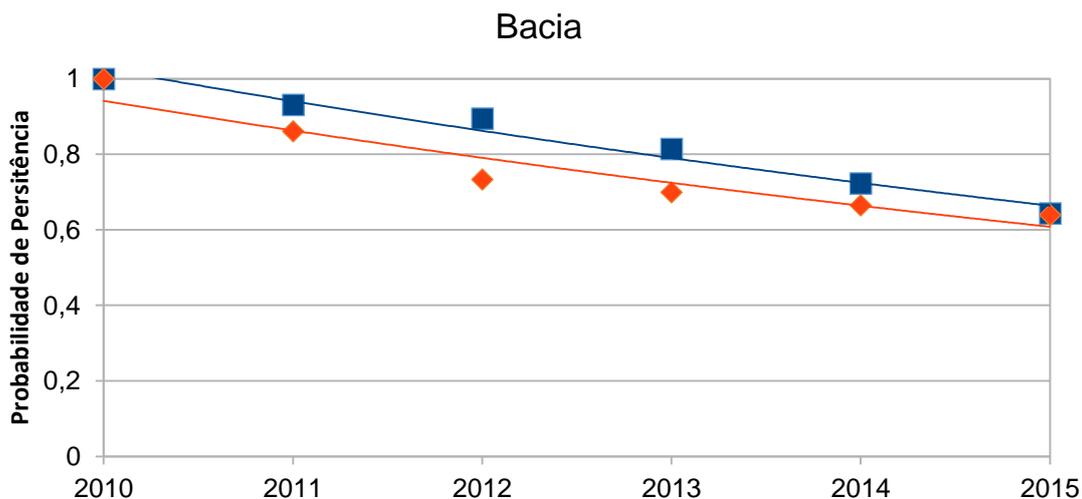


Figura 5.7 Ajuste da curva de cálculo de probabilidade de persistência. Persistências positivas em azul e negativas em vermelho

É possível reparar, no gráfico, que a probabilidade das persistências positivas é sempre superior às negativas. O decaimento mais rápido da curva de probabilidade negativa é o caráter esperado para uma vegetação saudável com boa capacidade de regeneração.

Tabela 5.1 Tempo médio de vida da persistência e ajuste R^2 da curva de probabilidade de persistência

	Bacia	
	Vida média (anos)	R^2
Positivo	17,32	0,86
Negativo	12,29	0,90

Estudo realizado por BARRETO *et al.*, (2012) aponta áreas degradadas no estado do Espírito Santo, onde descreve que no intervalo de 1992 e 2012, essas sofreram redução de cerca de 34%. Tal dado corrobora com os resultados de maiores tempos de persistência positiva da vegetação em geral, uma vez que a recuperação acarretará em incrementos

nos níveis de NDVI dessas áreas. Segundo o mesmo estudo, a bacia do Itapemirim apresentava 11,21% da sua área caracterizada como degradada.

A Serra do Caparaó pode ser destacada, nesta análise, como a maior área de conservação da bacia, sendo uma reserva federal. A área contempla as maiores altitudes da bacia, com níveis acima de 1700 m, e com declividades elevadas. A mesma encontra-se dentro da Serra da Mantiqueira e representa um dos maiores e mais importantes parques nacionais nela contidos.

O uso do solo nessa serra inclui grande área com mata nativa e afloramento rochoso. Segundo BARBOSA *et al.* (2017), no Parque Nacional do Caparaó, as monoculturas de café e eucalipto estão sendo responsáveis por modelar fortemente a vegetação no entorno da serra.

As áreas florestais do Parque são de formação secundária (embaúbas, quaresmeiras, adragos, paus-jacarés e angicos), pois a vegetação nativa foi alterada pela ação do fogo, pela extração de madeiras nobres e pelo desmatamento, derivado do histórico de plantação de café e formação de pastagens na área hoje ocupada pelo parque (GOBBO, 2015).

Apesar de ser uma unidade de conservação, a serra não se mostra um aglomerado de persistências positivas. As persistências nessa área são bastante dispersas pelo território. A não apresentação de valores positivos de persistência pode estar relacionada a questões climáticas envolvendo a região do Caparaó com seu clima característico local.

De forma geral, os resultados encontrados podem indicar uma boa saúde e capacidade de regeneração da vegetação da bacia. No entanto, para uma análise mais detalhada, é interessante destacar a persistência por classes e avaliar os diferentes padrões que se apresentam na bacia.

5.2.1 USO DO SOLO

A avaliação dos dados de persistência foi realizada nesse tópico separadamente para as principais categorias de uso do solo presente na bacia com auxílio do mapa de uso e cobertura do solo apresentado na caracterização da área de estudo (4.1.4). Essa análise

possibilita o melhor entendimento da variação temporal da vegetação específica e pode ser uma ferramenta de avaliação de culturas de forma ampla.

Os mapas de análise de persistência foram recortados para cada tipo de uso do solo e um novo cálculo da probabilidade de persistência foi realizado.

As classes de uso do solo escolhidas para essa análise foram a cultura de café, pastagem e mata nativa, que no caso da bacia do rio Itapemirim é constituída pela mata Atlântica. A Tabela 5.2 mostra as áreas e percentual de ocupação da bacia desses usos do solo.

Tabela 5.2 Três principais usos do solo, suas áreas de ocupação da bacia e percentual da área total

Uso do solo	Área (Km ²)	Percentual da área total (%)
Mata nativa	982	17,2
Pastagem	2.491	43,7
Cultivo agrícola – café	798	14,0

Apesar da bacia poder ser caracterizada de forma geral com uma persistência positiva da vegetação, a análise em separado dos usos do solo de áreas vegetadas mostra diferentes perfis de tendências.

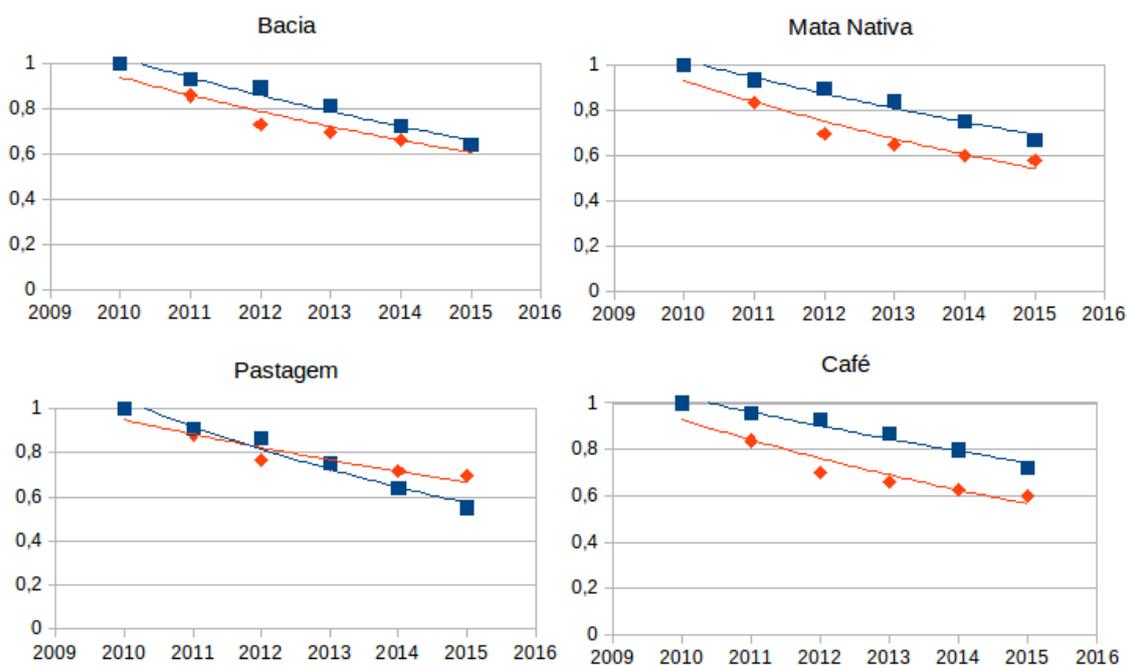


Figura 5.8 Gráficos com a probabilidade de persistência para a bacia em sua totalidade e separado por categoria de uso do solo

A Figura 5.8 mostra a probabilidade de persistência com o ajuste dos dados à equação exponencial para o total da bacia e para três tipos de uso do solo selecionados.

Para os tipos de uso do solo analisados, as persistências negativas decaem mais rapidamente que as positivas, com exceção da pastagem. Para uma vegetação saudável, esse primeiro comportamento é esperado. Quanto mais curto o tempo de decaimento das tendências negativas, maior a capacidade da vegetação de se recuperar de impactos negativos (COPPOLA *et al.*, 2009).

A Tabela 5.3 apresenta o tempo médio de vida para a bacia e usos do solo obtidos através do ajuste dos dados de probabilidade à equação exponencial $e^{-\frac{t}{\tau}}$. O coeficiente de determinação (R^2) representa uma medida de ajuste ao modelo.

Tabela 5.3 Tempo médio de vida e coeficiente de ajuste da curva exponencial para o cálculo de probabilidade de persistência para a área total da bacia e para cada tipo de uso do solo

	Positivo		Negativo	
	Vida Média (τ)	R^2	Vida Média (τ)	R^2
Bacia	17,1	0,86	12,29	0,90
Café	23,76	0,83	10,68	0,89
Mata Nativa	19,18	0,86	10,16	0,90
Pastagem	12,17	0,85	15,40	0,89

As áreas de cultivo de café e mata nativa são caracterizadas por uma clara assimetria entre os tempos médios de vida das tendências positivas e negativas. Em particular, as áreas de cultura cafeeira mostram um longo tempo médio de persistência para tendências positivas ($\tau = 23,76$ anos) e curtos tempos de recuperação de estresse negativo ($\tau = 10,68$ anos). Essas características podem ser um indicativo de um alto nível de resiliência desse tipo de vegetação.

A mata nativa, embora apresente um tempo médio de vida positivo menor que a cultura de café ($\tau = 19,18$ anos), apresenta tempo médio de vida negativo ainda mais reduzido. Essa é uma análise importante para identificar a relevância dos impactos dos eventos hidroclimáticos sobre a vegetação da bacia.

Áreas cultivadas apresentam características naturais da vegetação e efeitos de ações de controle antrópico. Especificamente os cultivos anuais não podem exibir memória interanual atribuível à dinâmica da vegetação pura. Além disso, algumas práticas humanas são dedicadas a aumentar o crescimento, por exemplo, o uso de fertilizantes, ou limitar o desenvolvimento por meio de poda sistemática. Eventos extremos, como os decorrentes do abandono da terra ou da agricultura intensiva, também têm origem antrópica. Tendo em vista que a cultura cafeeira está submetida a intenso manejo antrópico, é importante relacionar os resultados dessa cultura baseados em fatores não exclusivamente hidroclimáticos, pois, dada a importância econômica de tal cultura na região, os avanços em técnicas de cultivo e a maior difusão de conhecimentos sobre a cultura entre os produtores proporcionam, que as condições das áreas plantadas sofram uma melhora contínua. Acredita-se que a superioridade do valor de tempo médio de vida da área de cultivo de café perante ao tempo da mata nativa esteja relacionado ao manejo antrópico.

Apesar da característica geral da cultura do café de mostrar tendências positivas no NDVI, uma avaliação por município mostra diferenças significativas. A Tabela 5.4 mostra os cálculos de probabilidade de persistência das áreas de cultura de café para as áreas pertencentes à bacia dos 16 municípios nela contidos.

Tabela 5.4 Área plantada, produtividade e tempos médios de vida para tendências positivas e negativas por município contido na bacia do Itapemirim

Município	Área plantada (ha)	Produtividade (ton/ha)	Positivo		Negativo	
			Tempo médio de vida	R ²	Tempo médio de vida	R ²
Ibatiba	7799	1,460	22,790	0,890	10,880	0,917
Venda Nova do Imigrante	3483	1,452	28,780	0,828	10,980	0,833
Irupi	9310	1,362	23,360	0,867	12,360	0,881
Iúna	15653	1,264	21,540	0,890	11,400	0,887
Conceição do Castelo	4787	1,246	30,040	0,773	9,771	0,884
Jerônimo Monteiro	2182	1,241	14,480	0,742	10,460	0,831
Castelo	10631	1,150	19,750	0,821	12,070	0,875
Ibitirama	7152	1,129	29,410	0,875	9,530	0,878
Muniz Freire	11938	1,125	27,850	0,827	10,180	0,904
Cachoeiro de Itapemirim	6075	1,083	15,650	0,831	13,790	0,902
Vargem Alta	15454	1,066	39,800	0,825	9,447	0,888
Atilio Vivacqua	2514	1,030	14,000	0,841	16,360	0,931
Muqui	3506	0,994	15,830	0,830	14,060	0,880
Alegre	7573	0,987	9,604	0,876	21,860	0,870
Presidente Kennedy	505	0,897	-	-	-	-
Itapemirim	361	0,839	-	-	-	-

A análise por município proporciona a comparação com os dados de produtividade fornecidos pelo IBGE. A Figura 5.9 mostra gráfico com os tempos de vida médios por município..

