

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

**CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DA VEGETAÇÃO POR ANÁLISE HARMÔNICA EM SÉRIES
TEMPORAIS EVI/MODIS NO PARQUE NACIONAL DAS ARAUCÁRIAS**

TIAGO RAFAEL DOS SANTOS

**Porto Alegre
2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

**CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DA VEGETAÇÃO POR ANÁLISE HARMÔNICA EM SÉRIES
TEMPORAIS EVI/MODIS NO PARQUE NACIONAL DAS ARAUCÁRIAS**

TIAGO RAFAEL DOS SANTOS

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Sensoriamento Remoto como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Sensoriamento Remoto.**

BANCA EXAMINADORA:

DR^a. MARÍA SILVIA PARDI LACRUZ

DR^a. DENISE CYBIS FONTANA

DR^a. ELIANA LIMA DA FONSECA

ORIENTADOR: ULISSES FRANZ BREMER

Porto Alegre

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Santos, Tiago Rafael dos

Caracterização fenológica da vegetação por análise harmônica em séries temporais EVI/MODIS no Parque Nacional das Araucárias. / Tiago Rafael dos Santos. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2017.

[82 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Orientador: Ulisses Franz Bremer

1. Floresta Ombrófila Mista. 2. Índices de Vegetação. 3. HANTS. 4. Unidade de Conservação, Santa Catarina. I. Título.

CDU 528.8

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sônia Teresinha Duarte de Oliveira CRB 10/2310

Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por propiciar meu aperfeiçoamento profissional e pessoal de forma gratuita e de qualidade.

Ao professor Ulisses Franz Bremer pela orientação prestada durante a elaboração da dissertação.

Às professoras Eliana Lima da Fonseca e Denise Cybis Fontana por aceitarem participar da banca de defesa.

À professora Maria Silvia Pardi Lacruz também por aceitar participar da banca, bem como pela disponibilidade em auxiliar nos momentos de dificuldades.

À Marina pelo suporte afetivo, motivação irrestrita e incentivo quando nem eu mais acreditava na finalização da dissertação.

Aos meus pais e minha irmã Tati pelo apoio incondicional e principalmente pelo exemplo.

Ao Juliano pela amizade e pelo incansável jeito de me fazer aprender sobre sensoriamento remoto.

Ao Sr. Michael Steinmayer pela disponibilização de horários para que eu pudesse realizar o mestrado e pelos ensinamentos em sensoriamento remoto.

RESUMO

A floresta ombrófila mista, representada principalmente pela presença de *Araucaria angustifolia* possui elevada importância para a região sul do Brasil e o interesse econômico nessa espécie ocasionou uma forte exploração principalmente durante a primeira metade do século XX. O Parque Nacional das Araucárias possui a finalidade de preservar remanescentes de florestas com a presença de *Araucaria angustifolia*; sendo assim, a compreensão do comportamento da dinâmica fenológica das coberturas florestais é uma forma de auxiliar na gestão e manejo destas áreas. Dessa forma, foi executado a aplicação de uma metodologia baseada em análises harmônicas de séries temporais EVI/MODIS para realizar a caracterização e mapeamento fenológico das diferentes coberturas vegetais presentes no Parque Nacional das Araucárias, por meio desta metodologia foi possível identificar os valores médios de EVI durante toda a série temporal para as diferentes coberturas de uso e ocupação do solo, analisando a relação entre as variações fenológicas com dados de precipitação e temperatura máxima, representando essas variações de amplitude, fase e termo aditivo para a série completa e individualmente para cada ano. Baseado no algoritmo *HANTS*, aplicou-se a análise harmônica para uma série temporal de dez anos, compreendidas entre os anos de 2006 a 2015. A partir desse processamento foram analisadas as imagens de fase, amplitude e termo aditivo por meio de quatro conjunto de amostras previamente selecionadas, representando as quatro principais coberturas de vegetação presentes no parque. Com o intuito de auxiliar na interpretação visual dos dados, as imagens foram convertidas de RGB para HLS. Uma vez gerados todos os dados, foi possível caracterizar como ocorre a variação dos valores de índices de vegetação ao longo do ano, bem como o período do ano onde acontecem as maiores variações; além de ser possível indicar as áreas onde houve indicativos de mudanças significativas de uso do solo, mudanças ocasionadas por algum evento climático ou pelo próprio desenvolvimento da vegetação. Através dos dados extraídos com a análise harmônica e a identificação das diferentes fenologias gerou-se também uma classificação sobre a série temporal, com o objetivo de identificar as áreas que ainda apresentam remanescentes de *Araucaria angustifolia* de forma predominante. Por fim, concluiu-se que a aplicação de uma metodologia baseada em séries harmônicas possibilita uma maior compreensão das coberturas florestais presentes nesta unidade de conservação gerando informações úteis para a gestão e possível revisão do plano de manejo. Para alguma aplicação futura, espera-se utilizar esta metodologia em uma série temporal com maior resolução espacial.

Palavras-chaves: floresta ombrófila mista, Índices de Vegetação, *HANTS*, HLS, Unidade de Conservação, Santa Catarina.

ABSTRACT

The Mixed Coniferous-Broadleaf forest, mainly represented by the presence of *Araucaria angustifolia*, is highly important to the southern region of Brazil, the economic interest in this species led to a heavy exploration during the first half of the 20th century. The purpose of the Araucárias National Park is to preserve remnants of the forests with great presence of *Araucaria angustifolia*; therefore, the comprehension of the behavior of the phenological dynamic of the forest covers is a way of assisting the management and handling of these areas. Thereby, the goal is to apply a methodology based on harmonic analysis of EVI / MODIS time series to perform characterization and phenological mapping of the different vegetation covers present in Araucarias National Park; for that, it is intended to identify the medial values of EVI during the whole time series for different types of coverage of soil use and occupation, analyzing the relation between the phenological variations with precipitation data and maximum temperature, representing these variations of amplitude, phase and additive term for a complete series and individually for each year. Based on the HANTS algorithm, the harmonic analysis was applied to a time series of ten years, comprised between 2006 and 2015. Starting from this processing, images of the phase, amplitude and additive term were analyzed by means of four previously selected samples, representing the four main vegetation covers present in the park. In order to assist the visual interpretation of data, the images were converted from RGB to HLS. When all data was generated, it was possible to characterize how the variation in the value of vegetation indices happen throughout the year, as well as the time of the year when the biggest variations occur. Besides, it is possible to indicate the areas with significant changes in the use of soil, or changes caused by climatic events or by the vegetation own development. Through the data extracted with the harmonic analysis and the identification of the different phenologies, a classification was also generated on the time series, in order to identify the areas that still present remnants of *Araucaria angustifolia* predominantly. Ultimately, it is concluded that the application of a methodology based on the harmonic series enables a better comprehension of the forest covers present in this unity of conservation, generating useful information for the management and possible review of the management plan. For future application, the use of this methodology in a time series with greater spatial resolution is expected.

Keywords: floresta ombrófila mista, Vegetation Indices, *HANTS*, HLS, Conservation Unity, Santa Catarina.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – LOCALIZAÇÃO DO PARQUE NACIONAL DAS ARAUCÁRIAS.....	14
FIGURA 2.2 – ÁREA COM FLORESTA COM ALTA PRESENÇA DE ARAUCÁRIAS	16
FIGURA 2.3 – ÁREA COM FLORESTA COM BAIXA PRESENÇA DE ARAUCÁRIAS.....	17
FIGURA 2.4 – USO DO SOLO DO PNA, DE ACORDO COM O ESTÁGIO SUCESSIONAL DA FLORESTA, ÁREAS DE FLORESTAMENTO, PASTAGEM/AGRICULTURA E SOLO EXPOSTO.....	18
FIGURA 3.1 – A EVOLUÇÃO DO EVI.....	25
FIGURA 3.2 – GERAÇÃO DE COMPOSIÇÃO DO PRODUTO MODIS PARA ÍNDICE DE VEGETAÇÃO.....	27
FIGURA 3.3 – CARACTERÍSTICA DOS PRODUTOS MOD13.....	29
FIGURA 3.4 – A) PRIMEIRO HARMÔNICO REPRESENTADO PELA CURVA DE SENO; B) CURVAS PARA OS TRÊS PRIMEIROS HARMÔNICOS; C) SOMA DAS CURVAS.....	30
FIGURA 3.5 – SÍNTESE DO ALGORITMO <i>HANTS</i>	34
FIGURA 3.6 – ESPAÇO DE CORES HLS.....	35
FIGURA 4.1 – DEFINIÇÃO DAS AMOSTRAS.....	39
FIGURA 5.1 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS AMOSTRAS.....	45
FIGURA 5.2 – IMAGEM TERMO ADITIVO ANUAL.....	51
FIGURA 5.3 – EVOLUÇÃO DE UMA ÁREA DE PASTAGEM PARA FLORESTA PLANTADA.....	52
FIGURA 5.4 – IMAGEM DE AMPLITUDE ANUAL.....	54
FIGURA 5.5 – IMAGEM DO ÂNGULO DE FASE ANUAL.....	56
FIGURA 5.6 – COMPOSIÇÃO COLORIDA COM AS BANDAS: H(FASE1); L(AMPLITUDE 1); S(TERMO ADITIVO) PARA O ANO DE 2015.....	67
FIGURA 5.7 – ÁREAS COM PREDOMINÂNCIA DE <i>ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA</i>	68
FIGURA 5.8 – DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS DE CONFERÊNCIA.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1 – VALORES DE EVI AO LONGO DA SÉRIE TEMPORAL PARA A CLASSE FLORESTA COM ARAUCÁRIAS.....	46
GRÁFICO 5.2 – VALORES DE EVI AO LONGO DA SÉRIE TEMPORAL PARA A CLASSE FLORESTA SEM ARAUCÁRIAS.....	47
GRÁFICO 5.3 – VALORES DE EVI AO LONGO DA SÉRIE TEMPORAL PARA A CLASSE FLORESTA PLANTADA.....	48
GRÁFICO 5.4 – VALORES DE EVI AO LONGO DA SÉRIE TEMPORAL PARA A CLASSE CULTIVOS.....	49
GRÁFICO 5.5 – TEMPERATURA MÁXIMA MÉDIA EM °C ANUAL.....	58
GRÁFICO 5.6 – PRECIPITAÇÃO EM MM ANUAL.....	59
GRÁFICO 5.7 – A) AMPLITUDE PARA AS AMOSTRAS FLORESTA COM ARAUCÁRIAS B) FASE PARA AS AMOSTRAS FLORESTA COM ARAUCÁRIAS.....	61
GRÁFICO 5.8 – A) AMPLITUDE PARA AS AMOSTRAS FLORESTA SEM ARAUCÁRIAS B) FASE PARA AS AMOSTRAS FLORESTA SEM ARAUCÁRIAS.....	63
GRÁFICO 5.9 – A) AMPLITUDE PARA AS AMOSTRAS FLORESTA PLANTADA B) FASE PARA AS AMOSTRAS FLORESTA PLANTADA.....	64
GRÁFICO 5.10 – A) AMPLITUDE PARA AS AMOSTRAS FLORESTA DE CULTIVOS B) FASE PARA AS AMOSTRAS DE CULTIVO.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS

ARVI – Atmospheric Resistance Vegetation Index
BRDF – Bidirectional Reflectance Difference Factor
EVI – Enhanced Vegetation Index
FFT – Fast Fourier Transformation
FOM – Floresta Ombrófila Mista
HANTS – Harmonic Analysis Time Series
HLS – Hue, Lightness, Saturation
IBP – International Biologic Program
IFFT – Inverse Fast Fourier Transformation
MIR – Medium Infrared
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI – Normalizes Difference Vegetation Index
NIR – Near Infrared
PNA – Parque Nacional das Araucárias
RGB – Red, Green, Blue
SAVI – Soil Adjust Vegetation Index
UC – Unidade de Conservação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO PRINCIPAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. ÁREA DE ESTUDO	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	20
3.2 SENSOR MODIS.....	25
3.3 SÉRIES TEMPORAIS	29
3.4 ANÁLISE HARMÔNICA	30
3.5 CRESCIMENTO DA <i>Araucaria angustifolia</i>	37
4. METODOLOGIA	38
4.1 MATERIAIS.....	38
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS COBERTURAS FLORESTAIS	38
4.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS MODIS	40
4.3 IMAGEM SENTINEL-2A	40
4.4 ÁREAS COM REMANESCENTES DE <i>Araucaria angustifolia</i>	41
4.5 GERAÇÃO DA ANÁLISE HARMÔNICA	41
4.6 DADOS CLIMATOLÓGICOS.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1 DINÂMICA SAZONAL DOS VALORES DE EVI.....	45
5.2 PRODUTOS DA ANÁLISE HARMÔNICA	50
5.3 COMPOSIÇÃO HLS	66
6. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS.....	73
ANEXO 1.....	77

1. INTRODUÇÃO

No Brasil encontra-se 1/3 das florestas tropicais remanescentes no mundo, além de ser uma das maiores fontes da diversidade biológica mundial. Porém estas regiões de florestas tropicais estão cada vez mais convertidas em diferentes utilizações antrópicas. O avanço da urbanização e das atividades agropastoris é o responsável em grande escala pela cada vez mais significativa fragmentação das paisagens naturais nos mais diferentes ecossistemas, contribuindo para a precarização da biodiversidade.

A dimensão da fragilização dos ambientes florestais pode ser muito bem descrita ao analisar a Mata Atlântica. Esse bioma brasileiro já representou uma área original de 15% de todo o território nacional; hoje se encontra restrito a apenas 11,4%, contando os fragmentos florestais com mais de 3 hectares. Levando em consideração apenas a floresta ombrófila mista, ou Mata de araucárias, atualmente se encontra apenas 3% das áreas originais.

As principais áreas com remanescentes de floresta ombrófila mista presentes no Brasil estão localizadas no estado de Santa Catarina, a maior parte protegidas em unidades de conservação, sendo uma delas o Parque Nacional das Araucárias. Uma unidade de conservação, pode ser entendida como uma área que possui recursos ambientais com características relevantes e através de dispositivos legais determinados pelo poder público há garantias adequadas de proteção. No caso específico do Parque Nacional das Araucárias, o objetivo maior é a preservação de bosques com grande presença de *Araucaria angustifolia*, também denominado de Pinheiro-Brasileiro, que formam a parte superior destes bosques.

O entendimento das dinâmicas temporais das coberturas vegetais e dos padrões dos diferentes ecossistemas dentro de uma unidade de conservação pode mostrar-se extremamente útil na elaboração de diagnósticos dos recursos naturais, tendo a possibilidade de subsidiar programas de conservação, além da revisão de planos de

manejo.

As diferentes técnicas de sensoriamento remoto e o conjunto dos dados oriundos de sensores orbitais são uma fonte potencial de dados referentes às estruturas dos recursos florestais e monitoramento dos diferentes ciclos anuais. Sendo também, uma forma menos onerosa para os órgãos públicos e Organizações Não Governamentais ambientais criarem metodologias para o acompanhamento da dinâmica temporal das coberturas vegetais.

Uma metodologia para auxiliar na caracterização e mapeamento das diferentes fenologias, é a combinação da utilização de índices de vegetação e séries temporais de dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* associadas a utilização de séries harmônicas. A utilização de índices de vegetação em séries temporais, como os gerados pelos produtos do sensor MODIS, possui a capacidade de produzir um elevado número de informações devido a sua alta resolução temporal. Para isso, a utilização de análises harmônicas pode resultar em uma otimização dos dados e maior integração das informações temporais com informações espaciais, contribuindo para uma caracterização mais detalhada e precisa das coberturas vegetais do Parque Nacional das Araucárias.

Este conjunto de informações possíveis de serem geradas associando os dados de Índices de Vegetação com séries harmônicas, apresenta-se como uma forma de auxiliar os gestores do Parque Nacional das Araucárias a entender a dinâmica sazonal das diferentes coberturas vegetais encontradas no interior do parque, além de contribuir para a identificação com as áreas onde há ocorrência da presença de *Araucaria angustifolia* em maior quantidade que as demais formações florestais da floresta ombrófila mista.

Neste trabalho, foi utilizada uma série temporal de dez anos, compreendendo desde o dia 01 de janeiro de 2006, até o dia 31 de dezembro de 2015. A escolha deste período se deu por ser 2006 o primeiro ano completo após a instalação oficial do Parque Nacional das Araucárias.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Diante do exposto anteriormente, o objetivo principal deste trabalho é analisar a aplicação da análise harmônica de séries temporais EVI/MODIS, para o mapeamento e caracterização fenológica das diferentes coberturas vegetais presentes no Parque Nacional das Araucárias.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo principal é necessário alcançar determinados objetivos específicos que são:

- a) identificar a partir dos dados obtidos com as séries as dinâmicas sazonais das diferentes coberturas vegetais presentes no Parque Nacional das Araucárias.
- b) gerar imagens anuais representando o uso do solo por meio dos dados provenientes das análises harmônicas, imagens amplitude, fase e termo aditivo.
- c) identificar a partir dos dados obtidos o acréscimo de áreas de reflorestamento no interior do Parque Nacional das Araucárias.
- d) caracterizar áreas remanescentes de *Araucaria angustifolia*.

2. ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho foi desenvolvido no Parque Nacional das Araucárias pertencente ao bioma Mata Atlântica, mais especificamente na floresta ombrófila mista. Criado com o Decreto Federal s/nº de 19 de outubro de 2005, o Parque Nacional das Araucárias está localizado na região oeste do estado de Santa Catarina, situado entre as Latitudes 26°39'S e 26°52'S e as Longitudes 51°47'W e 52°02'W, com uma área de 12.841 hectares (Figura 2.1). A sua área está dividida entre os municípios de Ponte Serrada com 55,3% da área total e Passos Maia com 44,7%. A área do município representada pelo Parque Nacional das Araucárias em Ponte Serrada e Passos Maia é de 12,60% e 10,17% respectivamente.

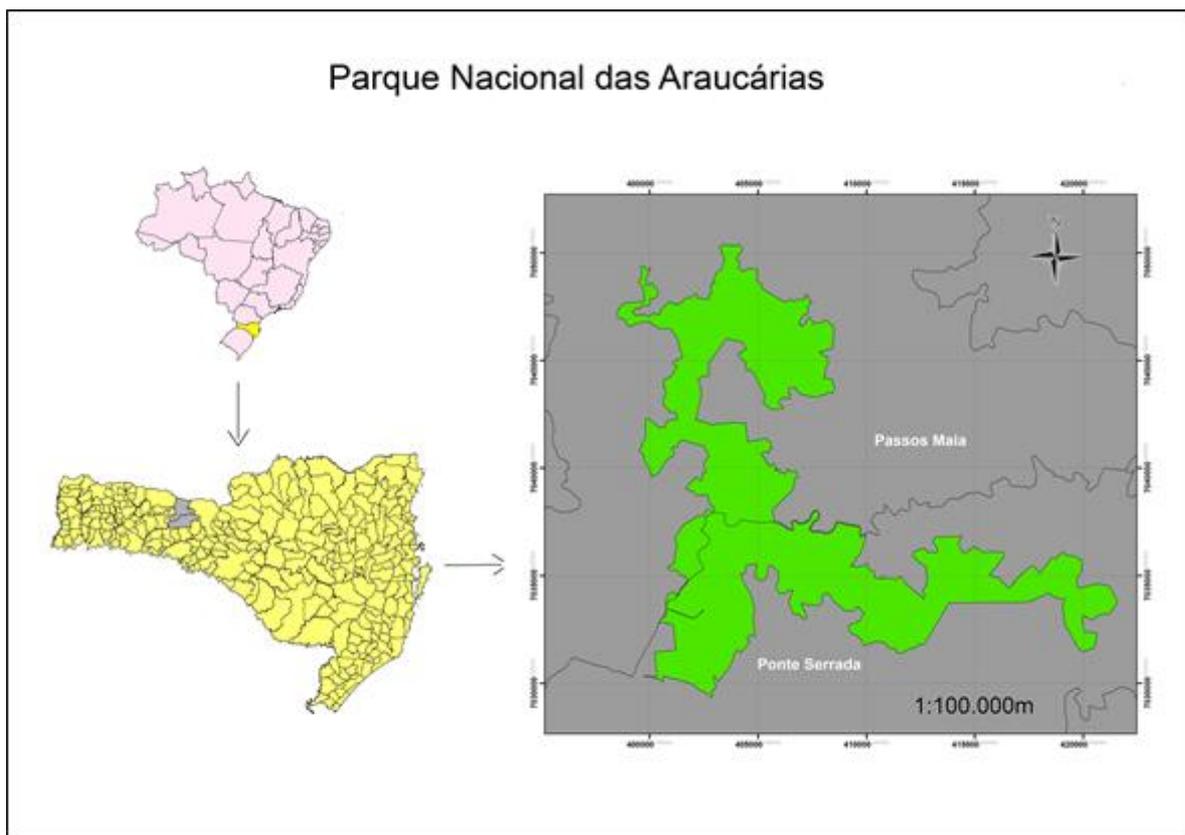


Figura 2.1 – Localização do Parque Nacional das Araucárias.

A origem do Parque Nacional das Araucárias está diretamente ligada a um contexto socioespacial baseado na exploração por parte do homem das terras localizadas no meio oeste de Santa Catarina e possui relação direta com os históricos de ocupação.

Com a presença abundante da Mata Atlântica, principalmente da floresta ombrófila mista, era possível obter condições favoráveis de sobrevivência, uma vez que a alimentação era assegurada pela coleta de frutos e pesca. Com o passar do tempo a floresta ombrófila mista passou a ter um valor econômico cada vez mais relevante, principalmente pela grande representatividade da *Araucaria angustifolia* aumentando o avanço da colonização e desmatamento das florestas (SCHEFFER e PROCHNOW, 2002).

No início do século XX, a implementação da ferrovia São Paulo - Rio Grande ocasionou profundas alterações na paisagem principalmente pela expulsão das populações indígenas e avanço das companhias de colonização europeias. Esse novo paradigma de ocupação da região baseou-se no modelo minifundiário de estrutura agrícola (GONÇALVES *et al.*, 2013). Essa estrutura de minifúndios ainda hoje pode ser percebida na região, contribuindo para a grande importância do setor primário na economia.

Segundo Seitz (1986), a exploração das florestas com a presença da *Araucaria angustifolia* ocorreu de forma indiscriminada desde a sua intensificação, no início dos anos 30, até o auge na década de 70 quando o Pinheiro-Brasileiro se tornou o principal produto de exportação do mercado nacional. Esse processo de ocupação exploratório resultou na quase extinção das formações florestais que compõem a floresta ombrófila mista, restando hoje poucos remanescentes da área original dessas florestas divididos em pequenos fragmentos espalhados pelo território (ALARCON, *et al.*, 2011). Em um desses fragmentos foi definido como sendo a área que abriga a unidade de conservação do Parque Nacional das Araucárias.

As unidades de conservação são definidas como:

Um espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características relevantes, legalmente instituídas pelo poder público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção (BRASIL, 2010).

Ainda segundo o Brasil (2010), essas unidades podem ser definidas como sendo de

Uso Sustentável, quando o objetivo é a compatibilização da conservação da natureza com o uso sustentável de seus recursos; e Unidade de Proteção Integral, quando há a necessidade de preservar a natureza e permitir apenas o uso indireto dos recursos naturais. O Parque Nacional das Araucárias está definido como sendo uma unidade de conservação de Uso Integral, e de acordo com o decreto de criação, possui o objetivo de:

Preservar os ambientes naturais ali existentes com destaque para os remanescentes de floresta ombrófila mista, possibilitando a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento de atividades de educação ambiental, recreação em contato com a natureza e turismo ecológico (GONÇALVES et al., 2013).

Dessa forma, a finalidade do Parque Nacional das Araucárias é a de proteger importantes remanescentes de floresta ombrófila mista (Figura 2.2), uma vez que a área compreendida pelo parque representa por meio de diferentes estágios de conservação, aproximadamente 0,06% da área original de floresta ombrófila mista que possuem tanto um relevante valor econômico como cênico (GONÇALVES et al., 2013).



Figura 2.2 – Área com Floresta com Alta Presença de *Araucaria angustifolia*.
(Fonte: Vanessa Kanaan, 2015)

O Parque Nacional das Araucárias está totalmente dentro da subdivisão do bioma Mata Atlântica denominado de floresta ombrófila mista, popularmente conhecida como

Mata de Araucárias, uma vez que a *Araucaria angustifolia* constitui a cobertura do dossel de forma quase contínua, passando a impressão de possuir apenas um estrato. Porém abaixo do estrato superior formado pela *Araucaria angustifolia* há uma gama de outras espécies que variam de abundância e porte de acordo com o local e estágio de desenvolvimento da floresta (KLEIN 1960).

*No sub-bosque da floresta ocorre uma complexa e grande variedade de espécies, como a canela-sassafrás *Ocotea odorifera*, a imbuia *Ocotea porosa*, a erva-mate *Ilex paraguariensis* e o xaxim *Dicksonia sellowiana*, entre outras que são endêmicas (GONÇALVES et al., 2013).*

Nas áreas integrantes do Parque Nacional das Araucárias a cobertura florestal possui uma vasta diversidade de espécies, havendo áreas com baixa presença de araucárias (Fig. 2.3).

Foram identificadas 174 espécies, pertencentes a 132 gêneros e 54 famílias e foi possível observar formações florestais em diferentes estágios sucessionais de regeneração com remanescentes bem conservados. Parte dessas áreas possui um dossel exuberante de araucárias. (GONÇALVES et al., 2013).

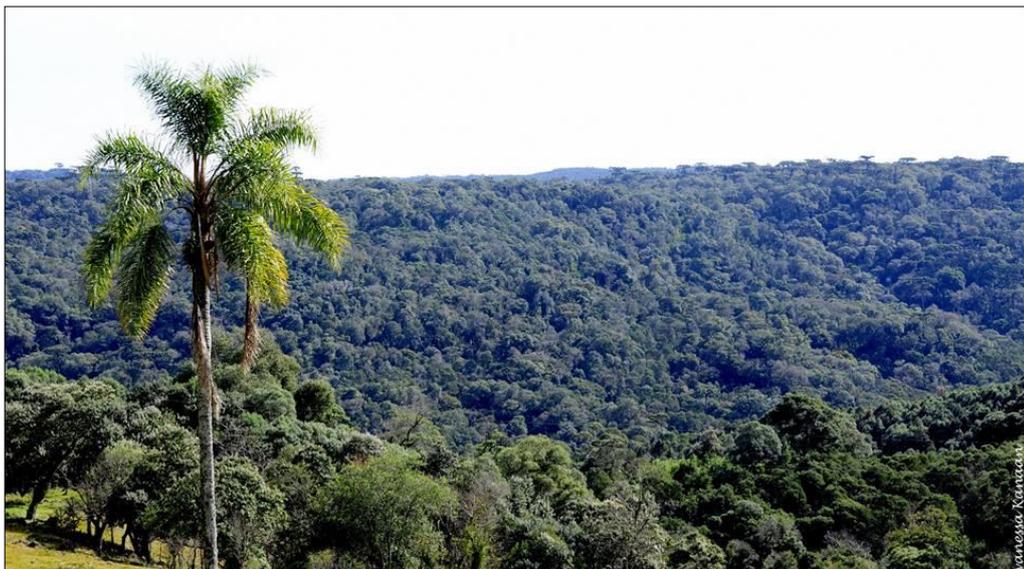


Figura 2.3 – Área com Floresta com Baixa Presença de *Araucaria angustifolia*.
Fonte: Vanessa Kanaan (2015).

Quando as formações florestais são caracterizadas pelo seu estágio sucessional (Figura 2.4), destacam-se as formações secundárias nativas em estágios de

regeneração médio e avançado. Encontram-se ainda regiões com a presença de mata primária explorada, além de áreas com atividades conflitantes, destacando-se a utilização de áreas de campo e no sub-bosque da floresta para a pastagem de gado, espécies exóticas invasoras e agricultura. Dentre as espécies invasoras, há maior abundância do gênero *Pinus* e em menor frequência do gênero *Eucalyptus*. A presença da *Araucaria angustifolia* nas áreas de floresta primária com pouca exploração, porém encontra-se em menor quantidade nos estágios médios e avançados de regeneração (GONÇALVES *et al.*, 2013).

A presença em maior concentração de indivíduos representantes do Pinheiro-Brasileiro, a *Araucaria angustifolia*, ocorre nas áreas de vegetação primária caracterizadas pela pouca exploração. Porém encontram-se dosséis compostos por *Araucaria angustifolia* nas áreas de estágios médias e avançados de regeneração (GONÇALVES *et al.*, 2013).

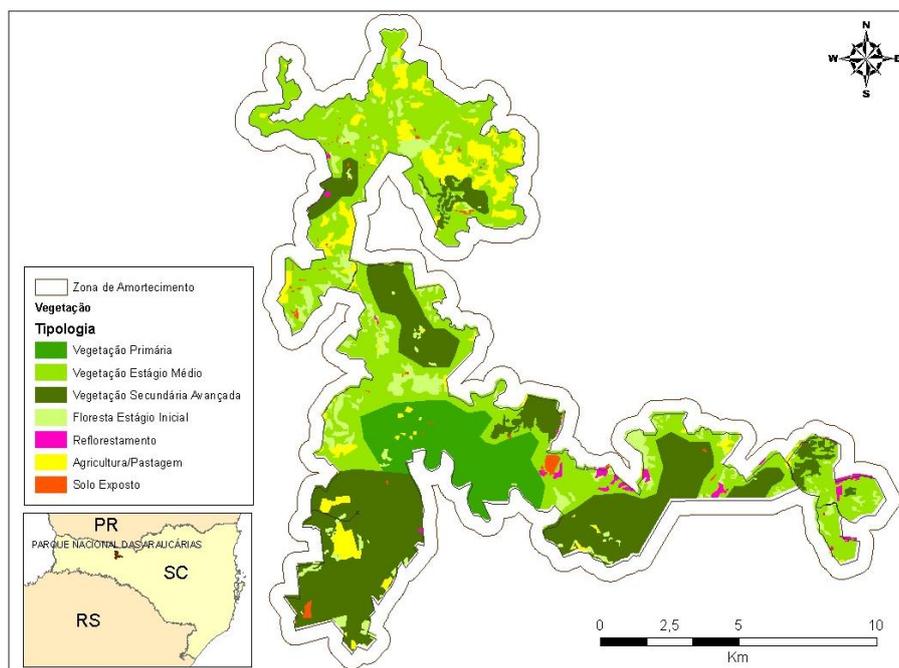


Figura 2.4 – Uso do Solo do Parque Nacional das Araucárias, de acordo com o Estágio Sucessional da Floresta, Áreas de Florestamento, Pastagem/Agricultura e Solo Exposto (Fonte: TIEPO, 2009).