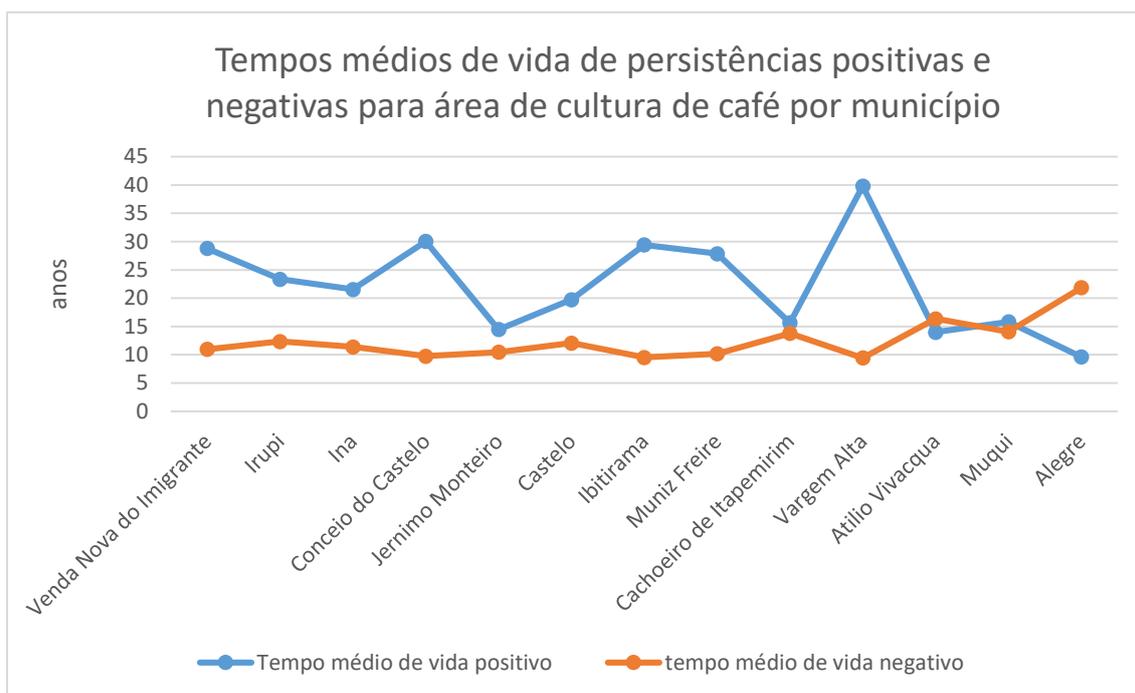


Figura 5.9 Tempo médio de vida para as persistências positivas e negativas para as áreas de cultivo de café por município contido na bacia do Itapemirim

Para os municípios de Presidente Kennedy e Itapemirim, não foi possível calcular a probabilidade de persistência devido aos poucos píxeis classificados como cultura de cafeeira dentro de seu território.

Os municípios com maiores produtividades (Venda Nova do Imigrante, Ibitirama, Irupi e Ina) apresentam características de probabilidade de persistência indicativas de boa saúde de suas vegetações.

Conceição do Castelo apresenta indicadores de bons tempos de recuperação da vegetação desse tipo de cultura, apesar de não ser um grande produtor em quantidade e nem apresentar os maiores índices de produtividade. O município está localizado em parte alta da bacia com ocorrências de pluviosidade adequada à cultura do café, o que contribui para a vitalidade da vegetação. A produtividade não comparada aos principais produtores pode estar associada ao despreparo nas técnicas de colheita e beneficiamento.

Outro município cuja vegetação dá indicativos de excelente estado de vitalidade e capacidade de regeneração é Vargem Alta, que está entre os maiores produtores da bacia, ocupando o segundo lugar, apesar da produtividade abaixo da média. O município está localizado na área com maiores índices de pluviosidade observados.

Os municípios que apresentam tempo médio de vida positivo baixo e tempo negativo alto, indicando baixa capacidade de recuperação da vegetação, são também

aqueles que apresentam baixa produção e produtividade (Alegre, Muqui, Atilio Vivacqua, Cachoeiro de Itapemirim). Esses municípios encontram-se em áreas mais baixas e menos propícias ao cultivo do café. Como citado na caracterização da bacia, as culturas na região são caracterizadas pela falta de tecnologia, infraestrutura e estudos de aptidão. Esses municípios tendem a apresentar áreas de cafeicultura degradadas pela falta cuidados devidos e /ou inaptidão climatológica.

Como grande parte da bacia do rio Itapemirim, tomando toda sua parte alta, é propícia hidroclimaticamente ao cultivo do café, é de se esperar que como comportamento geral, tal agricultura apresente resultados positivos quanto a sua capacidade de resiliência. No entanto, quando analisamos áreas menores, como a análise por município, alguns fatores mais locais passam a influenciar os resultados, como o comportamento individual de determinada área de cultivo. As formas de cultivo de café podem variar de acordo com a variedade cultivada e as opções tomadas por cada agricultor. O tempo de vida de uma produção pode variar bastante, apresentando uma média de 9,7 anos (TEIXEIRA *et al.* 2001). Tal característica desse tipo de produção perene pode impactar a análise de persistência uma vez que não há homogeneidade nas produções cafeeiras no sentido temporal. Uma produção jovem no período escolhido como inicial apresentará resultados discrepantes de uma produção que no mesmo período estava madura, mesmo que ambas representem vegetações com manejos adequados e boa capacidade de resiliência.

As análises por município também apresentam uma quantidade reduzida de pixels quando comparada a bacia como um todo, porém o ajuste da equação exponencial à curva de probabilidade continua sendo bem aplicada.

A pastagem é o uso do solo que apresenta o decaimento positivo mais rápido e o decaimento negativo mais lento. Essa constatação pode ser indicativa de condições de estresse desse tipo de uso do solo. A degradação das pastagens é definida por MACEDO E ZIMMER (1993) *apud* MACEDO *et al.* (2013) como um processo evolutivo da perda do vigor, de produtividade, da capacidade de recuperação natural das pastagens para sustentar os níveis de produção e a qualidade exigida pelos animais, bem como o de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras, culminando com a degradação avançada dos recursos naturais em razão de manejos inadequados.

Segundo MACEDO *et al.* (2013), a degradação das pastagens é um processo iniciado pela perda de vigor e queda na disponibilidade de forragem, com redução da capacidade de lotação e do ganho de peso animal. Em fases mais avançadas, podem ocorrer infestação de plantas invasoras, ocorrência de pragas e a degradação do solo. O

final do processo culminaria com a ruptura dos recursos naturais, representado pela degradação do solo com alterações em sua estrutura, evidenciadas pela compactação, e a consequente diminuição das taxas de infiltração e capacidade de retenção de água, causando erosão e assoreamento de nascentes, lagos e rios.

A degradação de áreas de pastagem pode ser causadas por diversos fatores relacionados ao manejo inadequado, como, por exemplo: germoplasma inadequado ao local; má formação inicial da pastagem causada pela ausência ou inadequado uso de práticas de conservação do solo, preparo do solo, correção da acidez e/ou adubação, sistemas e métodos de plantio e, manejo animal na fase de formação; manejo e práticas culturais como uso de fogo como rotina, métodos, épocas e excesso de roçagem, ausência ou uso inadequado de adubação de manutenção; ocorrência de pragas, doenças e plantas invasoras; manejo animal impróprio com excesso de lotação, sistemas inadequados de pastejo; ausência ou aplicação incorreta de práticas de conservação do solo após relativo tempo de uso de pastejo.

Segundo *UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME* (2004), a degradação de pastagens é um fenômeno global. Estima-se que cerca de 20% das pastagens mundiais (naturais e plantadas) estejam degradadas ou em processo de degradação, sendo essa proporção pelo menos três vezes maior nas regiões mais áridas do planeta.

No Brasil, de forma geral, as pastagens possuem historicamente a função de ocupação de terra, já que outros tipos de cultura demandam maior aporte de capital e uso de tecnologia. Segundo DIAS-FILHO (2014), essas peculiaridades, se por um lado podem ser vantajosas em determinados aspectos, por outro contribuíram, e ainda contribuem, para criar uma tradição de baixo investimento no uso de tecnologia e de insumos na formação e no manejo de grande parte das pastagens brasileiras.

A principal consequência danosa dessa situação tem sido a alta incidência de pastagens degradadas no país e a estigmatização da pecuária desenvolvida a pasto, como atividade improdutiva e essencialmente danosa ao meio ambiente

Análise feita por SIMONIELLO *et al.* (2008) para a região da Itália mostrou resultado semelhante quanto à análise de persistência desse tipo de uso do solo, apontando a tendência global à degradação.

A degradação das áreas de pastagem causa impacto no regime hidrológico da bacia, por interferir na permeabilidade do solo e no tempo de concentração da bacia e por

ocasionar propensão a erosão. A análise de persistência pode se mostrar uma boa ferramenta para a identificação de áreas que merecem atenção quanto à conservação.

5.2.2 ALTITUDE

As análises de persistência foram também realizadas para grupos selecionados quanto ao relevo. Foram calculadas as probabilidades de persistências para classes de altitude definidas de 250 em 250 metros, sendo assim separadas em 11 classes para a bacia do Itapemirim. A Figura 5.10 ilustra as classes de altitude analisadas para a bacia do Itapemirim.

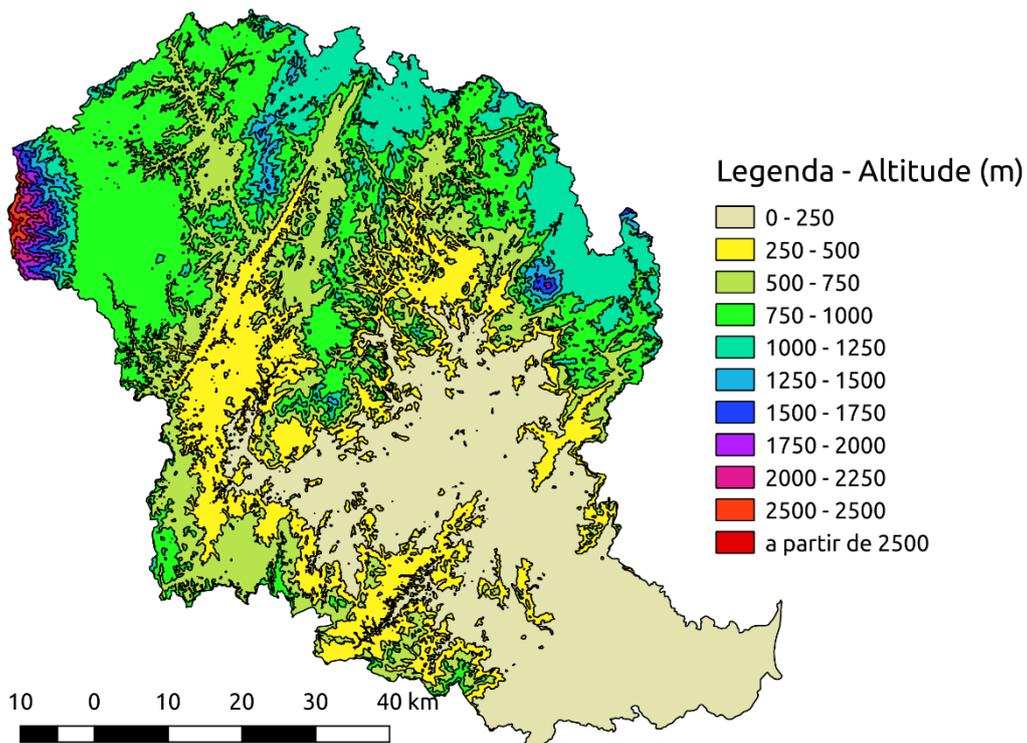


Figura 5.10 Classes de altitude para a bacia do Itapemirim de 250 m em 250 m.

As probabilidades de persistências para os diferentes intervalos de tempo para cada classe de altitude são mostradas nos gráficos da

Figura 5.11, assim como seus tempos de vida médio para o ajuste exponencial são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Tempos de vida médio da persistência para cada classe de altitude e ajuste R^2

Altitude (m)	Positivo		Negativo	
	Vida média (anos)	R^2	Vida média (anos)	R^2
250	16,07	0,85	12,39	0,86
500	14,98	0,86	17,51	0,84
750	16,77	0,90	15,29	0,86
1000	28,15	0,91	11,79	0,87
1250	35,23	0,93	10,00	0,90
1500	29,31	0,92	7,65	0,89
1750	23,50	0,92	7,42	0,90
2000	29,91	0,92	7,51	0,90
2250	27,76	0,90	8,20	0,88
2500	16,85	0,90	8,42	0,83
superior a 2500	19,14	0,89	12,63	0,87

As curvas de probabilidade de persistência (Figura 5.11) para cada classe de altitude determinada, mostram uma grande diferença no perfil característico da vegetação presente.