Segundo Nimer (1977), o clima na região onde está inserido o Parque Nacional das Araucárias, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, temperado chuvoso de ambiente úmido, com temperaturas médias inferiores dos meses frios a

18° e entre 18° e 22° nos meses mais quentes. O regime pluvial possui precipitação média anual de 1970 mm, distribuídas de forma mais significativa nos meses de janeiro e fevereiro e entre agosto e dezembro. Já os períodos com menor volume de precipitação ocorrem entre março e julho.

Segundo Van Goor (1965), os tipos climáticos de Köppen Cfb e Cfa não apresentam limitações para o crescimento e desenvolvimento da floresta ombrófila mista, porém, altitudes abaixo de 600 metros é um fator crítico para a espécie. Durante o período de análise do trabalho a precipitação média e os maiores valores de precipitação ocorreram nos meses de janeiro e setembro, com 168,65 mm e 213,68 mm respectivamente. Já os valores médios de máxima temperatura apresentaram as maiores temperaturas durante o verão, ocorrendo a menor temperatura máxima no mês de junho.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

O monitoramento da cobertura vegetal com auxílio de informações extraídas por meio de fotografias ou sensores radiométricos dispostos em campo ou aerotransportados vem sendo utilizado desde meados da década de 60. Já na década de 70, a utilização de sensores orbitais possibilitou uma maior propagação de pesquisas voltadas para estudar o comportamento fenológico das diferentes vegetações presentes na superfície.

O significativo aumento do emprego de tecnologias em sensoriamento remoto voltado para a vegetação, fez com que as técnicas se tornassem altamente precisas, o que tornou o seu emprego muito mais popular nas últimas décadas. Hoje é possível se extrair vários tipos de informações dos dados gerados pela detecção da radiação eletromagnética por sensores, relativos à dinâmica da superfície terrestre. As aplicações destes dados podem ocorrer de diversas formas: estimativas de evapotranspiração, monitoramento da temperatura superficial da Terra, influência da radiação solar, mapeamento geológico, entre tantas outras aplicações.

A técnica de aplicação de dados de sensoriamento remotos utilizada neste trabalho tem como base a utilização de índices de vegetação, que podem ser utilizados como sensíveis indicadores da presença e condição da vegetação. Esses índices baseiam-se em uma série de metodologias de cálculo entre duas ou mais bandas espectrais, basicamente podendo ser definido com medidas radiométricas adimensionais que envolvem a simples razão ou combinação linear entre bandas espectrais.

Como resultado das combinações entre bandas, uma grande quantidade de dados espectrais se restringe em um único valor, cuja principal aplicação é a possibilidade de definir relações com o índice de área foliar e biomassa presente na área em estudo (HUETE *et al.*, 2002).

Os índices de vegetação, além de apresentarem relação direta com a quantidade de

vegetação fotossinteticamente ativa, se mostram também como sensíveis indicadores tanto do conteúdo de clorofila de uma folha, como da fisionomia e estrutura de um dossel. Porém para a utilização dos índices de vegetação alguns parâmetros devem ser levados em conta, como o tamanho do *pixel*, a sua distorção no final da imagem, padronizações dos dados segundo visada ao nadir e off-nadir, e problemas com saturação do índice de vegetação decorrente das visadas off-nadir e com ângulos zenitais solares elevados (HUETE, 2002).

Em imagens originadas de sensores com média resolução espacial, como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), o *pixel* da imagem composta tende a conter várias informações que dificultam sua identificação, além, da coleta dos dados sofrer com as influências da atmosfera, do ângulo zenital solar, bem como, da própria degradação do sensor (HUETE, 2002).

Segundo Gutman (1991), a variação do ângulo zenital solar deve ser levada em conta em análises comparativas de imagens de coberturas vegetais que se localizam em latitudes diferentes. Existe uma relação inversamente proporcional entre os índices de vegetação e o ângulo zenital solar, quanto maior o ângulo, menor tende a ser o valor resultante do índice calculado, isso porque, com um ângulo zenital solar menor, o efeito de sombreamento sobre a superfície diminui.

Os aerossóis presentes na atmosfera (fumaça, poeira e partículas de poluição) também provocam distorções nos dados referentes aos índices de vegetação. Isso porque provocam o efeito de dispersão da radiação solar antes que esse alcance a superfície terrestre e absorva a radiação refletida antes que chegue ao sensor, alterando dessa forma o comportamento espectral da vegetação como mencionado anteriormente. Nos índices de vegetação que se baseiam na diferença vermelho – infravermelho próximo, o efeito dos aerossóis causa a diminuição do contraste entre a reflectância da banda do vermelho com a banda do infravermelho próximo, fazendo com que o valor de índice da vegetação seja menor (HUETE, 1999).

O índice de vegetação mais comumente utilizado nas pesquisas relacionadas às

coberturas vegetais, tanto de florestas, como cultivos agrícolas é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (**Equação 1**). Esse índice é baseado no comportamento diferenciado das regiões do espectro eletromagnético correspondentes ao vermelho e infravermelho próximo, quando levado em conta a vegetação. Enquanto no comprimento de onda do vermelho há uma grande quantidade de absorção por parte da vegetação, na região do infravermelho próximo há uma maior reflectância. Dessa forma, por meio da razão da diferença entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo e a soma dessas duas bandas tem-se a normalização dos resultados com valores de -1 a +1. A normalização dos resultados possibilita a eliminação das diferenças dos ângulos solares e contribui para a minimização dos efeitos atmosféricos em séries temporais (ROUSE *et al.*, 1973).

Equação (1)

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_{VERMELHO})}{(\rho_{IVP} + \rho_{VERMELHO})}$$

Onde: IVP = Reflectância do Infravermelho próximo

Verm = Reflectância do Vermelho

Uma característica do NDVI é sua rápida saturação, ou seja, os valores tendem a se estabilizarem quando atingem um determinado valor. Dessa forma, mesmo a densidade do dossel sofrendo acréscimo, o valor permanece o mesmo. O NDVI também possui grande sensibilidade à presença de aerossóis, sendo que quanto maior for a presença de aerossóis na atmosfera, maior será a degradação do valor final de NDVI (GOWARD *et al.*, 1991; TEILLET, 1989). Outra causa da saturação dos valores de NDVI ocorre porque o algoritmo do NDVI foi desenvolvido para gerar valores dentro do intervalo entre -1 e +1. Essa definição do intervalo foi criada para realçar os valores baixos de NDVI em detrimento aos valores mais elevados, ou seja, em variações com valores baixos de NDVI. O aumento no intervalo tende a ser maior do que a mesma variação com valores mais altos de NDVI (HUETE, 1999).

3.1.1 Enhanced Vegetation Index (EVI)

Uma série de índices de vegetação baseados nos princípios do NDVI foi gerada com a função de maximizar a precisão dos resultados, diminuindo os ruídos e limitações inerentes ao NDVI.

O *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) foi desenvolvido por Huete (1988) com o intuito de diminuir a interferência do solo exposto sobre o sinal da vegetação. Isso foi possível por meio da definição de um fator de ajuste referente ao substrato do dossel. Esse fator varia em relação à densidade da cobertura da vegetação. O SAVI pode ser descrito conforme **Equação 2**.

Equação (2)

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IVP} - \rho_{VERMELHO})}{(\rho_{IVP} + \rho_{VERMELHO} + L)}$$

Onde L refere-se ao fator de ajuste do índice para a presença do dossel. Esse valor pode variar entre 0 quando há alta densidade de cobertura vegetal até 1 para áreas com baixa densidade de cobertura vegetal. Os valores ρ_{IVP} e $\rho_{VERMELHO}$ referem-se aos comprimentos de onda do infravermelho próximo e vermelho respectivamente (HUETE, 1988).

Para diminuir a influência e ruídos causados pelos aerossóis presentes na atmosfera, Kaufman (1992), desenvolveu o índice *Atmospheric Resistent Vegetation Index* (ARVI). O princípio deste índice baseia-se na correção dos valores da radiação correspondente a banda do vermelho, utilizando a diferença de radiação entre as bandas do azul e vermelho. A equação referente ao ARVI é descrita conforme **Equação 3**.

Equação (3)

$$ARVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_{VERMELHO AZUL})}{(\rho_{IVP} + \rho_{VERMELHO AZUL})}$$

Onde ρ_{IVP} refere-se ao valor de reflectância da banda do infravermelho próximo. Já os valores correspondentes ao ρ

vermelho azul são resultantes da equação ($\rho_{\text{vermelho}} - \gamma (\rho_{\text{azul}} - \rho_{\text{vermelho}})$), sendo que o valor de γ dependerá do tipo de aerossol presente na região em estudo. Os valores de ρ_{vermelho} e ρ_{azul} são referentes à reflectância das bandas do azul e vermelho (LIU *et al.*, 2004).

Com o objetivo de unir a redução da participação das áreas de fundo do dossel e presença de aerossóis (Figura 3.1) desenvolveu-se o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), otimizando dessa forma a resposta da vegetação, além da capacidade de gerar resultados mais precisos em regiões de maior biomassa (VERMOTE *et al.*, 2002). A equação do EVI é descrita conforme a **Equação 4**.

Equação 4

$$\text{EVI} = G \frac{\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{VERMELHO}}}{\rho_{\text{IVP}} + C_1 \times \rho_{\text{VERMELHO}} - C_2 \times \rho_{\text{AZUL}} + L}$$

Onde, ρ_{IVP} , ρ_{vermelho} e ρ_{azul} referem-se aos valores corrigidos de reflectância das bandas do infravermelho próximo, vermelho e azul respectivamente. O valor de G é o ganho, já o valor de L é o fator de ajuste para o fundo do dossel. C1 e C2 são coeficientes que utilizam a banda do azul para diminuir a influência de aerossóis na banda do vermelho e são denominados de coeficientes da resistência de aerossóis. Os valores para os coeficientes utilizados no EVI são: G= 2,59, L= 1, C1= 6 e C2= 7,5 (HUETE *et al.*, 1994).

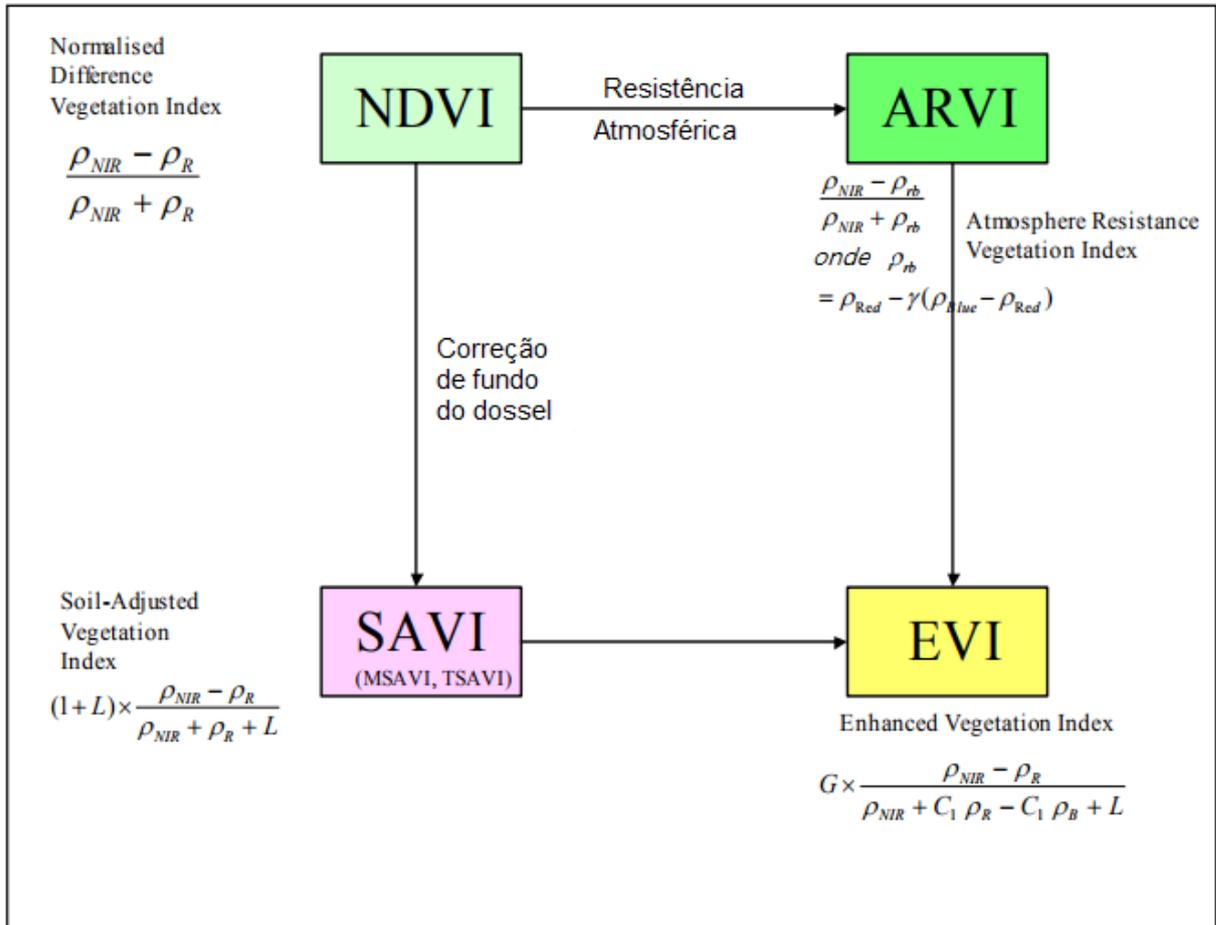


Figura 3.1 – A Evolução do EVI.
Fonte: adaptado de Potgieter (2009).

Ainda segundo Pardi Lacruz (2007), o EVI possui a capacidade de apresentar respostas mais eficazes para identificar a variação da estrutural do dossel que vão desde o índice de área foliar, tipo do dossel, fisionomia da planta e arquitetura do dossel, garantindo maior sensibilidade para todo o espectro de paisagens.