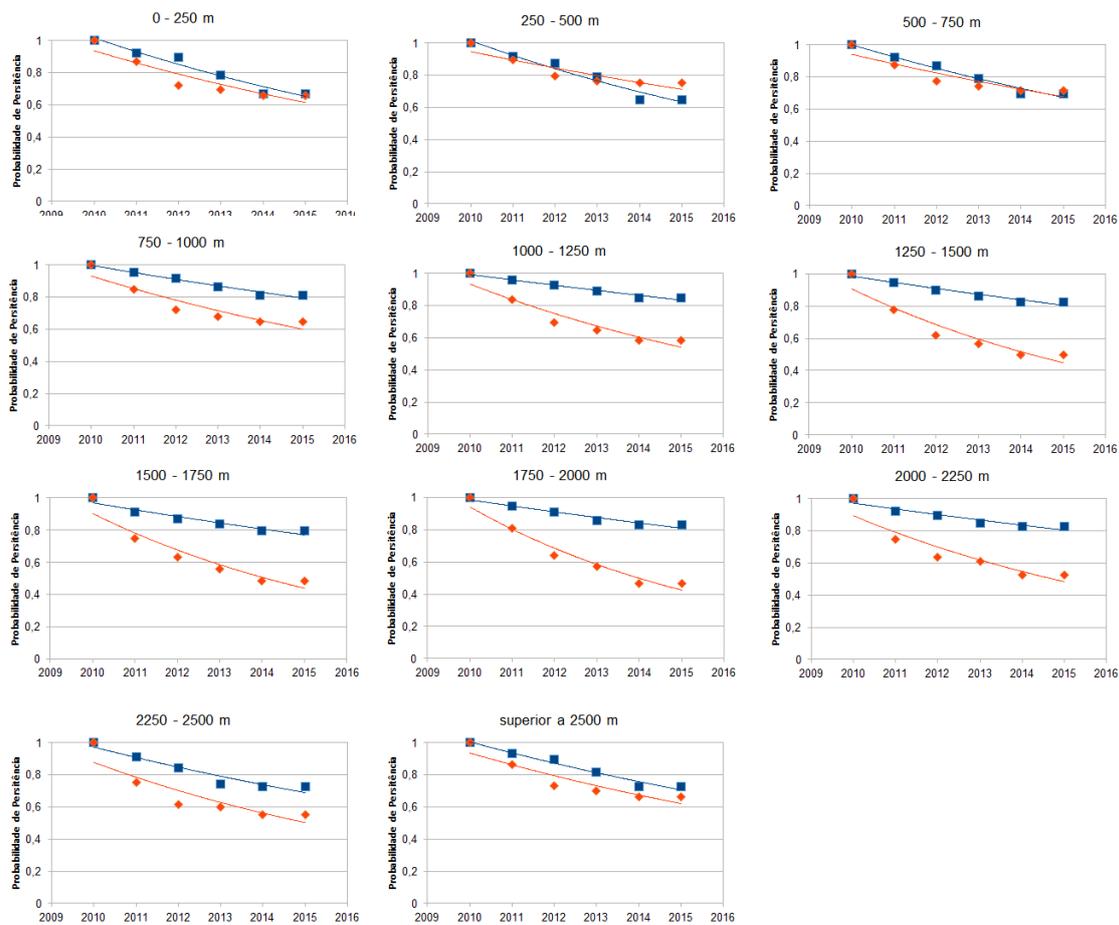


Figura 5.11 Ajuste da curva de probabilidade de persistência para as classes de altitude definidas

O contraste entre os tempos de vida média das persistências positivas e negativas para as diferentes faixas de altitude da bacia (Figura 5.12) foram obtidos através dos cálculos de probabilidade de persistência. É possível observar que as áreas mais baixas apresentam valores de vida média para persistências positivas baixos e valores de vida média para persistências negativas altos. Esse cenário mostra um indicativo de que as partes baixas da bacia se encontram com características de áreas com tendência de dificuldade de recuperação da vegetação. A classe de altitude entre 250 e 500 metros, apresenta valores de tempo médio de vida negativos superiores aos positivos.

As partes mais baixas da bacia são áreas mais planas e suscetíveis a ocupação. A identificação de tempo médio de vida negativo superior ao positivo pode estar relacionada com a maior ocorrência de pastagens e mudança de uso do solo, uma vez que essas áreas são mais suscetíveis à ocupação.

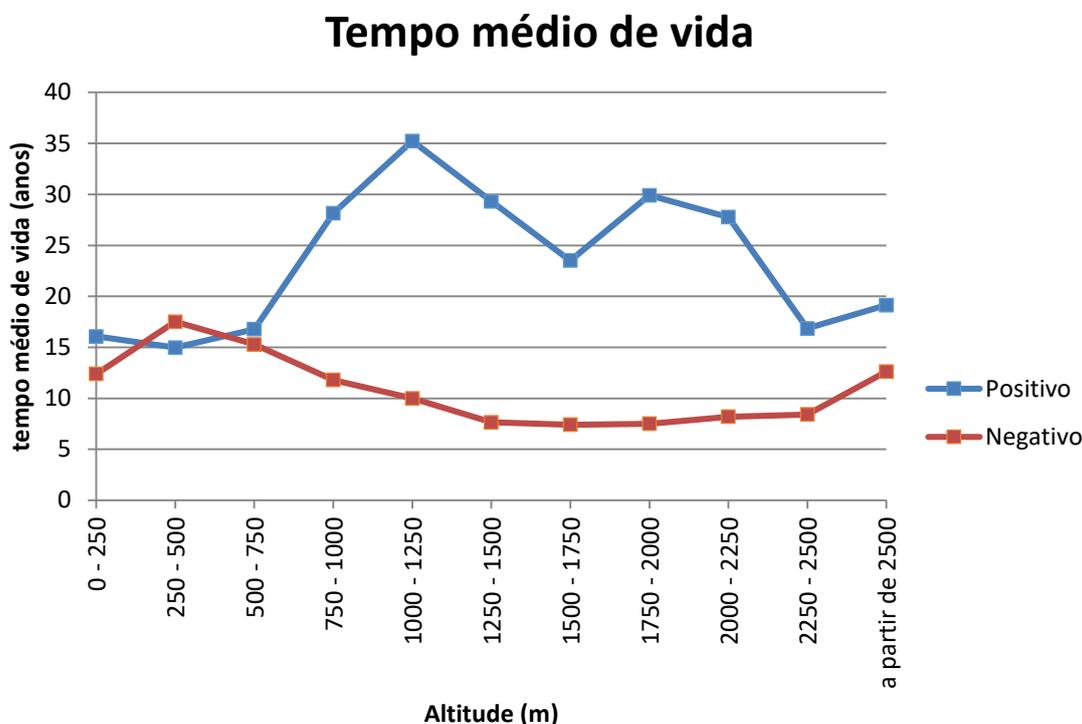


Figura 5.12 Tempo médio de vida para as persistências positivas e negativas na bacia do Itapemirim discriminadas por classes de altitude de 250 em 250 metros

Nas classes entre 750 e 2250 metros, a divergência entre os tempos médios de vida das persistências positivas e negativas são maiores, tendo seu máximo na classe de 1000 a 1250 metros de altitude. Mostram-se um indicativo de que essas classes contêm áreas onde as vegetações encontram-se com alta capacidade regenerativa.

Após os 1500 metros de altitude, as vidas médias positivas e negativas voltam a se aproximar, podendo mostrar uma fragilidade da vegetação nessa altitude. Os resultados obtidos por SIMONIELLO *et al.* (2008), para estudo realizado na Itália, mostra resultados interessantes a serem prospectados. Apesar de em seu estudo ter encontrado tempos médios de vida positivos significativamente superiores aos negativos nas regiões baixas, a partir dos 1500 metros de altitude, há a inversão das curvas, e o tempo médio de vida negativo passa a ser superior ao positivo, assim como nesse estudo.

A Figura 5.13 mostra uma curva suavizada dos valores dos tempos médios de vida para classes de 500 em 500 metros é possível observar que a partir da altitude de 1500 metros há redução na divergência entre as curvas positivas e negativas, apesar das mesmas não chegarem a se cruzarem, diferente do resultado encontrado por SIMONIELLO *et al.* (2008).

Um fato importante de ser ressaltado nessa análise está em que altitudes superiores a 1750 metros são restritas à Serra do Caparaó.

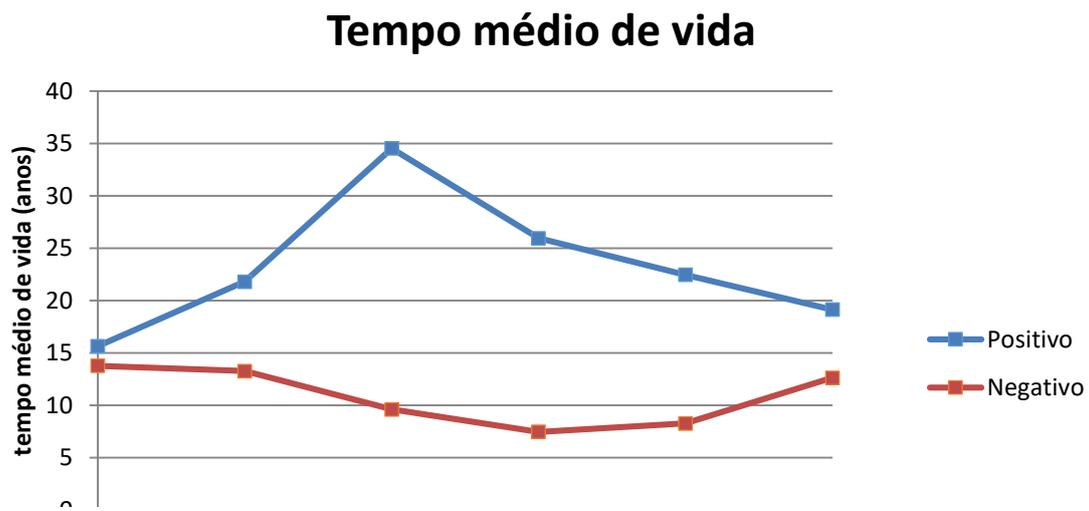


Figura 5.13 Tempo médio de vida para classes de 500 em 500 metros para a Bacia do Itapemirim

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo realizar análise do comportamento e do estado da vegetação da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, Espírito Santo, ao longo do tempo. Uma das motivações para escolha dessa área de estudo residiu no fato de se tratar de uma região produtora de café com destaque no nível nacional, tratando-se o café, no presente momento, do principal produto agrícola de exportação brasileiro. Não obstante, a bacia conta ainda com área significativa dedicada à pecuária, sobressaindo-se áreas de pastagem, entre outros usos e coberturas do solo.

Compreender o grau de degradabilidade da vegetação tornou-se mister investigar nesta pesquisa. Para tal, foi aplicado método de análise de persistência dos dados de NDVI do sensor MODIS. O NDVI é um reconhecido índice de vegetação usado em numerosas aplicações regionais e globais para estudar o estado da vegetação. Esse índice denota forte relação com variáveis hidroclimatológicas, mostrando-se como representativo do estado da vegetação.

Destaca-se que foi produzida extensa caracterização da bacia do Itapemirim, onde se buscou identificar relações entre as variáveis fisiográficas, hidroclimatológicas e de produção agrícola. Para tal finalidade, dados de sensoriamento remoto e de medição *in situ* foram levantados e analisados. Em especial, o monitoramento por satélite é, atualmente, reconhecido como relevante fonte de informações para descrição e entendimento da variabilidade da cobertura da terra, tendo em vista sua relativa acessibilidade e rapidez de aquisição, robustez e confiabilidade. Eles fornecem não apenas mapas de cobertura vegetal para serem diretamente assimilados nos modelos, mas também uma riqueza de dados sobre a dinâmica da vegetação em diferentes escalas espaciais e temporais a serem usadas para melhorar os próprios modelos.

Na sequência do texto, são discriminadas as conclusões e recomendações do trabalho.

6.1 CONCLUSÕES

A análise de persistência buscou, avaliar o comportamento da série histórica dos dados de NDVI do sensor MODIS para o período de 2000 a 2015. O método analisou pixel a pixel a persistência da tendência dos dados e o momento onde essa tendência muda de sinal ao longo da série.

Píxeis que persistem com a mesma tendência ao longo de toda a série são classificados com persistências máximas. No caso da série temporal estudada, atribuiu-se 6 para as tendências positivas e -6 para persistências negativas. Os píxeis que possuem as tendências iniciais eliminadas são classificados com o número da passagem de tempo onde é vista a mudança do sinal da tendência da série pela primeira vez, acompanhados pelo sinal que caracterizou a tendência inicial.

Classificado cada píxel, o termo de comparação para análise do estado da vegetação é o tempo médio de vida de decaimento da probabilidade de persistência ajustada a curva exponencial. Esse tempo representa, para o conjunto da vegetação, quanto tempo, em média, as tendências positivas e negativas persistem até serem eliminadas. Para uma vegetação saudável, é esperado que se apresente tempos médios de vida longos para persistências positivas em contraste aos tempos médios de vida para as persistências negativas mais curtos. Os tempos médios de vida das persistências estão associados ao tempo de resposta da vegetação a impactos, fator ligado à resiliência.

Para a análise de persistência a escolha do tempo de referência terá impacto significativo no resultado final. Para esse estudo optou-se por formular como tempo de referência os primeiros 10 anos da série histórica disponível de 16 anos.

A análise de persistência foi realizada para a totalidade da bacia, e os resultados mostraram um comportamento de vegetação saudável. De forma geral, a área investigada mostra uma boa capacidade de recuperação de distúrbios.

Em contraponto à tendência geral, uma caracterização por tipo de cobertura do solo mostra uma tendência de degradação de áreas de pastagem. Tal constatação vai de acordo com estudos globais que mostram tal tendência para esse tipo de uso do solo, principalmente ocasionados pela baixa tecnologia e investimentos empregados nas áreas desse tipo de atividade.

A vegetação nativa e a cultura do café apresentam, de forma geral, uma boa indicação de capacidade de regeneração. No entanto, uma análise da cultura do café por município mostra que, em algumas áreas, há um comportamento coletivo de indicativo de degradação, principalmente nos municípios onde as produções e produtividades são baixas.