3.2 SENSOR MODIS

O sensor *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) faz parte do programa *Earth Observing System* (EOS), iniciado em 1980 pela NASA, que tem como objetivo estudar os processos de mudanças globais. Os satélites do programa EOS possuem um diferencial em relação aos demais satélites orbitais, a plataforma possui um conjunto de sensores, e não apenas um como de costume. Desta forma os satélites podem coletar diferentes tipos de dados em um mesmo momento.

As imagens MODIS possuem três resoluções espaciais diferentes, 250 m para as duas primeiras bandas do sensor que correspondem ao vermelho e ao infravermelho próximo respectivamente, 500 m para as cinco bandas que também servem para estudos continentais, além da resolução de 1.000 m para outras 29 bandas.

Outra característica que diferencia o sensor MODIS se deve ao fato de ele estar a bordo de dois satélites diferentes, Terra e Aqua, ou seja, existem dois sensores MODIS, um para cada satélite. O Terra foi o primeiro satélite lançado pelo programa EOS em 1999. A segunda plataforma foi lançada em 2002 com mais cinco sensores a bordo. Como cada satélite possui um horário de funcionamento, Terra matutino, Aqua vespertino, os dados adquiridos pelo sensor MODIS possibilitam uma análise em diferentes períodos de um mesmo dia.

3.2.3 Produtos do Sensor MODIS para Vegetação

O Sensor MODIS foi desenvolvido para servir de fonte de dados para diversas áreas de aplicação, divididas em terrestres, oceânicas e atmosféricas. Para facilitar a utilização dos dados gerados pelo sensor, esses são transformados em uma série de produtos, tais como, índice de vegetação, índice de área foliar, entre outros. Esses produtos se dividem ainda em 44 grupos de aplicação: calibração, atmosfera, continente, criosfera e oceano. Um dos produtos voltados para vegetação é o produto MOD13 (RUDORF, SHIMABUKURO e CEBALLOS, 2007).

O algoritmo final para a geração dos índices de vegetação MODIS opera *pixel a pixel*, baseadas na ingestão de dados do Produto MOD09 L2G referente às imagens de reflectância da superfície. A coleta de imagens de entrada para a composição do produto MOD13 é realizada a partir de observações realizadas ao longo de 16 dias e devido às múltiplas observações podem ser coletadas até 64 imagens.

A variação na quantidade de imagens utilizadas mudará de acordo com a presença de nuvens e pela real resolução espacial do sensor. Podendo ser coletados 64 ou nenhuma imagem. Após os 16 dias de coleta um filtro baseado na quantidade de nuvens, qualidade e geometria de captura é aplicado sobre as imagens (Figura 3.2).

As imagens que passam por esse filtro, ou seja, as imagens livres de nuvem, visualização próxima ao nadir e com o mínimo de resíduos de aerossóis são consideradas de qualidade superior. Na maior parte das composições de 16 dias o número de imagens filtradas é menor do que dez e em casos frequentes, menor do que cinco (HUETE *et al.*, 2002).

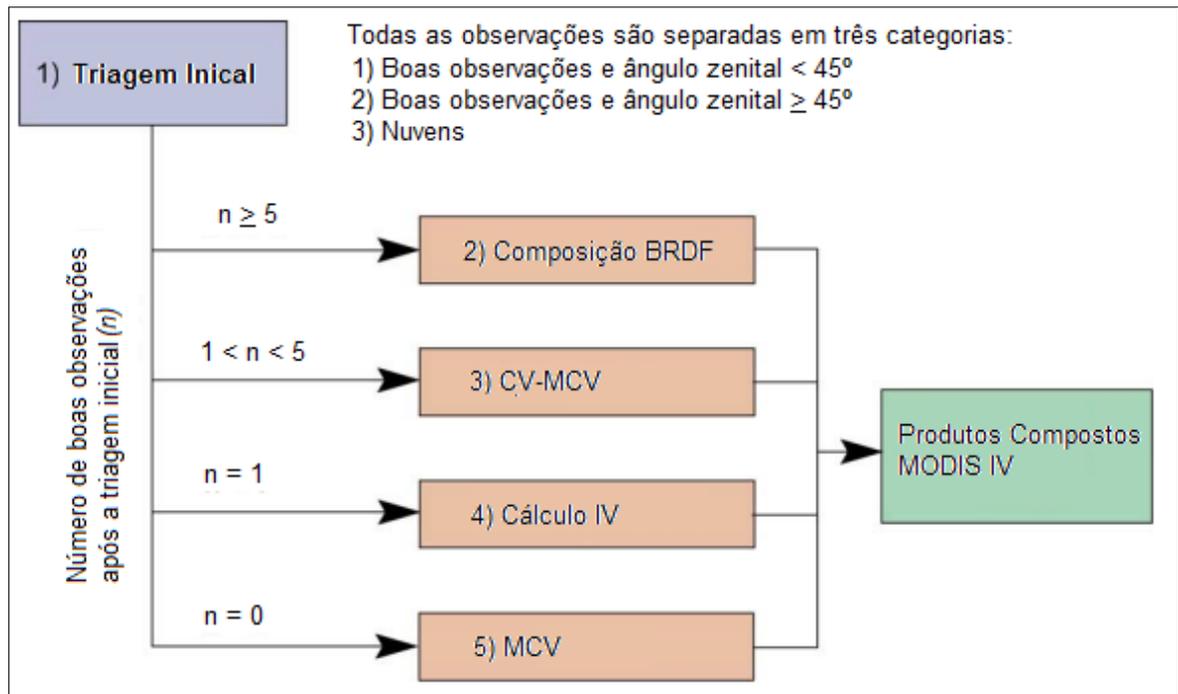


Figura 3.2 – Geração de Composição do Produto MODIS Para Índice de Vegetação.

Fonte: adaptado de Huete *et al.*, 2002

Como pode ser observado no diagrama da Figura 3.2, as imagens filtradas são aplicadas a uma metodologia que consiste na aplicação de um algoritmo baseado nas informações dos dados filtrados. O objetivo desta metodologia é selecionar a melhor observação que represente de forma mais significativa, espacial e temporal, os 16 dias de observação. O algoritmo para a geração do produto final do índice de vegetação é baseado em três componentes que irão variar de acordo com a quantidade de imagens disponível e a qualidade desses dados (RODERICK, SMITH, & LODWICK, 1996).

O primeiro método a ser aplicado é o *Bidirecional Reflectance Distribution Function* (BRDF). Para ser aplicado esse método é necessário um número de cinco ou mais

imagens filtradas, todas essas imagens são utilizadas para normalizar e interpolar a reflectância de superfície em relação à imagem com menor ângulo de visada e então gerar os índices de vegetação correspondentes ao NDVI e EVI. Quando não há disponibilidade de ao menos cinco imagens, o método utilizado é o *Constrained-view Angle-maximum Value Composite* (CV-MVC), que selecionará a observação mais próxima ao nadir baseado na comparação dos dois maiores valores de NDVI com a finalidade de reduzir as discontinuidades espaciais e temporais do produto composto. Nesse caso tanto o EVI quanto o NDVI são calculados a partir do mesmo *pixel* observado (RODERICK, SMITH, & LODWICK, 1996).

Caso apenas uma observação esteja disponível o índice de vegetação é calculado utilizando esse único valor, sem a necessidade de aplicação de um método específico. Já para os casos onde nenhuma das 64 possíveis observações passou pela etapa de filtragem aplica-se o método *Maximum Value Composite* (MVC). Esse método é baseado na escolha simples do maior valor de NDVI observado pelas imagens coletadas. O método MVC é projetado para minimizar os efeitos atmosféricos, incluindo a presença de nuvens. Já o ângulo de visada não possui tanta influência em *pixels* de dados não corrigidos atmosféricamente (HUETE *et al.*, 2002).

Os produtos MOD13, independentes da escala, além dos índices de vegetação (NDVI e EVI), também dispõem de:

- Duas imagens com informações que atestam a qualidade dos produtos Índice de Vegetação - NDVI *Quality* e EVI *Quality*;
- Imagens refletância das bandas BLUE, RED, NIR e MIR;
- Três imagens referentes à maneira em que esses dados foram adquiridos, ângulo de visada, ângulo zenital solar e azimute.

O produto MOD 13 possui ainda uma variação em relação à resolução espacial e temporal conforme a Figura 3.3.

Produto	Periodicidade	Resolução Espacial
MOD13A1	16 dias	500 m
MOD13Q1	16 dias	250 m
MOD13A2	16 dias	1 km
MOD13A3	Mensal	1 km
MOD13C1	16 dias	25 km
MOD13C2	Mensal	25 km

Figura 3.3: Características dos produtos MOD13

3.3 SÉRIES TEMPORAIS

Entende-se por série temporal um conjunto de dados que representam um valor real de forma contínua ou discreta, e esses valores se repetem com uma equidistância temporal específica. Essa variação temporal possui ainda a capacidade de apresentar um comportamento periódico, cíclico, transitório ou totalmente aleatório (WAGNER *et al.*, 2015).

A utilização de séries temporais no sensoriamento remoto tem se mostrado como uma ferramenta de significativo valor para compreender a dinâmica da superfície terrestre, além de possibilitar a análise da magnitude das variações ocorridas em um período preestabelecido (WAGNER *et al.*, 2015).

Os avanços das análises de séries temporais baseada em dados de sensoriamento remoto baseado em séries temporais aplicadas sobre índices de vegetação propiciam uma gama de possibilidade para o monitoramento sazonal e/ou anual de variações ocorridas na vegetação, principalmente em ambientes delicados e com sensibilidade ambiental fragilizada; como nos casos dos Parques Nacionais e Corredores Ecológicos. O grande volume de dados e facilidade no acesso de dados multiespectrais com alta resolução temporal, mostra-se como uma fonte de informações sobre a condição e para acompanhamento de diferentes coberturas vegetais, mais eficaz que dados com alta resolução espacial, espectral ou

radiométrica (JAKUBAUSKAS *et al.*, 2002).

3.4 ANÁLISE HARMÔNICA

A análise harmônica vem se mostrando como um importante instrumento de análises de séries temporais compostas por índices de vegetação, como NDVI e EVI. Por meio de uma metodologia baseada em Transformadas de Fourier, é possível decompor as séries temporais e realizar análises da periodicidade e do tipo de alterações que ocorre em diferentes coberturas vegetais, baseado principalmente na identificação da dinâmica temporal de diferentes fenologias (JAKUBALSKI, *et al.*, 2001).

A análise de séries temporais pode ser decomposta por meio da Transformada de Fourier que decompõe um sinal em uma série de componentes. Cada um dos componentes é denominado de harmônico. Por definição, a análise destes harmônicos possui a capacidade de representar uma função composta pelo somatório de ondas senoidais, definindo um valor de amplitude e fase para cada uma das ondas (JAKUBALSKI, *et al.*, 2001).

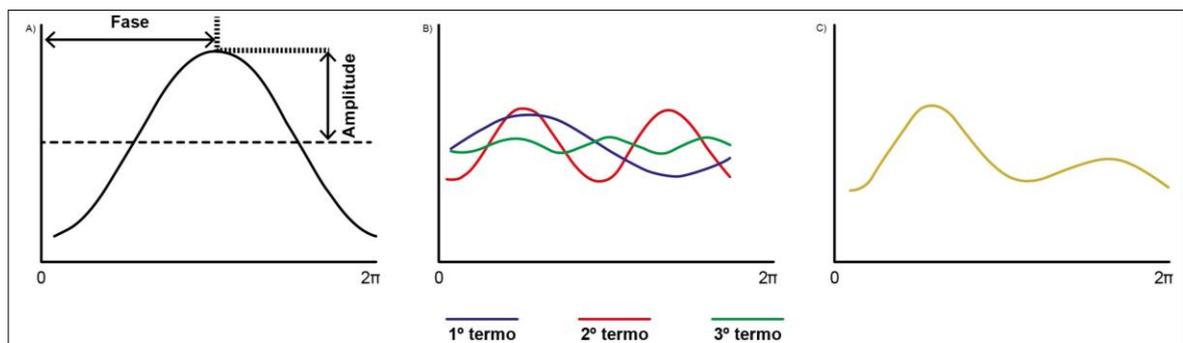


Figura 3.4 – A) Primeiro Harmônico Representado Pela Curva do Seno; B) Curvas Para os Três Primeiros Harmônicos; c) Soma das Curvas.

Fonte: adaptado de JAKUBAUSKAS *et al.*, (2002).

A amplitude é a representação da metade do valor onde a função é maximizada, já a fase representa a variação que ocorre entre a origem e o ponto máximo da onda em um intervalo de 0 a 2π . Sendo assim, cada onda será referente ao número de ciclos completos de uma onda durante um determinado período T , o primeiro harmônico, também denominado de harmônico fundamental será relativo ao período que corresponde a uma onda completa da série analisada, o segundo harmônico, por sua

vez, representará um período igual à metade do tempo do harmônico fundamental T/s . Já o terceiro harmônico corresponde à metade do período representado no segundo harmônico $T/3$, ou seja, no caso do harmônico fundamental ser anual, o harmônico secundário será semestral e o terceiro harmônico trimestral e assim por diante. Isso ocorre sucessivamente de acordo com o número de harmônicos utilizados (Figura 3.4) (PANOFSKY E BRIER, 1968).

Segundo Jakubalski *et al.* (2001), por meio de uma Transformada Discreta de Fourier é possível representar uma série temporal composta por n amostras, conforme a **Equação 5**.

Equação (5)

$$f(x)_t = \bar{c} + \sum_{j=1}^{N/2} c_j \cos\left(\frac{2\pi t}{N} - \varphi_j\right)$$

Onde:

\bar{c} = média dos valores da série temporal

c_j = amplitude do harmônico j^{th}

φ_j = ângulo de fase do harmônico j^{th}

A equação para calcular a amplitude, por sua vez, é gerada a partir dos valores reais e imaginário segundo a **Equação 6** (JAKUBALSKI, *et al.*, 2001).

Equação (6)

$$c_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2}$$

Onde os termos a e b são os componentes de cosseno e seno para o vetor de amplitude e representam os números reais e imaginários. Esses valores são obtidos por meio das **Equações 7 e 8**.

Equação (7)

$$a_j = \frac{2}{N} + \sum_{t=1}^N y_t \cos\left(\frac{2\pi t}{N}\right), \text{ para } t \geq 0$$

Equação (8)

$$b_j = \frac{2}{N} + \sum_{t=1}^N y_t \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{N}\right), \text{ para } t \geq 1$$

Já o ângulo de fase é definido através da **Equação 9**.

Equação (9)

$$\varphi_j = \begin{cases} \arctan \frac{b_j}{a_j}, & \text{se } a_j > 0. \\ \arctan \frac{b_j}{a_j} \pm \pi, & \text{se } a_j < 0. \\ \frac{\pi}{2}, & \text{se } a_j = 0 \end{cases}$$

As imagens resultantes da Transformada de Fourier são geradas numa base de *pixel* para cada composição presente na série temporal. Segundo Jakubalski *et al.* (2001), a utilização dos primeiros harmônicos pode estar associada a aplicação de um filtro passa-baixa na série temporal, eliminando assim ruídos presentes nos dados originais.

3.4.1 Algoritmo da rotina *HANTS*

O algoritmo *Harmonic Analysis Time Series (HANTS)*, utilizado nesse trabalho para

gerar os dados de termo aditivo, imagens de amplitude e fase referentes à análise harmônica, foi criado com o objetivo de gerar rapidamente uma suavização e reconstrução de uma série temporal de dados NDVI baseado em transformação discreta de Fourier (ROERINK, 2003).

O *HANTS* utiliza o princípio básico de que o desenvolvimento da vegetação, representado por uma série temporal NDVI, por exemplo, possui uma caracterização sazonal bem presente na maior parte dos biomas. Esse efeito sazonal pode ser decomposto e descrito por meio de funções seno de baixa frequência composta por várias fases, frequências e amplitudes. Os valores da série temporal, identificados por picos aleatórios são considerados ruídos de altas frequências (ROERINK, 2003).

O fluxo de trabalho do *HANTS* (Figura 3.5) inicia lendo os valores do índice de vegetação da série temporal, após isto, os valores são utilizados como dados de entrada para a aplicação da transformação rápida de Fourier (FFT), onde também, são selecionados os harmônicos a serem gerados. Aplica-se então a FFT inversa, que irá reconstruir a série temporal para o domínio espacial, já filtrada (ROERINK, 2003).

Uma vez gerada a série reconstruída, os valores filtrados são comparados com os valores originais. Para aqueles que estiveram abaixo de um limiar previamente definido será considerado como "nuvem" e substituído pelo valor da série filtrada. Porém, uma vez substituídos os valores abaixo do limiar, a média geral dos valores da série temporal tende a aumentar, dessa forma gera-se outra iteração e o processo inicia-se novamente, continuando em repetição até que nenhum ponto passível de ser definido como "nuvem" seja encontrado e substituído (ROERINK, 2003).

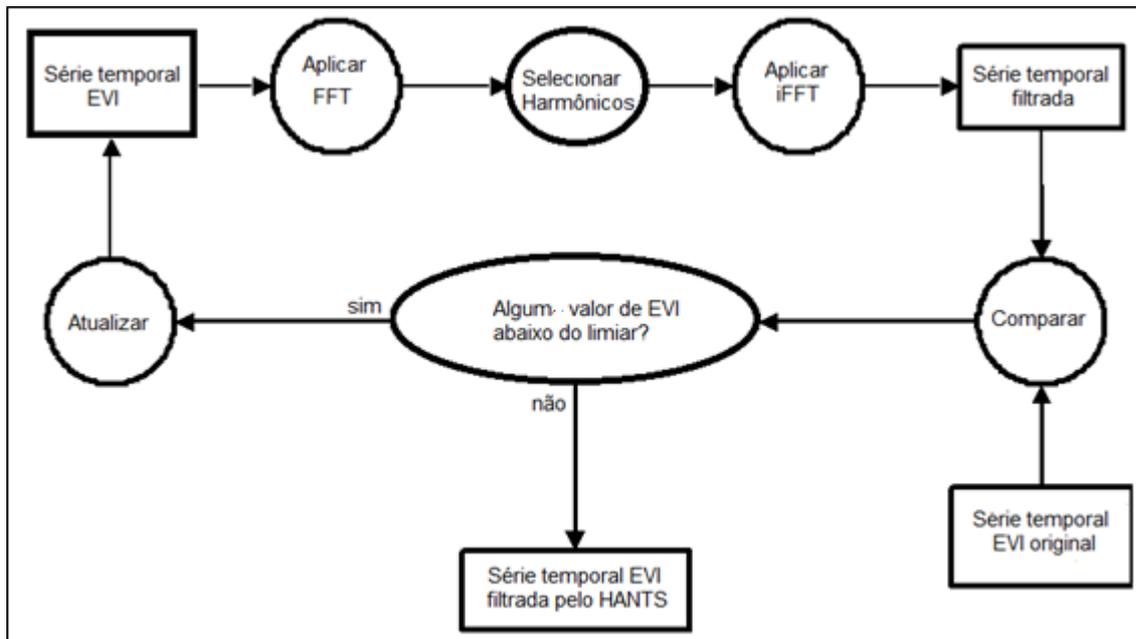


Figura 3.5 – Síntese do Algoritmo *HANTS*.
 Fonte: adaptado de Roerink (2003).

Uma vez extraídos os valores referentes ao termo aditivo, imagens de amplitude e fase, pode-se fazer uma análise individual dos dados ou realizar uma composição colorida a partir dessas três fontes de dados. O resultado dessa composição tende a mostrar de forma espacializadas as diferenças de comportamento dos diferentes tipos de cobertura da superfície. Porém, como os valores da imagem de fase são gerados em uma escala circular, diferentemente das imagens de amplitude e termo aditivo, a associação destes dados a uma composição RGB não geraria resultados satisfatórios uma vez que a escala de cores RGB há uma alternância abrupta entre cores brilhantes e escuras. Dessa forma, pode-se utilizar como alternativa para a otimização da análise visual de composições dos produtos da análise harmônica, a escala de cores *Hue, Lightness, Saturation* (HLS), onde a componente *Hue* possui uma variação entre 0° e 360° , semelhante ao intervalo de valores da imagem fase (HALLBEYER, 2007).

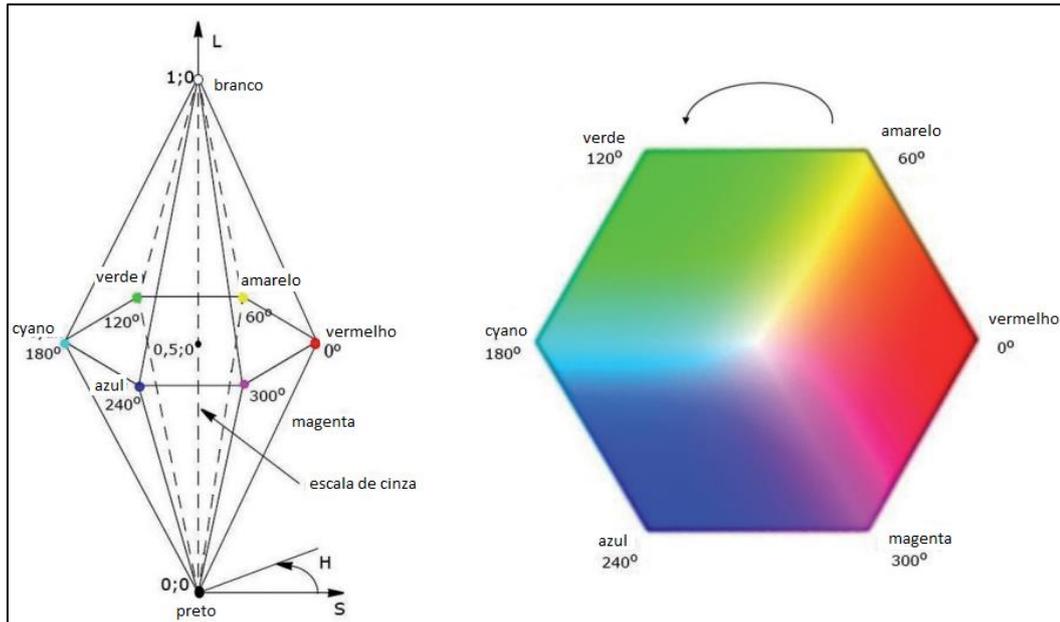


Figura 3.6 – Espaço de Cores HLS.
Fonte: adaptado de Antunes (2013).

Conforme a Figura 3.6 o espaço de cores HLS é representado por um duplo hexacone, onde a componente *Hue* (Matiz) está situada no eixo vertical do hexacone sendo a cor representada por um ângulo entre 0° e 360° distribuídos em sentido anti-horário, iniciando da cor mais quente para a cor mais fria. Dessa forma, a transição entre cores ocorre de forma gradual e suavizada. A componente *Lightness* (luminosidade), varia entre 0 representando o preto (ausência de luminosidade) e 1 representando o branco (luminosidade total). O valor de 0,5 representa a cor pura. Por sua vez, a componente *Saturation* (saturação) representa a variação da cor pura para o branco em uma escala de cinza.

A utilização de análise harmônica baseada na aplicação da Transformada de Fourier sobre séries temporais de índices de vegetação tem sido utilizada em estudos sobre fenologia da vegetação, uma vez que devido ao comportamento sazonal dos diferentes tipos de vegetação é possível relacionar com o comportamento dos parâmetros gerados na análise harmônica.

O comportamento dos termos amplitude e fase em estudos sobre vegetação podem ser indicativos do tipo de mudança que ocorre na região de interesse. Segundo Pardi

Lacruz (2005), mudanças que ocorrem somente no termo amplitude tendem a indicar variações na cobertura de uso do solo ou nas condições da vegetação. Já as mudanças que ocorrem na fase, possuem a capacidade de demonstrar o quanto um dado tipo de vegetação mantém-se no estágio de maior vigor. As mudanças que ocorrem tanto na amplitude quanto na fase possivelmente indicam mudanças abruptas na superfície.

Uma série de trabalhos acadêmicos aplicou a análise harmônica para descrever o comportamento de ambientes florestais e agrícolas por meio da utilização de dados de índices de vegetação calculados a partir de dados de vários sensores com alta resolução temporal.

Roerink *et al.* (2000) utilizou os dados de índices de vegetação oriundos do sensor AVHRR para realizar um estudo de um ano, com o objetivo de identificar quais as composições semanais apresentavam ocorrência de nuvens. Porém com análises realizadas identificou-se que a partir da geração de análises harmônicas é possível descrever o comportamento do NDVI com os dados de amplitude e fase. Nesse trabalho, os autores desenvolveram o algoritmo *HANTS*.

Jakubauskas *et al.* (2002) utilizou dados de NDVI do sensor AVHRR da região das Grandes Planícies do Sul dos Estados Unidos da América, para analisar por meio da análise harmônica as possíveis consequências das mudanças climáticas sobre a área de estudo. O Objetivo do trabalho foi identificar as interações entre os fatores ambientais e a variabilidade anual das diferentes coberturas vegetais. Sendo uma das conclusões apresentadas que a utilização de dados com maior resolução espacial, tais como o MODIS, propiciou uma melhor resposta, principalmente pela menor mistura de *pixels*.

Pardi Lacruz (2007) realizou a análise da paisagem e análise de lacunas de conservação baseada na aplicação de séries temporais de dados MODIS, nos corredores ecológicos sul da Amazônia e Jalapão, na região norte do Brasil. Nesse trabalho também foi analisada a aplicação dos índices de vegetação NDVI e EVI,

sendo que as imagens EVI apresentaram melhor desempenho que o NDVI, causado pela saturação do NDVI em áreas com altos valores de biomassa.

Antunes *et al.* (2013) realizaram a análise da fenologia da vegetação na região da bacia do Alto Paraguai, a partir da representação de ciclos harmônicos de séries temporais de imagens EVI do sensor MODIS. A série utilizada foi de dez anos hidrológicos, entre o período de outubro 2001 a setembro de 2011. Uma das etapas de análise apresentada constituiu na representação visual do termo harmônico correspondente a amplitude e ângulo de fase para o ciclo anual, por meio da combinação de cores do espaço HLS. As imagens resultantes da transformação dos dados para o espaço de cores HLS, segundo o autor, apresentou coerência em relação aos padrões fenológicos da vegetação presente na área de estudo.

3.5 CRESCIMENTO DA *Araucaria angustifolia*

Sendo a *Araucaria angustifolia* a árvore de maior destaque para a floresta ombrófila mista e o motivo da existência de uma série de unidade de conservação, tais como o Parque Nacional das Araucárias, o entendimento da sua fenologia de forma específica apresenta-se como uma importante necessidade. Zanon (2010) analisou o crescimento anual de exemplares de *Araucaria angustifolia* e relacionou o incremento anual que compõe o crescimento de cada indivíduo analisado com eventos climatológicos, tais como precipitação e temperatura média. O estudo foi realizado em uma floresta no município de São Francisco de Paula – RS, durante os anos de 2004 a 2007.

Nesse estudo Zanon (2010) identificou a relação direta entre a taxa de crescimento observada nas árvores e os dados de precipitação e temperatura. Para as amostras utilizadas no trabalho segundo a autora, foi possível verificar que com o aumento da temperatura havia um maior crescimento dos indivíduos, cessando ou diminuindo a taxa de crescimento nos períodos com temperaturas mais baixas. Os maiores incrementos do tronco e conseqüente maior biomassa, foram associados às maiores temperaturas médias mensais e também, aos períodos com maior precipitação. Sendo o início do crescimento anual ocorrendo no mês de setembro com pico em janeiro, iniciando o decréscimo a partir de março.

4. METODOLOGIA

A partir de séries temporais de índices de vegetação gerados pelo sensor MODIS entre os anos de 2006 e 2015, serão aplicadas análises harmônicas para caracterizar o desenvolvimento fenológico das diferentes coberturas vegetais encontradas no Corredor Ecológico Chapecó, de forma a identificar áreas com maior presença de *Araucaria angustifolia* no interior do Parque Nacional das Araucárias, baseado nas imagens termo aditivo, amplitude e fase geradas por análise harmônica.

4.1 MATERIAIS

- Composições de índices - EVI, gerados pelo produto MOD13Q1 do sensor MODIS, esse produto possui resolução espacial de 250 m. O quadrante utilizado foi o H13V11.
- Imagens de Satélite do sensor Sentinel-2A1C, com resolução de 10 m do ano de 2017. Quadrante utilizado 22JDR.
- Imagens Landsat dos sensores TM e OLI.
- Mapa de uso e ocupação do solo de acordo com o estágio sucessional da vegetação.
- Arquivo vetorial no formato *shapefile*, correspondente aos limites da área de interesse.
- Dados climatológicos de Precipitação e Temperatura Máxima, extraídas das estações meteorológicas do INMET.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS COBERTURAS FLORESTAIS

Para um melhor entendimento das diferentes coberturas de vegetação no interior do Parque Nacional das Araucárias, foi realizada uma coleção de quatro classes, compostas por quatro amostras para cada classe que representam as quatro principais coberturas do solo no interior do parque, sobre uma imagem Sentinel-2A. Para utilizar a imagem Sentinel-2A, foi executado um recorte espacial com base no arquivo vetorial com os limites do Parque Nacional das Araucárias. A escolha dessas

amostras foi feita baseada na análise visual e de conhecimento prévio sobre áreas com cultivo, floresta plantada, florestas sem presença ou com baixa presença de *Araucaria angustifolia*, além de áreas com significativa presença de *Araucaria angustifolia*, conforme figura 4.1.