A cultura do café na bacia do Itapemirim representa importante atividade econômica tendo crescentes aportes tecnológicos que influenciam na cultura. Desta forma, esse tipo de vegetação não apresenta um comportamento natural somente ligado às condições hidroclimáticas. A quantidade de biomassa dependerá fortemente do manejo antrópico, como podas, aporte de fertilizantes e pesticidas. Assim, a análise de persistência dos dados de NDVI desse tipo de vegetação, embora não representem o comportamento natural, é capaz de indicar que, de forma geral, há boa saúde no comportamento coletivo, indicando condições climáticas adequadas e manejo positivo das áreas de cultivo.

A análise por altitude mostrou que os tempos de recuperação médios para a vegetação abaixo de 750 metros apresentam características de áreas com processos degradativos. A partir dos 750 metros, os tempos médios de vida mostram características de uma vegetação com boas condições. Os tempos médios de vida positivos e negativos voltam a se aproximar nas altitudes superiores à 2250 metros. Essas áreas são restritas à Serra do Caparaó, que embora seja uma unidade de conservação, abrangendo um Parque Nacional, não apresenta características forçosamente de vegetação com boa capacidade de resiliência. A área, além de grandes altitudes, é também caracterizada por alta declividade, vegetação nativa e afloramento rochosos.

Uma das principais vantagens encontradas por esse método como escopo de análise da série de NDVI é sua simplicidade e facilidade de aplicação. A abordagem anual proporciona uma boa primeira indicação da saúde da vegetação, abrindo o campo para estudos mais locais de investigação. A identificação de mudança nos padrões é o primeiro passo no sentido de encontrar suas causas e propor soluções.

A persistência das características da vegetação está relacionada ao conceito de resiliência, conceito fundamental para entender a vegetação como um componente dinâmico do sistema climático. Ela expressa a capacidade dos ecossistemas de tolerar distúrbios e recuperar seu estado inicial. Os tempos de recuperação são parâmetros básicos da resposta da vegetação e, portanto, são essenciais para descrever a vegetação dentro dos modelos dinâmicos. A vegetação saudável tende a se recuperar rapidamente

de choques e a persistir no crescimento e expansão. Pelo contrário, o estresse climático e antrópico pode reduzir a resiliência, favorecendo a diminuição persistente da atividade da vegetação.

Os tempos médios de recuperação para uma área dependem de muitos fatores relacionados ao tipo de vegetação, recursos, clima local, entre outros. Na presença de recursos suficientes, assimetria entre os padrões negativos e positivos é o resultado esperado, uma vez que a vegetação tende a se desenvolver. Este é o caso avaliado na bacia do Itapemirim, onde o tempo médio de vida das persistências positivas é bastante superior àquele das persistências negativas. Qualquer desvio desse cenário é uma indicação de comportamentos coletivos de baixa resiliência, caso específico das pastagens.

Estimar os tempos de recuperação da vegetação pode fornecer parâmetros dinâmicos para caracterizar o estado atual da cobertura vegetal. Se corretamente relacionados a aspectos estruturais, antrópicos e climáticos do território em questão, esses tempos podem fornecer informações úteis sobre as interações complexas dentro da dinâmica hidrológica e climática.

Os resultados mostram que a análise de persistência pode ser útil para capturar escalas de tempo características da atividade de cobertura vegetal através dos tempos médios de decaimento das probabilidades de persistência. No contexto de modelos climáticos, a probabilidade de persistência baseada em dados de sensoriamento remoto fornece uma primeira estimativa dessas escalas de tempo, sendo essas úteis para entender a dinâmica da vegetação em escalas de clima regionais e globais.

Considerando suas aplicabilidades, a análise de persistência do NDVI pode fornecer informações importantes no apoio a órgãos locais de proteção ambiental no que diz respeito à identificação de áreas com processos degradativos de longo prazo, assim como para avaliar a eficiência das estratégias de proteção. A probabilidade de persistência fornece informações dinâmicas úteis para serem integradas a modelos de degradação de terras para identificar áreas onde desvios negativos de condições estacionárias tendem a processos de degradação ou com uma boa probabilidade de recuperação.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Inicialmente, recomenda-se priorizar o desenvolvimento de estudos futuros no sentido de destacar áreas de mudança de uso do solo, contemplando uma análise em separado quanto às alterações dos dados de NDVI.

Em segundo lugar, propõe-se a validação da situação ambiental das áreas caracterizadas com persistência negativa, requerendo que se invista em estudos dessa natureza no local. Um mapeamento de campo de áreas degradadas seria interessante para comparação dos resultados encontrados. Adicionalmente, em eventual pesquisa de campo vindoura, o método de análise de persistência pode indicar áreas prioritárias para mapeamento.

A definição de áreas com persistências positivas e negativas abre um campo de estudo no sentido de melhor entender os processos relacionados. Um estudo em separado de variáveis hidroclimáticas, especialmente a evapotranspiração, pode conter informações interessantes quanto a diferença de padrões entre essas duas classes. Uma análise dos padrões sazonais nas áreas classificadas como positivas e negativas pode caminhar no sentido do entendimento dos processos envolvidos.

Quanto ao método da análise de persistência, tendo em vista que a escolha do tempo de referência representa um parâmetro importante da análise, recomenda-se investigações sobre a sensibilidade do método quanto a escolha desse parâmetro nos resultados de persistência. Notadamente, para a análise individual de cada pixel a escolha do período inicial será determinante, porém a de se averiguar o impacto no comportamento coletivo e nos tempos característicos, obtidos pela probabilidade de persistência.

O método empregado deve sua simplicidade e facilidade de uso, entre outras coisas, a análise anual. A partir dos resultados encontrados, é possível trazer à discussão a possibilidade de incorporar nessa análise mais dados que contemplem também a sazonalidade. É de interesse avaliar a inclusão de dados de NDVI por estação do ano, ou mesmo mensais no sentido de expor a robustez e sensibilidade do método.

Apesar de ter sido explorada a relação entre os valores de NDVI e demais variáveis hidroclimatológicas, um aspecto a ser melhor estudado é a relação entre a persistência dos dados de NDVI e demais dados climatológicos especializados.

Igualmente, propõem-se realizar a análise de persistência quanto ao tipo de solo da bacia, a fim de investigar o impacto que esse fator pode exercer sobre a evolução da vegetação.

Os resultados desse trabalho podem também, futuramente, ser comparados com os dados provenientes da série Landsat, que possui uma série mais longa e com menor resolução espacial, compatível com a escala de bacia hidrográfica.

A operacionalização deste método pode torná-lo possível de ser aplicado em áreas mais extensas e inclusive com a aplicação de diferentes produtos mais adequados à maiores escalas, como AVHRR, que apresenta maior resolução espacial (1 Km) e uma série histórica mais extensa. Nesse sentido, seria interessante futuros estudos onde o método seja aplicado a nível nacional, podendo os resultados serem comparados com indicadores de seca para complementação do diagnóstico de áreas com padrões de processo de desertificação.

Espera-se que o presente trabalho contribua para o avanço do entendimento da dinâmica da vegetação e investigação dos processos hidrológicos levando-se em consideração processos agrícolas que hoje representam importante setor econômico para o país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, K. N., Análise de desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a região hidrográfica do rio Itapemirim, Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória, 125 p., 2017.
- ANA, Bacias hidrográficas do Espírito Santo, 2015.
- ANA, HidroWeb, Inventário.
<<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=6010>> Acessado em 01 de maio de 2018, 2018.
- ANEEL, HIDRO-PLU - Programa de homogeneização de dados pluviométricos, 2012.
- APLIN, P., Remote sensing: Land cover. *Progr. Phys. Geogr.*, 28, p. 283–293, 2004.
- ARAUJO, L. M. N., Identificação de padrões hidrológicos de precipitação e de umidade do solo na bacia hidrográfica do rio Piabanha, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 250 p., 2016.
- ASNER, G. P., NEPSTAD, D., CARDINOT, G., RAY, D., Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy, *PNAS*, v. 101, n. 16, pp. 6039–6044, 2004.
- BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F., HUETE, A. R., A review of vegetation indices, *Remote Sensing Reviews*, v. 13, pp. 95-120, 1995.
- BARBOSA, B. C., RESENDE, L DE O., PREZOTO, F., GONÇALVES, E. L., Tópicos em Sustentabilidade & Conservação, Juiz de Fora, MG: Edição dos autores, 107 p., 2017.
- BARRETO, P.; SARTORI, M; DADALTO, G.G., Levantamento de áreas agrícolas degradadas no estado do Espírito Santo, Documento Resumo, Vitória, ES, 2012..

- BATISTA, G. T., SHIMABUKURO, Y. E., LAWRENCE, W. T., The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, v. 18, n. 15, pp. 3195–3210, 1997.
- BERNARDES, T., ALVES MOREIRA, M., ADAMI, M., & FRIEDRICH THEODOR RUDORFF, B., Monitoring biennial bearing effect on coffee yield using MODIS remote sensing imagery. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 3760–3763, 2012.
- BISPO, R.C., Utilização de dados do sensor MODIS no monitoramento e mapeamento da cultura de café, *Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP*, 69 p., 2013.
- CAMARGO, A. P., *Clima e a cafeicultura no Brasil, Informe Agropecuário*, n. 126, pp. 13-26, 1895.
- CAMPBELL, J. B., *Introduction to remote sensing*, 2 ed, New York-London, The Guilford Press, 622 p., 1996.
- CHEMURA, A., MUTANGA, O., DUBE, T., Integrating age in the detection and mapping of incongruous patches in coffee (*coffea arabica*) plantations using multi-temporal Landsat 8 NDVI anomalies, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 57, pp. 1–13, 2017.
- CHG, Climate Hazards Group, disponível em <http://chg.ucsb.edu/data/chirps/>, acessado em 15 de abril de 2018, 2018.
- CHUAI, X. W., HUANG, X. J., WANG, W. J., BAO, G. NDVI, Temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998-2007 in inner Mongolia, China, *International Journal of Climatology*, 33, pp. 1696 - 1706, 2013.
- CONAB, 4ª Estimativa da Safra de Café da Companhia Nacional de Abastecimento, disponível em http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf; acessado em 06 de maio de 2018, 2016.

- COPPIN, P., Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review, *International Journal of Remote Sensing*, Taylor e Francis Ltd., n. 9, p. 1565-15962004.
- CUNHA, T. M., Modelagem hidrológica em regiões pouco monitoradas com suporte de umidade do solo - estudo de caso: bacia do alto rio de Contas/BA e bacia experimental de Caetité/BA, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 249 p., 2016.
- DAMATTA, F. M.; RENA, A. B. Relações hídricas no cafeeiro, In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 1., Poços de Caldas, Brasília, DF: Embrapa Café, , pp. 9-44, 2000.
- DAMATTA, F.M.; RENA, A. B., Ecofisiologia de cafezais sombreados a pleno sol, In: ZAMBOLIM, L. (Ed) - O estado da arte e tecnologia na produção de café, Viçosa: UFV, pp. 93-135, 2002.
- De CAMARGO, Â. P., De CAMARGO, M. B. P., Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil, *Bragantia*, 60(1), pp. 65–68. 2001.
- DIAS, F. S. Definição de rede adaptativa de monitoramento hidrometeorológico com suporte de sensoriamento remoto na bacia do Dois Rios - RJ. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ., Brasil. 272 p. 2014.
- DIAS-FILHO, M. B., Diagnóstico das pastagens no Brasil – Belém, PA : Embrapa Amazônia Oriental, Documentos / Embrapa Amazônia Oriental, 36 p., 2014.
- DIDAN, K., SOLANO, R., JACOBSON, A., HUETE, A., MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). v.3, 32 p., 2015.
- ECKERT, S., HÜSLER, F., LINIGER, H., HODEL, E., Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *Journal of Arid Environments*, v. 113, pp. 16 – 28, 2015.

- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1), 1979.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Produção de café cereja descascado – equipamentos e custo de processamento, ISSN 2179-7757, Brasília, DF, setembro, 16 p., 2013.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Lavadores e sistema de reúso da água no preparo do café, ISSN 2317-2029, Brasília, DF, janeiro, disponível em <https://www.embrapa.br/>, acessado em 2 de outubro de 2015, 2014.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/index.html> Acessado em: 16 de março de 2018, 2018.
- EMBRAPA CAFÉ, Fenologia do Cafeeiro: Condições Agrometeorológicas e Balanço Hídrico do Ano Agrícola 2004–2005, 128 p., 2009.
- EMBRAPA CAFÉ, Cafeicultura brasileira bate recorde histórico com produtividade média de 26,33 sacas por hectare em 2016 - Portal Embrapa, disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/20390524/cafeicultura-brasileira-bate-recorde-historico-com-productividade-media-de-2633-sacas-por-hectare-em-2016>, acessado em 29 de outubro de 2018, 2017.
- ESA, SMOS, disponível em <https://earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-missions/smos/sensor-modes>, acessado em 05 de abril de 2018, 2018.
- FEDDEMA, J. J.; OLESON, K. W.; BONAN, G. B.; MEARN, L. O.; BUJA, L. E.; MEEHL, G. A.; AND WASHINGTON, W. M., The importance of land-cover change in simulating future climates, *Science*, 9, 310(5754), pp. 1674–1678, doi:10.1126/science.1118160, 2005.