Nome da Amostras	Latitude	Longitude
Floresta com Araucária 1	26°41'46.01"S	51°58'36.42"W
Floresta com Araucária 2	26°47'8.75"S	51°57'13.67"W
Floresta com Araucária 3	51°57'13.67"W	51°55'42.64"W
Floresta com Araucária 4	26°47'50.12"S	51°52'24.03"W
Floresta sem Araucária 1	26°45'45.99"S	51°57'5.39"W
Floresta sem Araucária 2	26°50'19.08"S	51°59'59.17"W
Floresta sem Araucária 3	26°43'17.04"S	51°59'42.62"W
Floresta sem Araucária 4	26°48'56.33"S	51°47'59.22"W
Floresta Plantada 1	26°41'46.01"S	51°57'46.77"W
Floresta Plantada 2	26°43'33.59"S	51°59'1.25"W
Floresta Plantada 3	26°43'25.31"S	51°55'34.36"W
Floresta Plantada 4	26°44'39.79"S	52°0'15.72"W
Cultivo 1	26°49'54.25"S	51°59'17.80"W
Cultivo 2	26°45'45.99"S	51°58'19.87"W
Cultivo 3	26°49'4.60"S	51°48'32.32"W
Cultivo 4	26°42'10.83"S	51°56'15.74"W

Figura 4.1 – Definição das Amostras.

A partir destas quatro classes, compostas por quatro amostras cada, foram gerados perfis de EVI para cada uma, sobre uma imagem com todas as 230 bandas utilizadas na série temporal; isto é, uma banda a cada 16 dias entre os anos de 2006 e 2015. O perfil temporal dos valores de EVI representa a variação da condição da vegetação

durante todo o período de análise.

4.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS MODIS

Realizou-se o *download* dos produtos correspondentes ao quadrante H13V11 do produto MOD13Q1, ao todo foram coletadas 230 imagens, sendo 23 composições para cada um dos 10 anos. A partir destes dados utilizou-se o programa MODIS *Reprojection Tool*, dentro da interface do *software* ENVI. A partir do MODIS *Reprojection Tool* os dados são convertidos de projeção Sinusoidal para UTM, além de serem extraídas apenas as bandas de interesse, no caso os dados referentes ao EVI e definir o formato de saída como GeoTiff.

Uma vez geradas apenas as imagens correspondentes ao EVI, no formato TIFF, foram então, agrupadas em composições para cada um dos anos da série temporal. Após o agrupamento das imagens, foi gerado um recorte espacial baseado em um arquivo vetorial com os limites do Parque Nacional das Araucárias. Esse recorte teve o objetivo de facilitar a visualização da área de estudo, assim como definir os *pixels* que participarão da análise harmônica.

4.3 IMAGEM SENTINEL-2A

Com a finalidade de auxiliar na análise visual das diferentes coberturas de solo que ocorrem no interior do parque, foram utilizados dados de imagens Sentinel-2A com resolução espacial de 10 m., Porém como a área do parque está no limite de duas órbitas do Sentinel, foi necessário fazer o download de duas cenas. Após o mosaico, foi executado o recorte da cena com os limites do parque, mascarando os valores exteriores ao limite. A mesma imagem foi utilizada para a seleção dos pontos de conferência para a classificação de áreas remanescentes de *Araucaria angustifolia*.

4.4 ÁREAS COM REMANESCENTES DE *Araucaria angustifolia*

Para realizar esta classificação, foram selecionados os *pixels* que possuem valores entre 0,06 e 0,12 na imagem de amplitude e valores de 1, 2 e 12 (meses de janeiro, fevereiro e dezembro). Os *pixels* que atenderam a esses parâmetros para todas as imagens correspondentes aos anos de 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015, foram definidos como remanescentes com elevada presença de *Araucaria angustifolia*.

Para executar a acurácia da classificação gerada, foram gerados por meio do *software* ENVI, por meio de ferramentas de geração de amostras aleatória baseado nas informações de toda a população de *pixels* presentes. O resultado foi a geração de 163 pontos.

4.5 GERAÇÃO DA ANÁLISE HARMÔNICA

Para uma melhor compreensão das diferenças de variação e período de variação dos valores de EVI ao longo da série temporal, foi aplicada sobre as composições de EVI do produto MOD13Q1, a técnica denominada de análise harmônica, que conforme explicada anteriormente, decompõem os dados em ciclos harmônicos de tal forma que se tornam possíveis as identificações da amplitude destas variações, bem como a sua sazonalidade.

A aplicação da análise harmônica foi realizada por meio da rotina *HANTS*, cujos produtos gerados são um conjunto de dados do tipo *DCOMPLEX*, que após convertidos geram uma imagem de tempo aditivo, além de imagens de amplitude e fase para cada um dos harmônicos processados.

4.5.1 Algoritmo da rotina *HANTS*

A geração da análise harmônica foi realizada por meio da rotina *HANTS* desenvolvida em *Interactive Data Language* (IDL). Para a utilização da rotina foi utilizado uma seção

do *software* IDL, onde se abriram os algoritmos que compõem esta ferramenta (ANEXO 1) e foram definidos os parâmetros conforme descrição abaixo:

- *Fit Error Tolerance* (Fet): definido como sendo o desvio maior aceitável entre os valores de EVI e ajustáveis da série de Fourier. Nesse caso, foi definido o valor de 2 DN.
- Frequência: correspondente a um vetor contendo a quantidade de harmônicos a serem gerados. Nesse caso, foram gerados três harmônicos (anual, semestral e trimestral). Sendo o primeiro a média dos valores. [0, 1, 2, 3].
- Intervalo: o menor e o maior valor de EVI encontrado nos dados. Neste caso, sendo o valor 0,1 e 1 respectivamente.
- *Throw Away Treshold* (Tat): a quantidade máxima de observações que podem ser descartadas durante o processo, sendo definido o valor de dois.
- Imax: número de iterações executadas durante o processamento. Neste caso, foi utilizado o valor de 25.

Definidos esses parâmetros na linha de comando do IDL, foi selecionado o arquivo correspondente para cada ano da série utilizada, bem como, a máscara referente à área interna do Parque Nacional das Araucárias.

O arquivo de saída é do tipo *double complex*; sendo então necessário extrair os valores de amplitude e fase para cada um dos anos da série temporal. Para cada ano será gerado um arquivo composto por oito bandas:

- Amplitude 1
- Amplitude 2
- Amplitude 3
- Amplitude 4
- Fase 1
- Fase 2
- Fase 3
- Fase 4

As imagens amplitude 1 e fase 1 representam médias. Dessa forma, a amplitude 1 é

denominada de temo aditivo, sendo a representação da média aritmética dos dados de EVI ao longo do ano. A imagem fase 1 possui valor zero para os *pixels*.

As imagens de amplitude 2 e 3 representam a variação máxima que ocorreu em cada um dos *pixels* presentes na máscara utilizada. Os valores de amplitude são no mesmo intervalo dos valores de EVI, ou seja, entre 0 e 1. *Pixels* com valores maiores na imagem de amplitude 1 indicam que possuem um padrão anual (unimodal) de variação. Já para os *pixels* com alto valor de variação na banda amplitude 3 indicam um padrão semestral (bimodal) de variação.

Para as imagens fase 2 e 3, os valores do *pixel* possuem intervalo associados a valores entre 0° a 360° e indicam o momento na série temporal onde ocorre a maior variação dos valores de EVI.

4.5.2 Conversão de RGB para HLS

Com o objetivo de facilitar a visualização dos dados, principalmente a análise visual, os dados foram convertidos para o espaço de cores HLS e geradas composições utilizando os dados do temo aditivo, bem como de fase e amplitude do primeiro harmônico.

Uma vez definida uma composição colorida baseado nos dados extraídos pela rotina *HANTS* é possível converter para o espectro de cores denominado HLS, onde a partir dos dados de Matiz (*hue*), será possível associar a cor dos *pixels* aos meses onde ocorre a maior variação dos dados de EVI. Isso ocorre porque os valores de Matiz variam de 0° a 360° (relacionados aos meses do ano).

Para realizar esta conversão, utilizou-se a composição RGB com as bandas de fase e amplitude referentes ao primeiro harmônico, isso porque, segundo o padrão de valores de EVI encontrados, mostras que o padrão fenológico das principais coberturas da vegetação presentes no Parque Nacional das Araucárias é anual, além do temo aditivo:

- R: Fase 2
- G: Amplitude 2
- B: Amplitude 1

A partir do *software* ENVI, as composições anuais foram convertidas de RGB para HLS. Dessa forma, a banda da fase 2 passa a ser a banda *Hue*, a banda amplitude 2 passa a ser a *Lightness* e a banda amplitude 1 passa a ser *Saturation*.

Por meio desta imagem de saída, foram geradas composições coloridas HLS, além, de gerados fatiamentos de densidade baseado na banda *Hue* (fase 2). Esse fatiamento foi realizado em 12 possíveis cores, uma cor para cada um dos meses do ano. Dessa forma, pode-se fazer uma relação direta entre a cor do *pixel* e o mês a qual ele representa a variação.

4.6 DADOS CLIMATOLÓGICOS

Todos os dados meteorológicos utilizados nesse trabalho foram retirados do Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP), para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia, esse banco de dados encontra-se disponível por meio eletrônico junto ao INMET.

Os dados de Temperatura e Precipitação foram coletados na estação convencional do município de Campos Novos – SC, que está situado a aproximadamente 100 km de distância da região de estudo. A pesquisa para acesso aos dados foi realizada baseada em medidas mensais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DINÂMICA SAZONAL DOS VALORES DE EVI

A partir destas quatro classes, compostas por quatro amostras cada, disponibilizadas espacialmente conforme a Figura 5.1, foram gerados perfis de EVI para cada conjunto, sobre uma imagem com todas as 230 bandas utilizadas na série temporal; isto é, uma banda a cada 16 dias entre os anos de 2006 e 2015. O perfil temporal dos valores de EVI representa a variação da condição da vegetação durante todo o período de análise.

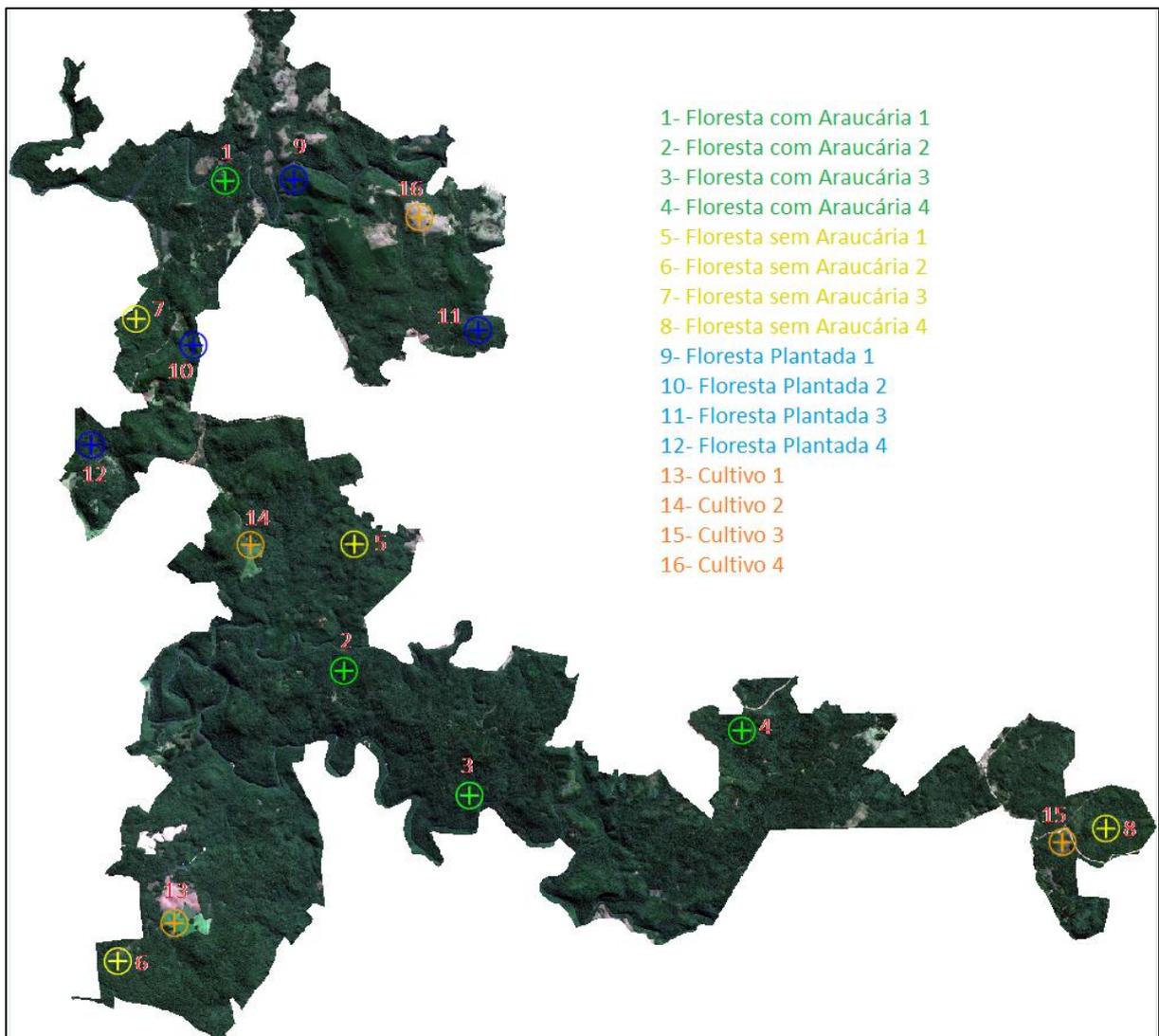


Figura 5.1 – Distribuição Espacial das Amostras.

Como pode ser percebida nas amostras referentes a classe Floresta com Araucária e Floresta sem Araucárias (Gráfico 5.1 e 5.2), o padrão de variação dos valores de EVI, é basicamente unimodal durante todo o período, ou seja, possui uma variação anual bem caracterizada com um pico de máximo valor único. Nas amostras, pode ser percebido um forte acréscimo do valor de EVI nos meses de dezembro e janeiro iniciando a queda a partir dos meses de abril, maio e fevereiro. Este padrão de apenas um pico de máximo vigor vegetativo durante o ano das coberturas florestais da floresta ombrófila mista, também foram identificados por *Fontana et al.* (2007), onde, segundo os autores a floresta ombrófila mista apresenta os maiores valores de EVI durante o período compreendido entre o verão e o início do outono, e os menores valores ocorrem a partir do inverno ao início da primavera.