- FERRÃO, M. A. G.; FERRÃO, R. G.; FORNAZIER, M. J.; PREZOTTI, L. C.; FONSECA, A. F. A.; ALIXANDRE, F. T.; COSTA, H; ROCHA, A.C.; MORELL, A. P.; MARTINS, A. G.; SOUZA, E. M. R.; ARAÚJO, J. B. S.; VENTURA, J. A.; CASTRO, L. L. F.; GUARÇONI, R. C. , Técnicas de produção de café arábica: renovação e revigoramento das lavouras no estado do Espírito Santo. Vitória, ES: Incaper, 2008.
- FREDERICO, S., Cafeicultura científica globalizada e as montanhas capixabas: a produção de café arábica nas regiões do Caparaó e serrana do Espírito Santo. Revista Sociedade & Natureza, v. 25,n. 1, p. 7-20, 2012.
- FUNK, C., The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. Nature, Scientific Data, v. 2, pp. 1-21. 2015.
- G4G, Topographic Wetness Index (TWI), disponível em <http://gis4geomorphology.com/topographic-index-model/>, acessado em 09/10/2017, 2016.
- GASPARINI, K. A. C., Regionalização de vazões para a bacia do rio Itapemirim, Dissertação de Mestrado, EFES - JERÔNIMO MONTEIRO,ES, 78 p. , 2014.
- GOBBO, S. A. A., GARCIA, R. F., ALVAREZ, C. R., EUGENIO, F. C., AMARAL, A. A., Caracterização Sociocultural das Propriedades Rurais do Entorno do Parque Nacional do Caparaó. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 11, n. 22; p. 83- 99, 2015.
- GOEL, N. S., Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data, Remote Sensing Reviews, v. 4, pp. 1-21, 1988.
- GOMES, V., Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul / sudoeste do estado de Minas, Dissertação de Mestrado, INPE- São José dos Campos, SP, 142 p., 2007.
- GOWARD, S. N., DYE, D. G., TURNER, S., YANG, J., Objective assessment of the NOAA global vegetation index data product, International Journal of Remote Sensing, v. 14, n. 18, pp.3365–3394, 1993.

- GURGEL, H. C; FERREIRA, N. J; LUIZ, A. J. B., Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, , Campina Grande, PB, DEAg/UFCG, v.7, n.1, pp.85-90, 2003.
- HEUMANN, B. W., SEAQUIST, J. W., EKLUNDH, L., AND J'ONSSON, P., AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan Africa, 1982–2005, Remote Sens. Environ., 108(4), pp. 385–392, 2007.
- HOLBEN, B. N., Characteristic of maximum value composite images from temporal AVHRR data, Int. J. Remote Sens., 17(6), pp. 1093– 1105, 1986.
- HOTT, M. C., CARVALHO, L. M. T., ANTUNES, M. A. H., ALVES, H. M. R., ROCHA, W. S. D., Estimativa de expoentes de Hurst para séries temporais de imagens NDVI/ MODIS em regiões de pastagens da zona da mata de Minas Gerais, Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa, PB, Brasil, 2015.
- HURST, H. E., Long-term storage capacity of reservoirs, Trans. Am. Soc. Civil Eng., v.116, pp. 770- 880, 1951.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, A geografia do café – dinâmica territorial da produção agropecuária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 136 p., 2016.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Base SIDRA, Produção agrícola municipal, disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>, acessado em 06 de janeiro de 2017, 2017.
- IEMA- Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, disponível em <http://www.meioambiente.es.gov.br/default.asp>, acessado em 20 de março de 2017, 2017.

IEMA- Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Levantamento aerofotogramétrico, apoio de campo, aerotriangulação, restituição da hidrografia, geração do modelo digital de elevação, geração do modelo digital de terreno, restituição da altimetria, elaboração de ortofotomosaicos e mapeamento da cobertura vegetal nativa e do uso das terras em escala igual, ou melhor, a 1/25.000, do estado do Espírito Santo, Ortofotomosaico (RGB/ RGBIr), UTM, Datum SIRGAS2000, Zona 24s,1:10.000 PEC "A", 2015.

IEMA- Instituto Estadual do meio Ambiente e Recursos Hídricos, , Levantamento aerofotogramétrico, apoio de campo, aerotriangulação, elaboração de ortofotomosaicos, modelo digital de elevação e mapeamento da cobertura vegetal nativa e do uso das terras em escala igual, ou melhor, a 1/25.000, do estado do Espírito Santo, Ortofotomosaico (RGB) 2007/2008, píxel 1m x1 m, UTM, Datum WGS84, Zona 24s,1:15.000 PEC "A", 2007.

IFREMER , SMOS – Sea Surface Salinity. disponível em <http://www.salinityremotesensing.ifremer.fr/activities/smos>, acessado em 05 de abril de 2018, 2018.

JI, L., PETERS, A.J., Abstract Lag and seasonality considerations in evaluating AVHRR NDVI response to precipitation, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.,p. 1053-1061, DOI: 10.14358/PERS.71.9.1053, 2005.

JIN, S. M., SADER, S. A., 2005, MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects, Remote Sensing of Environment, 99(4), pp. 462 – 470.

JOBARD, I., Status of satellite retrieval of rainfall at different scales using multisource data, Megha-Tropiques, 2nd Scientific Workshop, Paris, França., 2001.

JÚNIOR, C. A. D. S., Análise regional de funções hidrológicas aplicáveis à avaliação de vazões mínimas nas bacias hidrográficas dos rios Itapemirim e Itabapoana (ES). Dissertação de Mestrado, UFES, ES, 238 p., 2014.

JÚNIOR, W., MARIN, M., VOLPATO, L., MARIA, H., ALVES, R., GROSSI, T., SOUZA, D. O., Variação temporal do índice de vegetação de lavouras cafeeiras utilizando produtos do sensor modis, VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés, 2009.

- LANFREDI, M., SIMONIELLO, T., MACCHIATO, M., Temporal persistence in vegetation cover changes observed from satellite: Development of an estimation procedure in the test site of the Mediterranean Italy, *Remote Sensing of Environment*, v. 93, n. 4, pp. 565–576, 2004.
- LEITE, E. A. Gestão do Valor da Informação Hidrometeorológica: O Caso dos Alertas de Inundação para Proteção de Bens Móveis em Edificações Residenciais de União da Vitória. Tese de Doutorado.. Rio de Janeiro, COPPE. 224 p. 2008.
- LIANG, S., Quantitative remote sensing of land surfaces, ed. Wiley Interscience, New Jersey, USA, 534 p., 2004.
- LOPES, H.L., ACCIOLY, L.J.O., SILVA, F.H.B.B., SOBRAL, M. do C.M., ARAÚJO FILHO, J. C. de, CANDEIAS A. L. B. Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.9, pp. 973–980, 2011.
- LUCENA, A.J., ROTUNNO FILHO, O.C., FRANÇA, J.R.A, PERES, L.F., XAVIER, L.N.R. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro, *Theoretical Applied Climatology*, doi: 10.1007/s00704-012-0668-0, 2012.
- MACEDO, M. C. M., ZIMMER, A. H., KICHEL, A. N., ALMEIDA, R. G. ; ARAUJO, A. R. , Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação, *Anais do Encontro de Adubação de Pastagens da Scot Consultoria - Tec - Fértil*, 1., Ribeirão Preto, SP, Bebedouro: Scot Consultoria, pp. 158-181, 2013.
- MATHER, P. M., *Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction*, Chichester: Wiley, 64 p., 1987.
- MATIELLO, J. B. O., *Café: do cultivo ao consumo*, Coleção do agricultor: Grãos, São Paulo: Globo, 320p., 1991.
- MATIELLO, J. B., SANTINATO, R., GARCIA, A. W. R., ALMEIDA, S. R., FERNÁNDEZ, D. R., *Cultura de café no Brasil: novo manual de recomendações*, Rio de Janeiro: MAPA/Procafé, 434 p., 2002.

- MENESES, P. R., ALMEIDA, T de. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: CNPQ, 276 p., 2012.
- MOLINARI, B. S. Modelagem espacial da qualidade de água na bacia do rio Piabanha/RJ. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R J., Brasil. 204 p. 2015
- MOREIRA, M. A., ADAMI, M., THEODOR, F., Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 39(3), pp. 223–231, 2004.
- MYNENI, R. B., HALL, F. G., SELLERS, P. J., MARSHAK, A. The interpretation of spectral vegetation indexes, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 33, pp. 481–486, 1995.
- NASA-GES-DISC, Webinar: Products and Services at the NASA GES DISC. Disponível em: <https://earthdata.nasa.gov/user-resources/webinars-and-tutorials/gpm-and-trmm-webinar-24-aug-2016> Acessado em: 20 de novembro 2016, 2016.
- NGUYEN, T. T. H., de BIE, C. A. J. M., ALI, A., SMALING, E. M. A., HOANH, C. T., Mapping the irrigated rice cropping patterns of the Mekong delta. Vietnam through hypertemporal SPOT NDVI image analysis. International Journal of Remote Sensing, 33, 415–434, 2012.
- NICÁCIO, R. M., ARAUJO, L. L., GONZAGA, E. P., LIBOS, M. I. P. C., OLIVEIRA, L. M. T. , Relação NDVI e precipitação na bacia do rio Coxim – MS, 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá, 7-11 novembro 2009, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, pp.537-547, 2009.
- NICÁCIO, R. M., Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco. Tese de Doutorado. COPPE. UFRJ, Rio de Janeiro. 320 p. 2008.
- NOAA, NOAA KLM Users Guide disponível em <https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/satellite/publications/podguides/N-15%20thru%20N-19/pdf/0.0%20NOAA%20KLM%20Users%20Guide.pdf>, acessado em 08 de janeiro de 2018, 2014.

- NOVO, E. M. L. M., Sensoriamento remoto: princípios e aplicações, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 308 p., 1989.
- O'MALLEY, R., WING, K., Forging a new tool for ecosystem reporting. *Environment* 42, pp. 21–31, 2000.
- ODUM, H. T., *Systems Ecology; an introduction*, 644 p., 1983.
- OLIVEIRA, L. M. T., NICÁCIO, R. M., ARAUJO, L.L., GONZAGA, E.P., LISBO, M.I.P.C. Relação NDVI e precipitação na bacia do rio Coxim – MS, Anais 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá, 7-11 novembro 2009, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, pp.537-547, 2009.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ, Relatório sobre o mercado de café, 7 p., 2016.
- PACA, V. H. M., Análise de informações satelitais e dados convencionais da rede pluviométrica como contribuição à modelagem hidrológica na região Amazônica – estudo de caso: bacia do rio Guamá-Pará, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 121 p., 2008.
- PANDURO, I. L. V., Análise estocástica e identificação de padrões de variabilidade espaço-temporal da precipitação no sudeste brasileiro e Amazônia, Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 256 p., 2018.
- PAZ, A. R., 2004. Hidrologia Aplicada. Texto Básico. Disponível em http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERGS.pdf , acessado em 14 de agosto de 2018.
- PEZZOPANE, J. R. M., PEDRO JÚNIOR, M. J., CAMARGO, M. B. P. , THOMAZIELLO, R. A., Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro arábica. *Bragantia*, Campinas, v. 62, n. 3, pp. 501-505, 2003.
- PICINI, A.G., CAMARGO, M.B.P., ORTOLANI, A. A., FAZUOLI, L.C., GALLO, P.B., Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro, *Bragantia*, Campinas, v. 58, n.1, pp. 157-170, 1999.

- PIELKE, R. A., AVISSAR, R., RAUPACH, M., DOLMAN, A. J., ZENG, X., DENNING, A. S., Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate, *Global Change Biol.*, 4, pp. 461–475, 1998.
- QGIS Development Team, QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>, 2019.
- REDNER, S., A guide to first passage processes. pp. 307. Cambridge, UK7 Cambridge University Press, ISBN: 0-521-65248-0, 2001.
- REIS, J. A. T., CAIADO, M.A.C., BARBOSA, J. F., MOSCON, M., MENDONÇA, A. S. F., Análise regional de vazão mínima de referência na região centro-sul do estado do Espírito Santo, *Revista CIATEC – UPF*, v. 5, n. 2, pp. 1-11, 2013.
- RESERVA GOURMET, <http://www.reservagourmet.com.br/conteudo/producao-cafe-reserva-gourmet/21>, acessado em 16 de outubro de 2018, 2018.
- ROSA, V. G. C. , Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul / sudoeste do estado de Minas, Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP, 142 p., 2007.
- SÁ, I. I.D., GALVÍNCIO, J.D., MOURA, M.S.B., SÁ, I.B., Uso do índice de vegetação da diferença normalizada (IVDN) para caracterização da cobertura vegetal da região do Araripe pernambucano, In: *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 01, n. 01, mai/ago, pp. 28-38, 2008.
- SANTOS, R. C. Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ., Brasil. 153 p. 2002.
- SATLER, M. A, Variabilidade espacial de atributos de um argissolo vermelho-amarelo sob pastagem e vegetação nativa na bacia hidrográfica do Itapemirim, Dissertação de Mestrado. UFES, ES, XXX p., 2006.
- SEDIYAMA, G. C., MELO JUNIOR, J. C., SANTOS, A. D., RIBEIRO, A., COSTA, M. H., HAMAKAWA, P. J., Costa, L. C. , Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais, *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9(3), pp. 501-509, 2001.

- SELLERS, P., HALL, F., MARGOLIS, H., KELLY, B., BALDOCCHI, D., DEN HARTOG, G., CIHLAR, J., RYAN, M. G., GOODISON, B., CRILL, P., RANSON, K. J., LETTENMAIER, D., WICKLAND, D. E., The boreal ecosystem-atmosphere study (BOREAS): an overview and early results from the 1994 field year, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 76(9), pp. 1549–1577, 1995.
- SILVA JUNIOR, C. A., REIS, J. A. T., CAIADO, M. A. C., Análise regional de curvas de permanência de vazões para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim (ES), In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2013.
- SILVA, A. G. L., Análise da paisagem com suporte de geotecnologia como subsídio para a gestão urbano-hídrica – estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ. – Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, 181 p., 2014.
- SILVA, W. L. Características Climáticas e Hidrológicas, Tendências Detectadas e Cenários Futuros para o Setor Elétrico Brasileiro. Tese de Doutorado. COPPE. UFRJ, Rio de Janeiro. 320 p. 2018.
- SIMONIELLO, T., LANDREDI, M., LIBERTI, M., COPPOLA, R., MACCHIATO, M., 2008, Estimation of vegetation cover resilience from satellite time series. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. p. 511-546., 2008.
- SOUSA PINTO, N. L.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. *Hidrologia Básica*. Edgard Blücher, São Paulo., 278 p., 1976.
- SOUZA, V.A.S. Avaliação hidrossedimentológica com suporte do modelo SWAT na Amazônia ocidental – bacia do rio Machadinho/RO. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ., Brasil. 195 p. 2015.
- SUN, C., WEE, W. G. SUN, Chengjun; WEE, William G. Neighboring gray level dependence matrix for texture classification. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, v. 23, n. 3, p. 341-352, 1983.

- TEIXEIRA, S.M.; MILHOMEM, A.V.; RIBEIRO, G.C.; BÉRGOLI, Ê.; MOLIM, M.; VEGRO, C.L.; GARCIA, R.D.C.; FRANZIN, M.A.P.; ASSUMPÇÃO, R.; FELIPE, M.P. E MILHOMEM, S.V., Custos de Produção na Cafeicultura Brasileira. Anais do II Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, pp. 2188 – 2197, 2001.
- TRABAQUINI, K., MIGLIORANZA, É., FRANÇA, V. D., NETO, O. C. P., Caracterização do meio físico em lavouras cafeeiras utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto no noroeste do estado do Paraná. Simpósio de Pesquisa dos cafés do Brasil (6. : 2009 : Vitória, ES). Anais Brasília, D.F: Embrapa – Café. 6 p. 2009.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, Land degradation in drylands (LADA): GEF grant request. Nairobi, Kenya, 2004.
- USGS, Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km, disponível em https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13a2_v006., acessado em 09 de março 2017, 2017.
- USGS, disponível em: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM>, acessado em: 18 de novembro de 2018, 2018.
- VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; NEWNHAM, G.; CULVENOR, D., Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. Remote Sensing of Environment 114. 106–115. doi:10.1016/j.rse.2009.08.014, 2010.
- VERSTRAETE, M. M., PINTY, B., Designing spectral indexes for remote sensing applications, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, v. 34, pp.1254–1265, 1996.
- VIANA, L. Q., Avaliação do Potencial de Regionalização Hidrológica do Modelo Chuva-Vazão SMAP na Bacia do Rio Preto usando NDVI, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, XXX p., 2012. VIANA, I. Q., GONÇALVES, R.C, ROTUNNO FILHO, O.C. , Avaliação espaço-temporal do NDVI com a precipitação e com a evapotranspiração na bacia do rio Preto RJ/MG, XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2013.

- VICTORIA, D. C.; OLIVEIRA, A. F.; GREGO, C. R. Análise harmônica de séries temporais de imagens NDVI/MODIS para discriminação de coberturas vegetais. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, v. 14, p. 1589–1596. 2009.
- WANG, A., PRICE, D. T., ARORA, V. , Estimating changes in global vegetation cover (1850–2100) for use in climate models, *Global Biol. Cy.*, 20, GB3028, doi:10.1029/2005GB002514, 2006.
- WAYLEN, P. SOUTHWORTH, J., GIBBES, C., TSAI, H., Time series analysis of land cover change: Developing statistical tools to determine significance of land cover changes in persistence analyses. *Remote Sensing*, v. 6, n. 5, pp. 4473–4497, 2014.
- WWRP/WGNE (World Weather Research Programme /Working Group on Numerical Experimentation). Forecast Verification - Issues, Methods and. Disponível em: <http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/verif_web_page.html>. Acessado em: 20 fevereiro de 2019, 2019.
- XAVIER, L. N. R., Análise da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo Topmodel, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 124 p., 2002.
- YAFEE, R. A., MCGHEE, M., Introduction to time series analysis and forecasting with applications of SAS and SPSS. San Diego, CA: Academic Press. 528 p., 2000.
- ZAVALETA, E. S.; THOMAS, B. D.; CHIARIELLO N. R.; ASNER G. P.; SHAW, M. R.; AND FIELD, C. B., Plants reverse warming effect on ecosystem water balance, *PNAS*, 100(17), pp. 9892–9893, 2003.

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DA CULTURA DO CAFÉ

A.1 FENOLOGIA DO CAFÉ

A fenologia pode ser definida como o estudo dos eventos periódicos da vida de uma planta em função da sua reação às condições do ambiente. Segundo GOUVEIA (1984) *apud* De CAMARGO e DE CAMARGO (2001), a maioria das plantas emite as inflorescências na primavera e frutificam no mesmo ano fenológico (EMBRAPA Café, 2009). O *café arábica* é uma planta especial, que necessita de dois anos para completar o ciclo fenológico, sendo distinguidas duas fases durante seu ciclo: preparativa ou vegetativa e construtiva ou reprodutiva para as condições de cultivo na maioria das regiões do Brasil. No período seco, associado a baixa temperatura, ocorre a fase preparativa. Durante o período quente e chuvoso, predomina a fase construtiva, quando se manifestam as atividades de crescimento dos ramos, folhas, gemas, flores e frutos (ORTOLANI *et al.*, 1970 *apud* ROSA, 2007).

A fenologia do cafeeiro *arábica* foi definida e esquematizada por De CAMARGO e DE CAMARGO (2001) (Figura A.1) para as condições tropicais do Brasil e está relacionada com as condições agrometeorológicas de cada ano. A esquematização das diferentes fases fenológicas do cafeeiro permite identificar quais delas são mais exigentes em água, facilmente disponível no solo, e as que necessitam da ocorrência de um pequeno estresse hídrico para condicionar uma florada abundante.

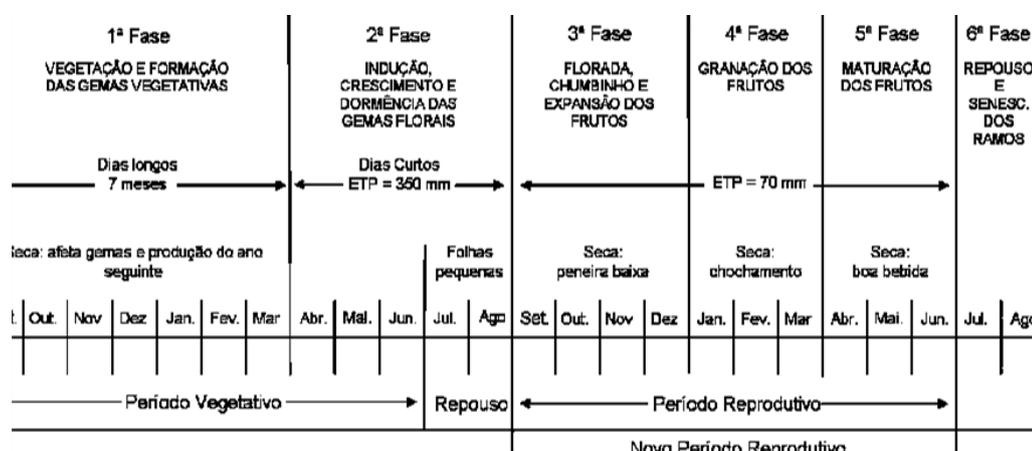


Figura A.1 Ciclo fenológico bienal do café. Fonte: DE CAMARGO E DE CAMARGO, 2001.

A Figura A.1 apresenta o ciclo fenológico que, para as condições tropicais do Brasil, pode ser subdividido em seis (6) fases bem distintas, sendo duas vegetativas e quatro reprodutivas: 1^a) vegetação e formação de gemas foliares; 2^a) indução e maturação das gemas florais; 3^a) florada; 4^a) granação dos frutos; 5^a) maturação dos frutos; e 6^a) repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários.

No Brasil, toda a cafeicultura está situada em áreas com latitudes superiores a 4°S, encontrando-se fenologicamente em condições tropicais, não equatoriais. Apresenta um ciclo fenológico bem definido: florescimento na primavera, frutificação no verão, maturação no outono e colheita no inverno (CAMARGO, 1985 *apud* EMBRAPA CAFÉ, 2009).

Geralmente, o cafeeiro *arábica* é afetado, nas suas diversas fases fenológicas, pelas condições ambientais, em especial pela variação fotoperiódica e pelas condições meteorológicas, principalmente pela distribuição pluviométrica e pela temperatura do ar, que interferem não apenas na fenologia, mas também na produtividade e na qualidade da bebida.

A primeira fase fenológica do cafeeiro ocorre normalmente de setembro a março, chamada “vegetação e formação das gemas vegetativas”. São meses de dias longos, onde a planta encontra períodos de exposição solar superiores a 12 horas.

A fase seguinte, “indução, diferenciação, crescimento e dormência das gemas florais”, ocorre de abril a agosto. As gemas florais entram em estágio de desenvolvimento e, posteriormente, em dormência, onde ficam prontas para a antese, quando acontece um aumento substancial de seu potencial hídrico, causado por chuva ou irrigação. Nos meses de julho e agosto, as gemas dormentes produzem um par de folhas pequenas, etapa essa que separa o primeiro ano fenológico do segundo.

A fase seguinte é caracterizada pela granação dos frutos (4^a fase), fase onde os grãos são formados a partir da solidificação dos líquidos internos. Essa fase ocorre de janeiro a março, e necessita de boa disponibilidade hídrica.

A quinta fase contempla a maturação dos frutos, normalmente entre abril e junho. Essa fase pode apresentar deficiência hídrica moderada sem comprometimento da produção e qualidade do produto final.

A sexta e última fase, de julho e agosto, constitui a senescência dos ramos produtivos não primários, que secam e morrem, condicionados à conhecida autopoda dos cafeeiros.

A Figura A.2 apresenta imagens das escalas de desenvolvimento fenológico do cafeeiro de acordo com as fases descritas nesta seção.

PEZZAPANE *et al.* (2003) descreve a Figura 2.5 iniciando pelo período de repouso das gemas dormentes (0). Em seguida, ocorre um aumento substancial do potencial hídrico nas gemas florais maduras, que resulta, principalmente, da ocorrência de um choque hídrico provocado por chuva ou irrigação. Nesse estágio, as gemas intumescem (1), e os botões florais crescem por causa da grande mobilização de água e nutrientes (2), estendendo-se até a abertura das flores (3) seguida da queda das pétalas (4).



Figura A.2 Escala de notas para o desenvolvimento fenológico do cafeeiro. Fonte: PEZZAPANE *et al.* (2003)

Depois da fecundação, ocorre a fase conhecida como “chumbinho”, onde principia a formação dos frutos (5), que, em seguida, expandem-se (6) rapidamente. Depois de atingirem seu crescimento máximo, ocorre a formação do endosperma, que é seguida pela fase de grão verde (7), quando ocorre a granação dos frutos. Segundo PEZZAPANE *et al.* (2003), para distinguir o final da fase 6 do início da fase 7, é necessário realizar um corte transversal em alguns frutos para se verificar o início do endurecimento do endosperma.

O início da maturação do fruto dá-se na fase 8, chamada de “verde cana”, quando os frutos começam a mudar de cor (de verde para amarelo), evoluindo até o estágio “cereja” (9), estágio de fruta madura, onde é possível diferenciar a cultivar de fruto amarelo daquela de fruto vermelho. Essa fase costuma ser o ponto ideal para a colheita do ponto de vista de qualidade da bebida. A seguir, os frutos começam a secar (10), até atingir o estágio “seco” (11).

A.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DA PRODUÇÃO

Segundo PICINI *et al.* (1999), o déficit hídrico, capaz de alterar o metabolismo da planta, ocupa uma posição de destaque entre os fatores climáticos que limitam a produção do cafeeiro, dada sua ocorrência em grandes áreas cultiváveis.

As principais regiões produtoras de café no Brasil concentram-se nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Rio de Janeiro e Espírito Santo, onde ocorre mais de 150 mm de chuva por mês nas fases de florescimento, formação e maturação dos frutos - meses de setembro a março, que correspondem ao período de renovação de ramos e folhas (SEDIYAMA *et al.*, 2001). Entretanto, PEZZOPANE (2004) ressalta que a necessidade hídrica depende de outros fatores, como a distribuição das chuvas e do ritmo anual da evapotranspiração.

De acordo com MATIELLO *et al.* (2002), chuvas anuais de 1200 mm podem ser consideradas adequadas ao bom desenvolvimento do café *arábico*. Caso a deficiência hídrica seja inferior a 150 mm, isto é, déficit hídrico pequeno, porém com temperaturas médias (T_a) superiores a 23 °C, considera-se situação inapta, devido à ocorrência de altas temperaturas. Essa condição restringe a frutificação, resultando numa baixa produtividade.