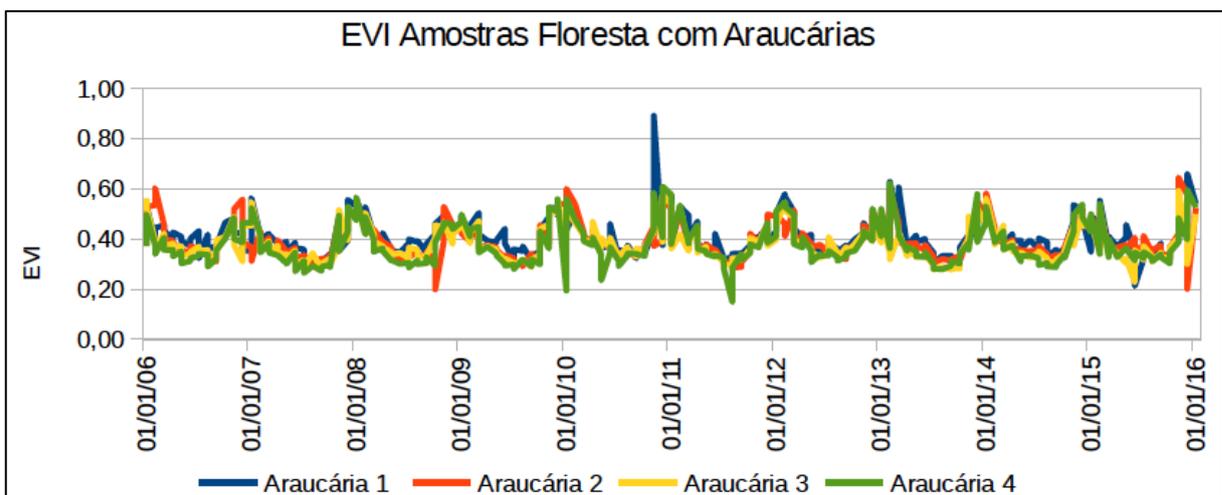


Gráfico 5.1 – Valores de EVI ao longo da Série Temporal para a classe Floresta com Araucárias.

Para o conjunto de amostras deste trabalho, a principal diferença entre as duas amostras é o valor médio do intervalo onde se distribuem os dados de EVI. Enquanto nas áreas que representam as amostras Floresta com Araucárias, os valores variam aproximadamente entre 0,45 e 0,32. Já para as amostras da Floresta sem Araucárias, os valores se mostraram mais elevados e com maior variação ao longo do ano, variando entre 0,6 e 0,4.

Os valores encontrados para as quatro amostras são condizentes com os valores

encontrados na bibliografia (KUPLISH, 2013; SCHIAVO, 2016; ROSEMBACK, 2010), onde apresentam a dinâmica sazonal da floresta ombrófila mista apresenta diminuição dos valores de vigor vegetativo quase sempre entre os meses de março até outubro, quando tendem a sofrer uma elevação novamente chegando ao máximo valor de vigor vegetativo durante os meses. Tanto para as amostras de Floresta com Araucárias e Florestas sem Araucárias tendem a apresentarem sensibilidade para a variabilidade climática característica da região Sul do Brasil, em períodos onde há ocorrência de períodos de estiagem os valores de EVI apresentam anomalias negativas (JACÓBSEN, 2002).

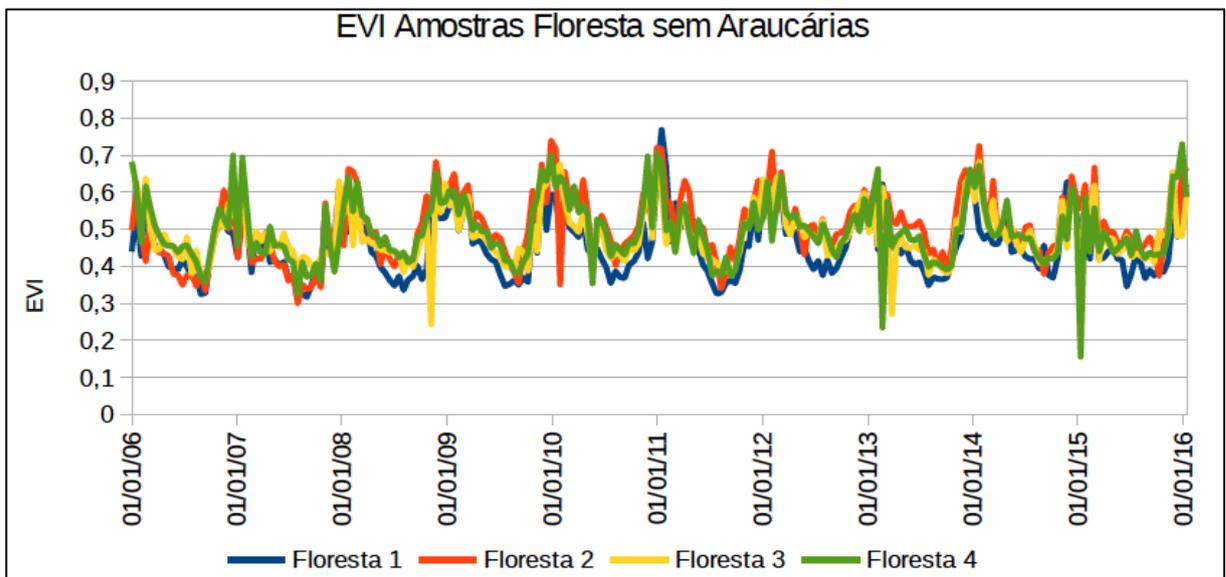


Gráfico 5.2 – Valores de EVI ao longo da Série Temporal para a classe Floresta sem Araucárias.

Para as amostras que representam as áreas com Floresta Plantada, percebe-se um padrão uniforme ao longo da série temporal a partir do ano de 2008, quando se inicia em muitas áreas do Parque Nacional das Araucárias a plantação de florestas, porém com, com dois picos de elevação do valor de EVI ao longo do ano. Os valores variam pouco e estão distribuídos entre 0,54 e 0,42. No Gráfico 5.3, pode ser percebido uma variação do perfil após o ano de 2008, indicando uma mudança na cobertura da superfície, possivelmente com o plantio de florestas compostas por Pinus. Estes valores condizem com estudo realizado por Alvares *et al.* (2013), quem em uma área com plantação de Pinus identificou uma maior produção de material senescentes

durante os meses de outono, com a intensificação das temperaturas mais baixas e consequente aumento dos valores durante os meses correspondentes ao verão.

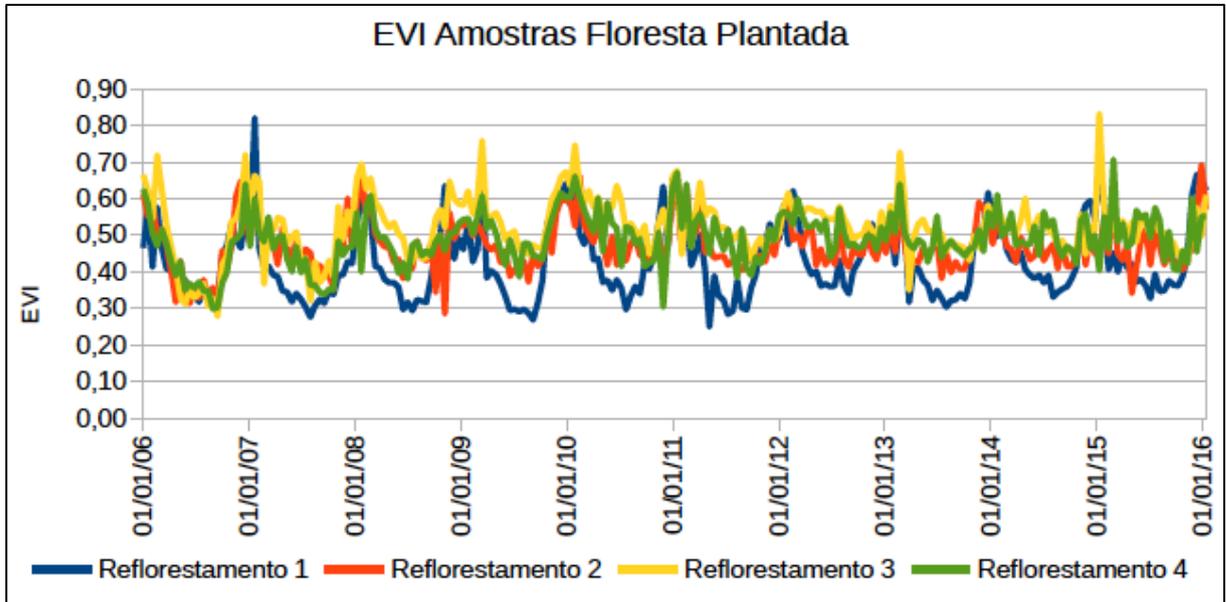


Gráfico 5.3 – Valores de EVI ao longo da Série Temporal para a classe Floresta Plantada.

Para o conjunto de amostras Cultivo (Gráfico 5.4), há uma alteração em relação ao padrão identificado nas demais amostras, principalmente por possuir a característica de um comportamento bimodal dos valores de EVI. Assim como os demais conjuntos de amostras, o maior valor de EVI ocorre durante os meses de verão, este comportamento pode estar associado a fase de floração dos cultivos, principalmente milho encontrados dentro das áreas do parque, segundo Yi (2007) as áreas de milho tendem a estar em floração no final de dezembro e no começo de janeiro. Após esse período o valor de EVI decai durante os meses do outono e volta a ter uma elevação substancial durante os meses de julho. Os valores de EVI vão variar entre 0,75 e 0,27, sendo essa a maior variação entre as amostras analisadas.

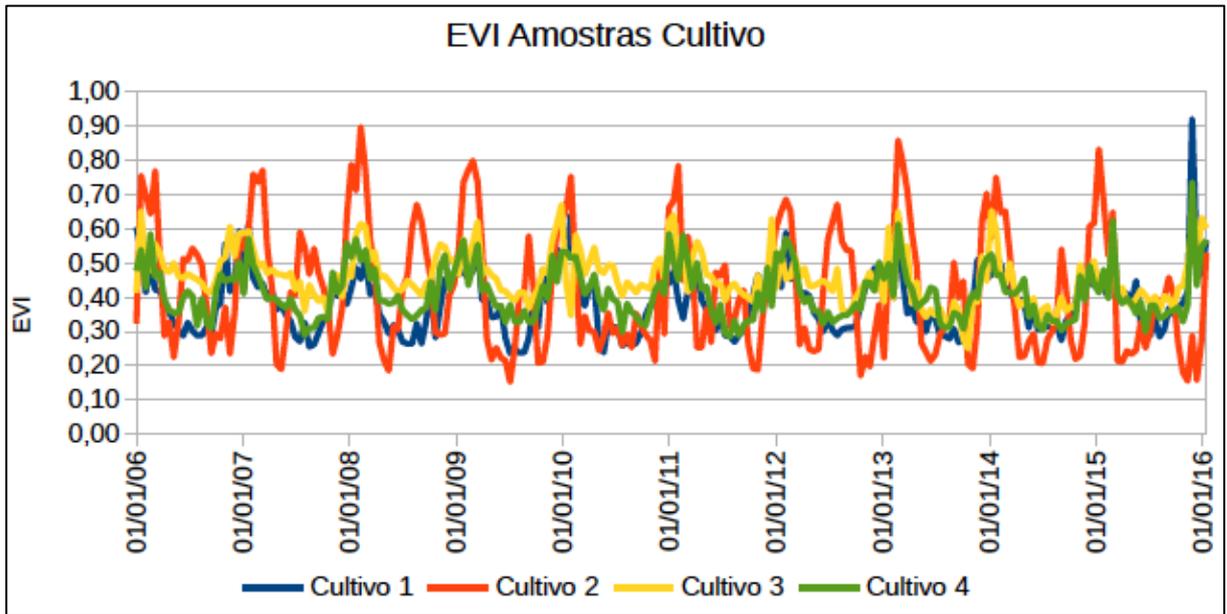


Gráfico 5.4 – Valores de EVI ao longo da Série Temporal para a classe de Cultivos.

Quando todos os perfis das curvas de EVI dos quatro conjuntos de amostras são analisados, percebe-se alguma semelhança principalmente na ocorrência dos picos de máximo e mínimo valor. Sendo as amostras de Cultivo a que mais se diferencia das demais. Mesmo tendo essa tendência de semelhança entre as amostras, é justamente as diferenças de variações nos valores somados a informação do período onde essas variações ocorrem dentro de um ciclo fenológico é que possibilitam a diferenciação e caracterização das diferentes coberturas florestais e de cultivo.

5.2 PRODUTOS DA ANÁLISE HARMÔNICA

5.2.1 Termo Aditivo

Nas imagens termo aditivo, o valor do *pixel* representa a média aritmética dos valores de EVI ao longo das imagens que compõem a série temporal. Dessa forma, o intervalo de valores será entre 0 e 1, o mesmo encontrado nas imagens EVI originais. Para fins de análise dos valores do termo aditivo, foi computado a média de EVI ao longo de todas as 230 composições da série temporal, além de gerar uma imagem termo aditivo para cada ano da série de forma individual.

Na imagem termo aditivo as áreas com menor valor de EVI médio representam justamente as áreas com presença mais significativa de *Araucaria angustifolia*. As áreas com floresta sem presença significativa de *Araucaria angustifolia*, além das áreas com pastagem ou cultivo apresentam valores muito semelhantes. Já as regiões onde ocorre a presença de floresta plantada, tanto Pinus quanto eucaliptos representaram os valores mais elevados.

Analisando as imagens geradas para cada um dos anos da série temporal (Figura 5.2 – nas páginas 51 e 52), pode se perceber um aumento padrão de distribuição espacial dos valores de forma constante. O valor médio de EVI no Parque Nacional das Araucárias ao longo da série temporal, com exceção do ano de 2007, que apresentou valores baixos de EVI em maior quantidade, uma tendência de aumento constante dos valores mais elevados.