No período de vegetação e frutificação que corresponde ao 1^a ano, durante os meses de setembro a março, o cafeeiro exige maior quantidade de água, enquanto, na fase de colheita e repouso, no período de junho a agosto, a exigência é menor. Assim, a ocorrência de pequena deficiência hídrica nessa fase não ocasionará grandes prejuízos para a planta (MATIELLO *et al.*, 1991; 2002; ROSA, 2007).

Segundo CAMARGO e DE CAMARGO (2001), a fase da florada e expansão dos frutos (3^a fase) inicia-se cerca de 8 a 15 dias após um aumento do potencial hídrico nas gemas florais maduras (choque hídrico), causado por chuva ou irrigação responsável pela acumulação de cerca de 350 mm de evapotranspiração potencial. Caso ocorra estiagem forte nessa fase, o estresse hídrico poderá prejudicar o crescimento dos frutos e resultar na ocorrência de peneira baixa. Todavia, os cafeeiros que recebem água com muita frequência na fase da florada (3^a fase) têm floração indefinida. Uma florada principal ocorre quando se verifica um período de restrição hídrica, seguido de chuva ou irrigação abundante.

Segundo CAMARGO (1985), as faixas ótimas de temperaturas médias anuais do ar, no caso da espécie *Coffea arabica L.*, espécie mais comercializada no Brasil e no mundo, situam-se entre 18 °C e 22 °C. Médias de temperaturas anuais acima de 23 °C acarretam o desenvolvimento e a maturação dos frutos de forma acelerada, com consequência na perda na qualidade do produto final (FRANCO, 1958 *apud* DAMATTA e RENA, 2002). A ocorrência frequente de temperaturas máximas acima de 28 °C diminui a produção de folha e a atividade fotossintética, enquanto, a partir de 34 °C, causa o abortamento de flores e, conseqüentemente, perda de produtividade.

Temperatura ambiente elevada associada a um intenso déficit hídrico durante o início da florada provoca a morte dos tubos polínicos pela desidratação e, conseqüentemente, o abortamento das flores, o que resulta nas conhecidas “entrelinhas” (CAMARGO, 1985).

A.3 PROCESSO PRODUTIVO

O cultivo de café é uma cultura perene, com ciclo bianual. Após seu processo de desenvolvimento no campo, o produto da colheita é o fruto do café, que é composto de

casca, polpa, pergaminho, película prateada e sementes. A Figura A.3 mostra, de forma simplificada, a estrutura do fruto de café.

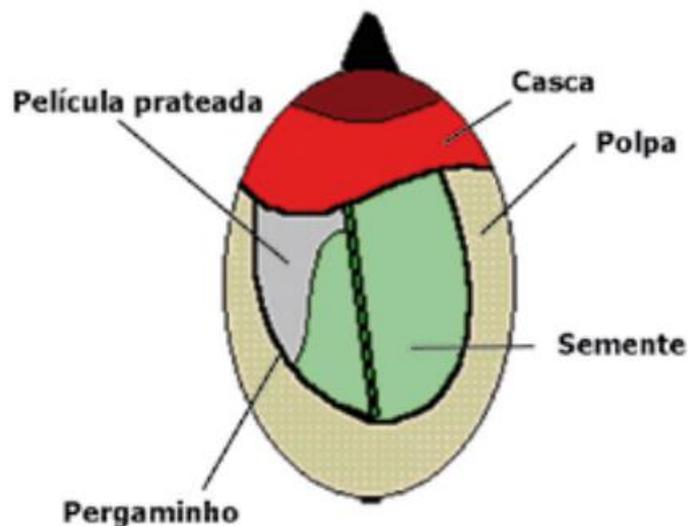


Figura A.3 Estrutura simplificada do fruto de café. Fonte: EMBRAPA (2013).

As sementes, também conhecidas como grãos de café, “café verde” ou café beneficiado, são o produto que será vendido para o mercado externo ou comercializado internamente para as torrefações.

No processo produtivo do café, o termo “café verde” aparece para dar nome a dois objetos diferentes. O referido acima trata-se do grão de café cru (café beneficiado), não torrado. É importante não confundir com o fruto de café verde, aquele que ainda não chegou ao ponto de maturação. O café beneficiado é o objeto de interesse deste trabalho quando se refere à produção e à produtividade para a área de estudo, com medição em toneladas. A Figura A.4 mostra o grão de café beneficiado e o café torrado.



Figura A.4 Grão de café após processo de torra (direita) e grãos de café beneficiado (esquerda) - ambos provenientes de frutos maduros e saudáveis.

Este último é o produto que será consumido pelo consumidor final. Será moído e utilizado para preparar a bebida.

Do fruto de café gerado pelo cafeeiro até chegar a grão, o café passa por diversos processos, começando na colheita.

O momento da colheita é uma escolha importante para um produtor. Uma vez que os frutos não amadurecem todos no mesmo momento (Figura A.5), segundo FERRÃO *et al.* (2009), o ideal é que o produtor aguarde até que 80% da produção esteja madura. No entanto, essa não é uma decisão fácil, pois chuvas intensas antes da colheita podem levar à perda de parte da produção. Outro fator relevante para os pequenos produtores de agricultura familiar que fazem colheita manual é a disponibilidade de mão de obra, que é contratada para o trabalho específico da colheita.

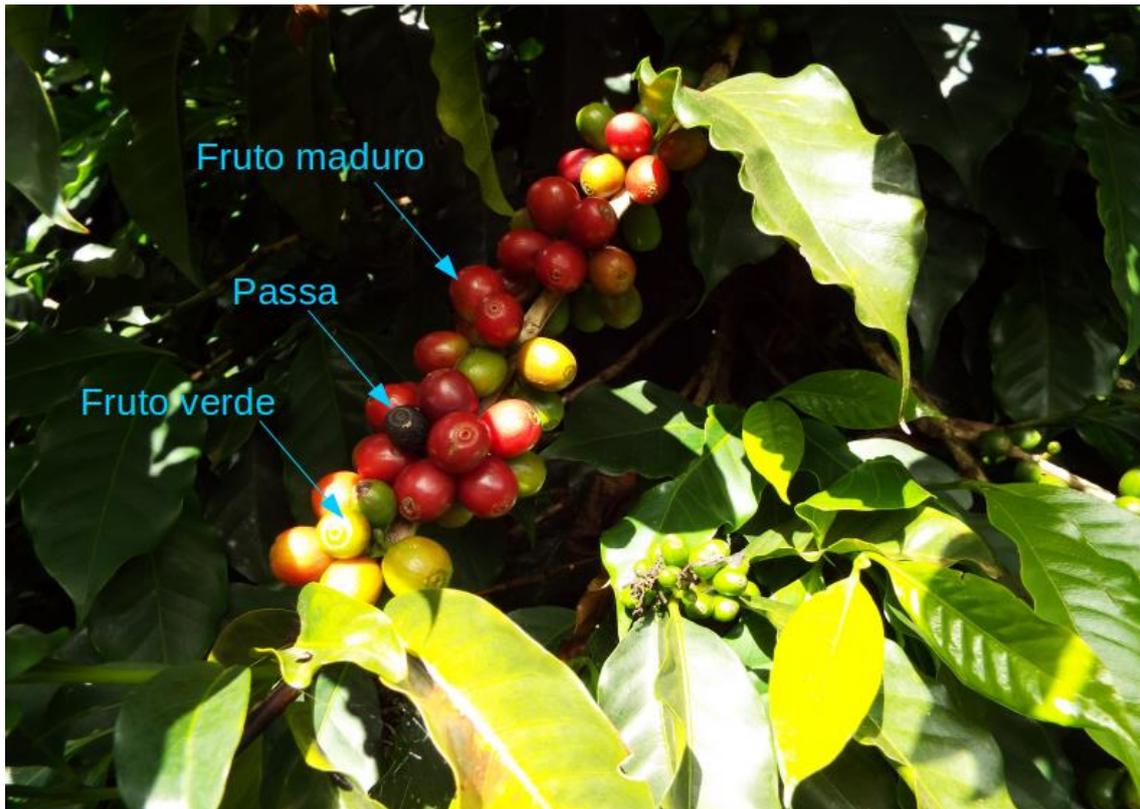


Figura A.5 : Frutos de café em diferentes pontos de maturação no cafeeiro.

A colheita do café pode ser manual ou mecanizada. A declividade do terreno é um fator determinante para a mecanização. Declividades superiores a 30% são impeditivas da mecanização.

A colheita manual pode ser feita de dois modos, colheita seletiva ou derriça. Na colheita seletiva os frutos maduros são selecionados manualmente e os frutos ainda verdes são deixados no pé afim de serem colhidos posteriormente.



Figura A.6 Resultado da colheita seletiva (esquerda) e da derriça (direita).

A Figura A.6 mostra o resultado dos dois tipos de colheita. É possível ver que o resultado da colheita seletiva proporciona uma matéria prima mais selecionada. A colheita seletiva pode proporcionar um produto final de melhor qualidade, porém torna o processo de colheita mais demorado e com necessidade de revisita, o que onera o produtor quanto ao gasto com mão de obra.

A colheita seletiva é importante para a produção de cafés do tipo natural. O processo natural é uma técnica onde o fruto de café é seco de forma inteira. Somente após a secagem, o grão é separado do fruto. Em geral, essa técnica agrega mais complexidade de sabor à bebida e também resulta em uma bebida bastante especial, vendida a valores bastante superiores aos da bolsa.

O outro tipo de colheita, a derriça, é uma técnica manual onde todos os frutos do cafeeiro são colhidos juntos. Esse processo resulta em uma colheita onde existem frutos maduros, verdes, passas. Há, então, a necessidade de seleção posterior. Uma das técnicas mais empregadas é o sistema de calhas que separa os frutos por densidade em um lavador (Figura A.7).

Nesse tipo de lavador, os frutos do tipo “boia” (passas, malformados e brocados) são separados das sujeiras pesadas, como pedras, e dos frutos verdoengos e maduros (cafés pesados). Os cafés ditos pesados incluem frutos maduros, que estão no estado próprio de maturação para resultar no melhor produto final, e os frutos verdes e verdoengos. A fim de obter uma bebida de qualidade, é necessário separar os verdes e verdoengos dos maduros.

Para essa separação, os frutos passam pelo próximo processo, que é o despoldador. Nessa etapa, os frutos são arremessados contra uma grade com determinada força. Os frutos maduros, mais macios, estouram e separam os grãos da casca e poupa do fruto. Os frutos verdes permanecem inteiros e são desviados. Essa técnica chama-se cereja descascada.

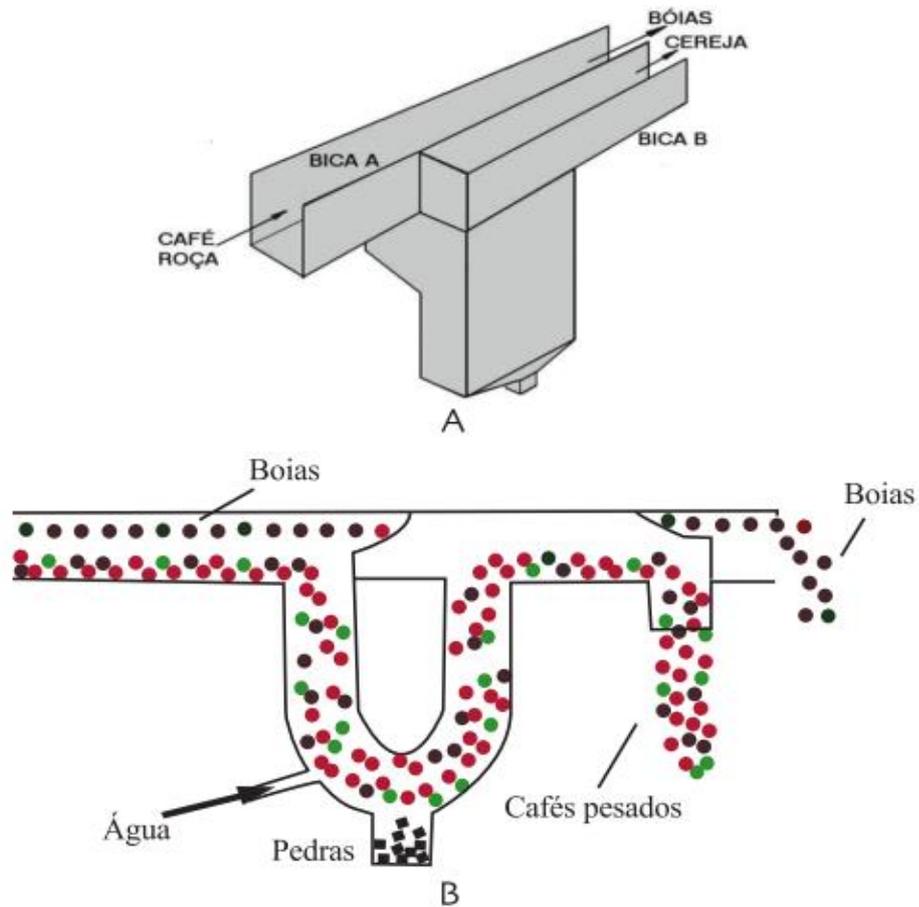


Figura A.7 Esquema do lavador e separador dos frutos. Fonte: EMBRAPA (2014)

Ao final do processo do lavador (Figura A.8), os frutos de café encontram-se separados por ponto de maturação e defeitos. Um café especial, é um café constituído de grãos provenientes de frutos maduros e saudáveis. Os grãos provenientes de frutos verde e boias são comercializados conjuntamente como *Commodities* e vão integrar o mercado de cafés tradicionais.



Figura A.8 Estrutura de lavador agregado ao despulpador.

É importante ressaltar que o processo de separação descrito, neste tópico, é realizado por produtores que se propõem a produzir cafés especiais. Os especiais possuem valor bem acima do valor de mercado de *commodities* e costumam trazer um retorno financeiro favorável ao pequeno produtor, apesar dos custos de produção mais elevados. Alguns produtores destinam sua produção integralmente para *commodities*; assim, o processo de separação é pulado.

Após o despulpamento, os grãos de café passam pelo processo de secagem, que pode ser feito em terreiros, cobertos ou não (Figura A.9), ou com o auxílio de secadores. A secagem em terreiros no chão depende de manejo constante para que os grãos em contato com o solo não recebam demasiada umidade e sofram uma fermentação indesejada. Uma solução para esse problema são os terreiros suspensos. Os terreiros cobertos apresentam vantagem pela não exposição à chuva.



Figura A.9 Terreiro de secagem coberto e descoberto.

Após a secagem, os grãos são guardados em tulhas por aproximadamente 6 meses. Tulhas são ambientes fechados com o objetivo de igualar a umidade entre os grãos. Depois desse tempo de descanso nas tulhas os grãos, estão prontos para a torra.

A separação dos frutos maduros e sadios é fundamental para resultar em uma bebida de qualidade. Os grãos de frutos maduros proporcionam à bebida final características de doçura e acidez agradável. A contaminação do café com grãos defeituosos pode originar acidez desagradável, provinda de frutos verdes e outros defeitos que reduzirão a qualidade da bebida. A Figura A.10 apresenta duas amostras de grãos de café selecionados e não selecionados, encerrando-se, então, a apresentação do produto agrícola que mereceu especial atenção nesta dissertação.



Figura A.10 Grãos não selecionados com grande quantidade de defeitos (esquerda); grãos selecionados (direita).

ANEXO B – ROTINAS COMPUTACIONAIS

B.1 – ROTINA DE TRANSFORMAÇÃO DE FORMATO HDF PARA TIF (CÓDIGO .SH)

```
#!/bin/bash

#####
#####

# b input
b="pasta"

#####
#####

while read line
do
    if [[ $line != *"$b"* ]]
    then

        gdal_translate -a_nodata -3000 -of GTiff
        "HDF4_EOS:EOS_GRID:"$b$line":MODIS_Grid_16DAY_250m_500m_VI:250m 16 days NDVI"
        $b$line'_NDVI.tif'

        #gdalwarp -dstnodata -3000 -q -cutline $shp -crop_to_cutline -of GTiff
        $b$line.1_km_monthly_NDVI.tif $b$line.1_km_monthly_NDVI_clip.tif

    else

        echo erro!!!

    fi
done "pasta" #list_name
```

B.2 – ROTINA DE RECORTE DE ARQUIVO MATRICIAL COM BASE EM ARQUIVO VETORIAL (CÓDIGO .PY)

```
from osgeo import gdal

import numpy as np

import os

import fnmatch

import ogr

import subprocess

#projection information

def getPRJwkt(epsg):

    """Grab an WKT version of an EPSG code

    usage getPRJwkt(4326)

    This makes use of links like

    http://spatialreference.org/ref/epsg/4326/prettywkt/

    need internet to work"""

    import urllib

    f = urllib.urlopen("http://spatialreference.org/ref/epsg/{0}/prettywkt/".format(epsg))

    return(f.read())

def clip_raster_by_vector(input_folder, in_shape, output_folder, t_srs='EPSG:4326'):

    files_list = os.listdir(input_folder)

    ds = ogr.Open(in_shape)

    lyr = ds.GetLayer(0)

    lyr.ResetReading()

    ft = lyr.GetNextFeature()

    for item in files_list:

        print item

        print "processing %s" %item

        in_raster = input_folder + '/' + item
```

```
#out_raster = output_folder + '/' + 'tg_' + item
out_raster = output_folder + '/' + item
subprocess.call(['gdalwarp', in_raster, out_raster, '-cutline', in_shape, '-t_srs',
t_srs, '-crop_to_cutline'])
```

```
input_folder = "
```

```
#####
#####
```

```
output_folder = '
```

```
in_shape = '
```

```
clip_raster_by_vector(input_folder=input_folder,in_shape=in_shape,output_folder=output_folder)

```

B.3 – ROTINA PARA COMPOSIÇÃO MÁXIMA ANUAL (CÓDIGO .PY)

```
import gdal
import numpy as np
import glob
import matplotlib.pyplot as plt
import os

def ts(a):
    print a
    file_data = np.sort(glob.glob('pasta /'+a+'/*'))
    data_matrix = np.array([])
    dst_dataset = 0
    #inicia ponteiro
    cont = 0
    for i in file_data:
        print i
        df = gdal.Open(i)
        col = df.RasterXSize
        row = df.RasterYSize
        band = df.GetRasterBand(1)
        geotransform = df.GetGeoTransform()
        spatialreference = df.GetProjection()

        data = band.ReadAsArray(0,0,col,row).astype(np.float16)
        data = data/10000

        if cont == 0:
            data_matrix = data
```

```

        cont=cont+1

        df = None

    else:

        c = 0

        while c < row:

            d = 0

            while d < col:

                if data_matrix[c][d] < data[c][d]:

                    data_matrix[c][d] = data[c][d]

                d = d+1

            c = c+1

        df = None

    fmt = 'GTiff'

    driver = gdal.GetDriverByName(fmt)

    dst_dataset = driver.Create( 'pasta/'+a+'_mvc.tif', col, row, 1,
gdal.GDT_Float64)

    dst_dataset.SetGeoTransform(geotransform)

    dst_dataset.SetProjection(spatialreference)

    dst_dataset.GetRasterBand(1).WriteArray(data_matrix)

    dst_dataset = None

```

B.4 – ROTINA DE ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA (CÓDIGO .PY)

```
# -*- coding: utf-8 -*-  
  
import scipy  
  
from scipy.stats import linregress  
  
from matplotlib.colors import LogNorm  
  
from scipy.stats import gaussian_kde  
  
import time  
  
import os  
  
import numpy as np  
  
#from mpl_toolkits.basemap import Basemap  
  
import numpy.ma as ma  
  
import glob  
  
from osgeo import gdal  
  
from osgeo.gdalconst import *  
  
import gdal  
  
from matplotlib import pyplot as plt  
  
#import pandas as pd  
  
from pylab import *  
  
  
startTime = time.time()  
  
  
#cria mascara com 0 para pixel sem valor e 1 para pixel com valor qualquer  
def NDVI_mask(file_name):  
    print 'comecou ndvi_mask'  
    data_set = np.sort(glob.glob(file_name))  
    cont = 0  
    mmatrix = np.array([])  
    for i in data_set:  
        dataset = gdal.Open(i, gdal.GA_ReadOnly)
```

```

band = dataset.GetRasterBand(1)
array = band.ReadAsArray().astype('float32')
col,row = np.shape(array)
array[array!=-3]=1
array[array==3]=0
array = np.reshape(array,-1)
if cont == 0:
    mmatrix = array
if cont != 0 :
    mmatrix = np.ma.vstack((mmatrix,array))
cont = cont +1
mmatrix = np.sum(mmatrix,axis=0)
mmatrix[mmatrix!=0]=1
return mmatrix

# cria um matrix com os valores de NDVI empilhados
def NDVI_read(file_name):
    print 'comecou ndvi_read'
    data_set = np.sort(glob.glob(file_name))
    cont = 0
    mmatrix = np.array([])
    for i in data_set:
        dataset = gdal.Open(i, gdal.GA_ReadOnly)
        band = dataset.GetRasterBand(1)
        array = band.ReadAsArray().astype('float32')
        col,row = np.shape(array)
        array = np.ma.masked_where(array==3,array)
        array = np.ma.masked_where(array<0.3,array)
        array = np.reshape(array,-1)
        if cont == 0:
            mmatrix = array

```

```

if cont != 0 :
    mmatrix = np.ma.vstack((mmatrix,array))
    cont = cont +1
return mmatrix,col,row

# superficie de tendencia s (inclinacao da reta de regressao)
def trend_surface(ndvi,ndvi_mask,ref_date_t_0,ref_date_t,col_img,lin_img):
    print 'comecou trend_surface'
    ndvi_seg_ref = ndvi[ref_date_t_0:ref_date_t
    lin      = np.shape(ndvi_seg_ref)[0]
    col      = np.shape(ndvi_seg_ref)[1]
    s_0      = np.array([])
    for pixel in range(col):
        print 'loop do trend pixel=', pixel, 'de', col
        ndvi_seg_ref_col    = ndvi_seg_ref[:,pixel]
        x                    = np.arange(0,lin)
        s,i,r,p,std          = linregress(x,ndvi_seg_ref_col)
        s_0                  = np.append(s_0,s)
    s_0[s_0>0] = 1
    s_0[s_0<0] = -1
    #s_0 = np.reshape(s_0,(col_img,lin_img))
    return s_0

```

```

def sign_surface(t0,t1,t2,t3,t4,t5):
    print 'comecou sign_surface'
    #t0=np.reshape(t0,-1)
    #t1=np.reshape(t1,-1)
    #t2=np.reshape(t2,-1)
    #t3=np.reshape(t3,-1)

```

```

#t4=np.reshape(t4,-1)
#t5=np.reshape(t5,-1)
ttt = np.vstack((t0,t1,t2,t3,t4,t5))
#ttt[ttt>0]=1
#ttt[ttt<0]=-1
lin,col    = np.shape(ttt)
pm         = np.zeros((lin,col))
for i in range(lin):
    print 'loop do sign i=', i, 'de', lin
    for j in range(col):
        if i==0:
            pm[i,j] = ttt[i,j]
        else:
            if ttt[i,j] != pm[i-1,j]:
                pm[i,j] = 0
            else:
                pm[i,j] = pm[i-1,j]
return pm

```

```

def plot_rst(data,mask,row,col,nx,ny,title, xlabel):
    plt.subplot2grid((2,3), (nx,ny))
    cmap = cm.get_cmap('Spectral', xlabel)
    img = np.reshape(data,(col,row))
    mask = np.reshape(ndvi_mask,(col,row))
    img = np.ma.masked_where(mask==0,img)
    cax = plt.imshow(img, cmap=cmap, vmax=xlabel/2, vmin=-(xlabel/2))
    if xlabel==2:
        plt.colorbar(cax, ticks = [-1, 1])
    if xlabel==5:
        plt.colorbar(cax, ticks = [-2, -1, 0, 1, 2])

```

```

if xlabel==7:
    plt.colorbar(cax, ticks = [-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3])
if xlabel==9:
    plt.colorbar(cax, ticks = [-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4])
if xlabel==11:
    plt.colorbar(cax, ticks = [-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5])
if xlabel==13:
    plt.colorbar(cax, ticks = [-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6])

plt.xticks([])
plt.yticks([])
plt.title(title)

```

```

#####
#####
ndvi_mask    = NDVI_mask('pasta/*')
ndvi,col,row = NDVI_read('pasta/*')

#####
#####

print 'comecou zz0'

zz0 = trend_surface(ndvi, ndvi_mask, ref_date_t_0=0, ref_date_t=13, col_img=col,
lin_img=row)#2000-2012

print 'comecou zz1'

zz1 = trend_surface(ndvi, ndvi_mask, ref_date_t_0=0, ref_date_t=14, col_img=col,
lin_img=row)#2013

print 'comecou zz2'

zz2 = trend_surface(ndvi, ndvi_mask, ref_date_t_0=0, ref_date_t=15, col_img=col,
lin_img=row)#2014

print 'comecou zz3'

zz3 = trend_surface(ndvi, ndvi_mask, ref_date_t_0=0, ref_date_t=16, col_img=col,
lin_img=row)#2015

```

```

print 'comecou zz4'

zz4 = trend_surface(ndvi, ndvi_mask, ref_date_t_0=0, ref_date_t=17, col_img=col,
lin_img=row)#2016

print 'comecou zz5'

zz5 = trend_surface(ndvi, ndvi_mask, ref_date_t_0=0, ref_date_t=18, col_img=col,
lin_img=row)#2017

print 'comecou s'

s = sign_surface(zz0,zz1,zz2,zz3,zz4,zz5)

print 'feito s'

s0 = np.sum(s[0:1,:],axis=0)
s1 = np.sum(s[0:2,:],axis=0)
s2 = np.sum(s[0:3,:],axis=0)
s3 = np.sum(s[0:4,:],axis=0)
s4 = np.sum(s[0:5,:],axis=0)
s5 = np.sum(s[0:6,:],axis=0)

fct=6

plt.figure(figsize=(3.75*fct,2*fct))
#x_labels=np.array([2,5,7,9,11])
plot_rst(s0,ndvi_mask,row,col,0,0,'2000-2012', 2)
plot_rst(s1,ndvi_mask,row,col,0,1,'2013', 5)
plot_rst(s2,ndvi_mask,row,col,0,2,'2014', 7)
plot_rst(s3,ndvi_mask,row,col,1,0,'2015', 9)
plot_rst(s4,ndvi_mask,row,col,1,1,'2016', 11)
plot_rst(s5,ndvi_mask,row,col,1,2,'2017', 13)
plt.tight_layout()
plt.savefig('/pasta/perst_.jpg',dpi=125)
#plt.show()

```