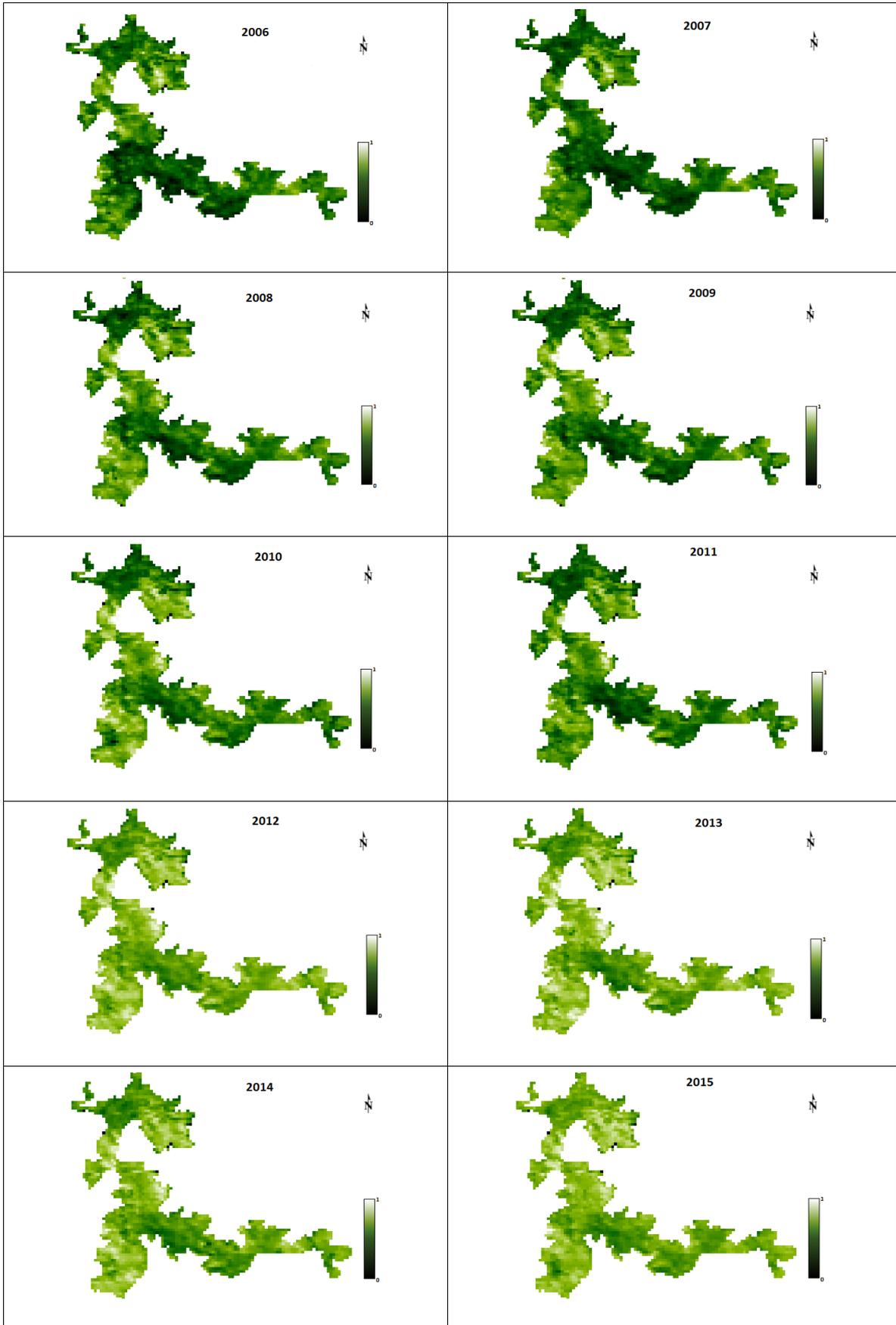


Figura 5.2 – Imagem Termo Aditivo Anual.

Esse aumento pode estar relacionado também a valores mais baixos que os normais no início da série temporal relacionado há algum evento climático anterior, podendo ser uma estiagem como a ocorrida entre os anos de 2005 e 2006 na região Sul do Brasil relacionadas ao evento La Niña. Segundo Fontana *et al.* (2007) a disponibilidade hídrica pode representar um papel fundamental no vigor da vegetação, principalmente em períodos com restrição hídrica. Outra possibilidade deste aumento no valor médio do EVI pode estar ligada ao aumento de áreas com florestas plantadas com Pinus no interior do Parque Nacional das Araucárias em substituição a áreas com cultivos ou pastagem, conforme exemplo de uma área onde ocorreu a (Figura 5.3).

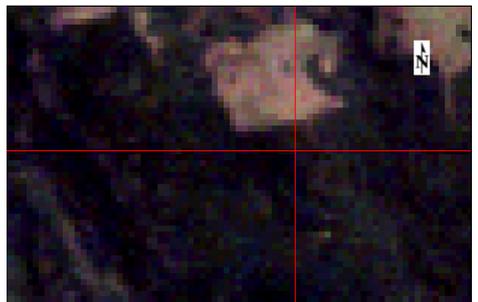
Imagem	Sensor / Data
	<p>Landsat 5 – sensor TM – 24/06/2006 26°42'34.31"S,51°56'41.21"W</p>
	<p>Landsat 5 – sensor TM – 06/09/2007 26°42'34.31"S,51°56'41.21"W</p>
	<p>Sentinel 2- MSI – 17/02/2017 26°42'34.31"S,51°56'41.21"W</p>

Figura 5.3 – Evolução de Uma Área de Pastagem para a Floresta Plantada.

Esta queda pode estar associada há algum efeito meteorológico como precipitação e temperatura, uma vez que estes parâmetros segundo Kanieski *at al.* (2012)

apresentam relações com a fenologia das florestas com presença de *Araucaria angustifolia*, sendo as principais variáveis climatológicas a temperatura média, precipitação e o fotoperíodo. No caso da série analisada, o ano de 2006 apresentou valores de precipitação abaixo das médias históricas, principalmente entre os meses de abril a agosto.

5.2.2 Imagem Amplitude

As imagens de amplitude representam o valor de máxima variação dos valores de EVI para cada *pixel* da composição MODIS original ao longo da série de dados, sendo o valor do *pixel* entre 0 e 1. Nesse caso, foram geradas, por meio do processamento *HANTS*, imagens de amplitude para cada um dos anos da série temporal (Figura 5.4, abaixo e na página seguinte).

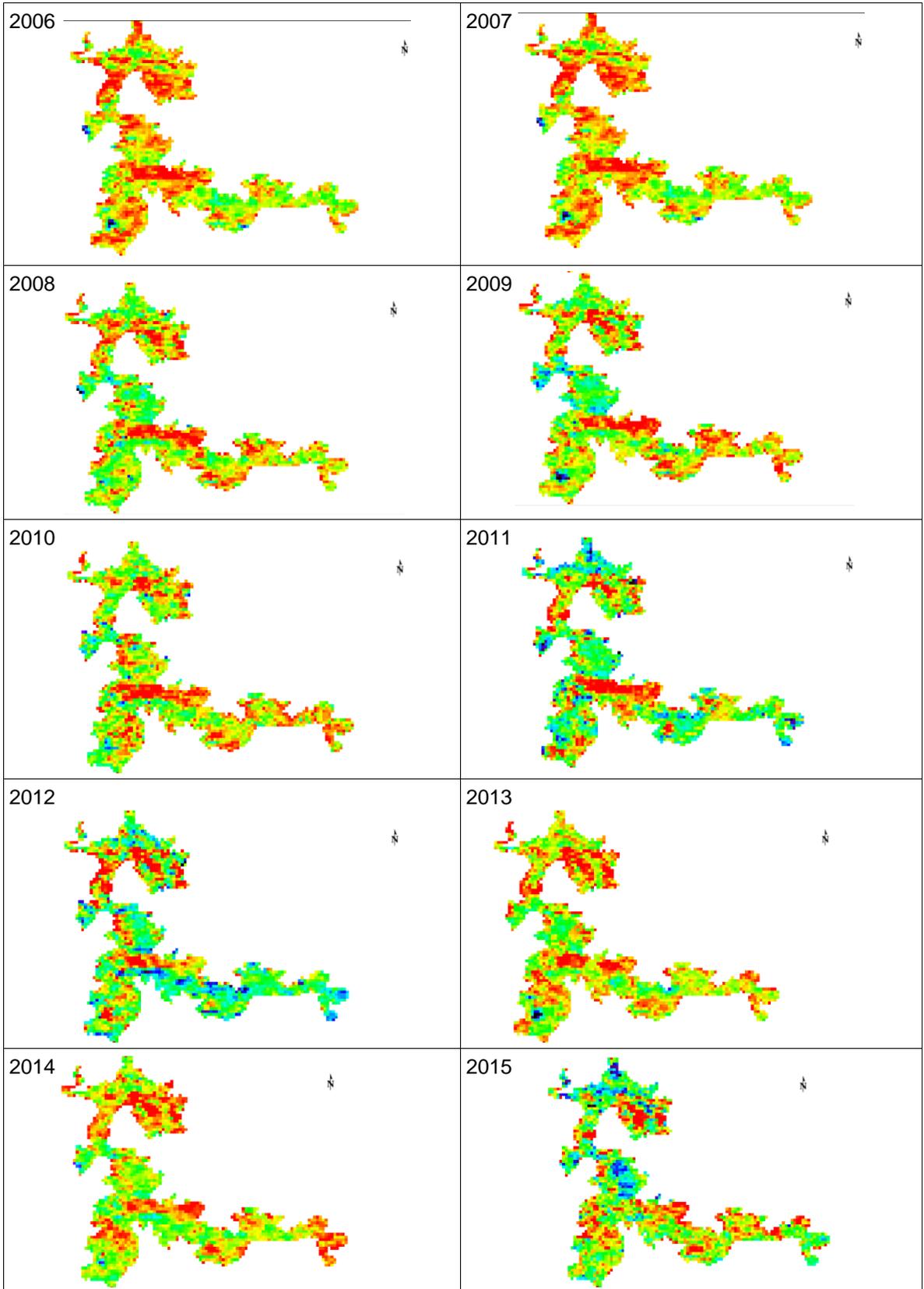


Figura 5.4 – Imagem de Amplitude Anual.

Com base nas imagens de Amplitude para cada um dos anos da série temporal apresenta áreas bem caracterizadas com valores constantes de Amplitude. Os anos de 2006 e 2007 apresentaram a maior quantidade de áreas com os menores valores de Amplitude, estes valores podem estar relacionados com os baixos valores de precipitação ocorridos durante o ano de 2006. Sendo que a ocorrência de estiagem esta associada a anomalias negativas de biomassa. Para os demais anos os valores apresentaram estabilidade nos valores de Amplitude, uma característica da floresta ombrófila mista, que é a de pouca variação sazonal dos valores de EVI, ocorrendo valores máximos próximo a 0,6 (NORA; MARTINI, 2010).

5.2.3 Imagem do Ângulo de Fase

A imagem do ângulo de fase gerado para os primeiros harmônicos de cada um dos anos da série temporal, foi convertida para o espaço de cores HSL, assumindo o valor do componente *Hue* (matiz) cujos valores variam entre 0° e 360° (Figura 5.5, abaixo e na página seguinte). Esses valores por sua vez foram associados aos meses do ano, definindo uma cor específica do matiz para cada mês.

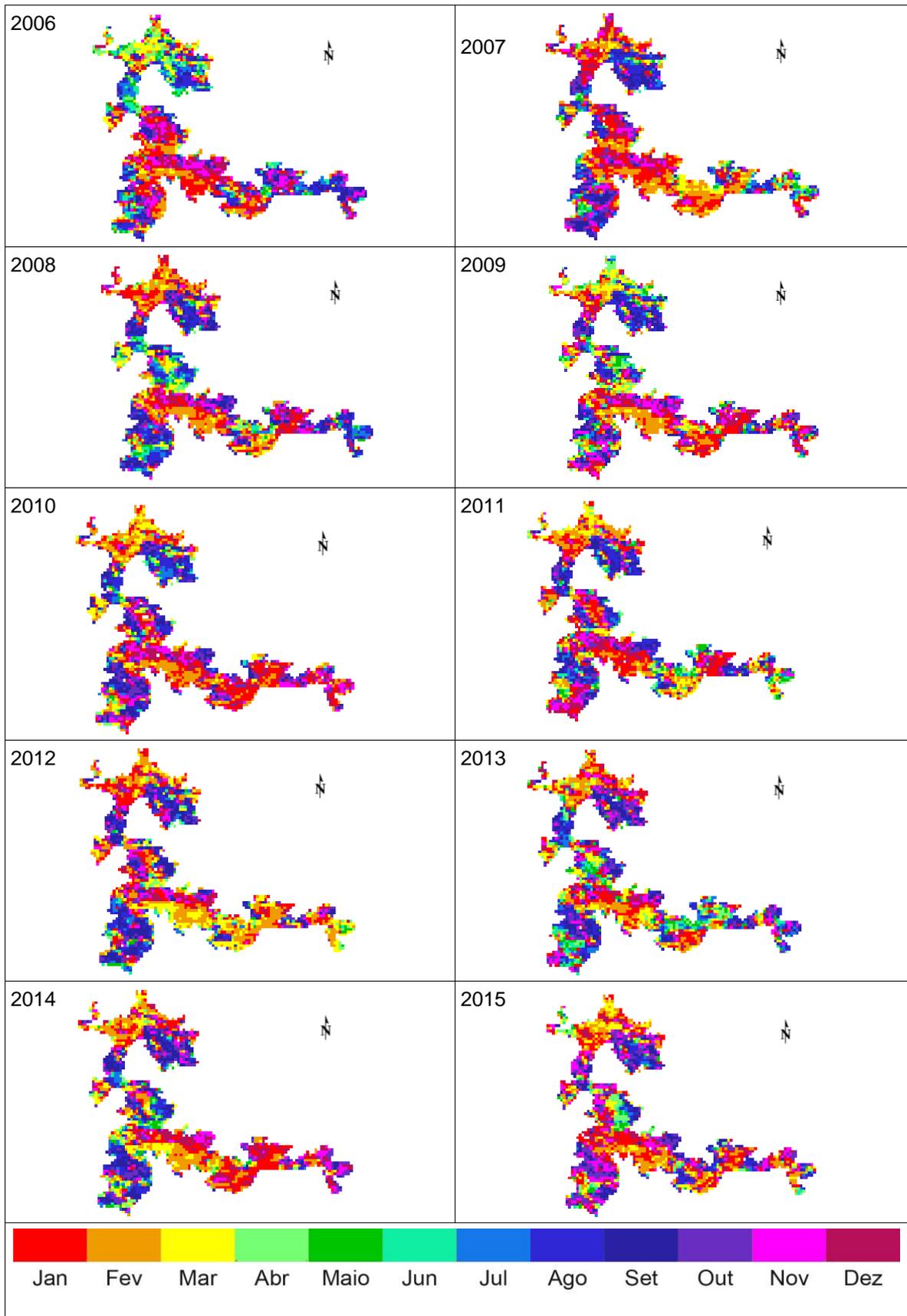


Figura 5.5 – Imagem do Angulo de Fase Anual.

As imagens correspondentes aos valores de Fase também apresentam uma homogeneidade da distribuição espacial dos valores. Sendo os meses de setembro a dezembro os meses que apresentaram o maior período de vigor máximo da vegetação para as formações florestais que compõem a floresta ombrófila mista. Sendo que as áreas com cultivos, devido ao seu caráter sazonal diferenciado das demais coberturas vegetais apresentam característica de variação de setembro a abril, e seria melhor representado com o segundo harmônico.

Para relacionar as variações de amplitude e fase com parâmetros climatológicos, foram gerados gráficos de temperatura máxima média (Gráfico 5.5) e precipitação média mensal para cada um dos anos da série temporal (Gráfico 5.6). Quando analisado o gráfico contendo os valores de temperatura máxima média mensal, é possível perceber que o regime térmico da região é caracterizado por um verão com temperaturas máximas próximas à 26°C e com inverno com temperaturas máximas próximas à 18°C. Para os meses referentes ao primeiro semestre, os anos que apresentaram maiores anomalias foram 2013 e 2009, durante os meses de março a maio dos anos de 2009 a temperatura máxima se manteve superior à média, possivelmente contribuindo também para o aumento do valor de amplitude.

Nos meses referentes à estação do inverno, os anos de 2006 e 2008 apresentaram uma elevação dos valores máximos em relação à média, com exceção da amostra 4 (cultivo), todas as demais apresentaram também, um incremento do valor de amplitude.



Gráfico 5.5 – Temperatura Máxima Média em °C Anual.
 Fonte: INMET.

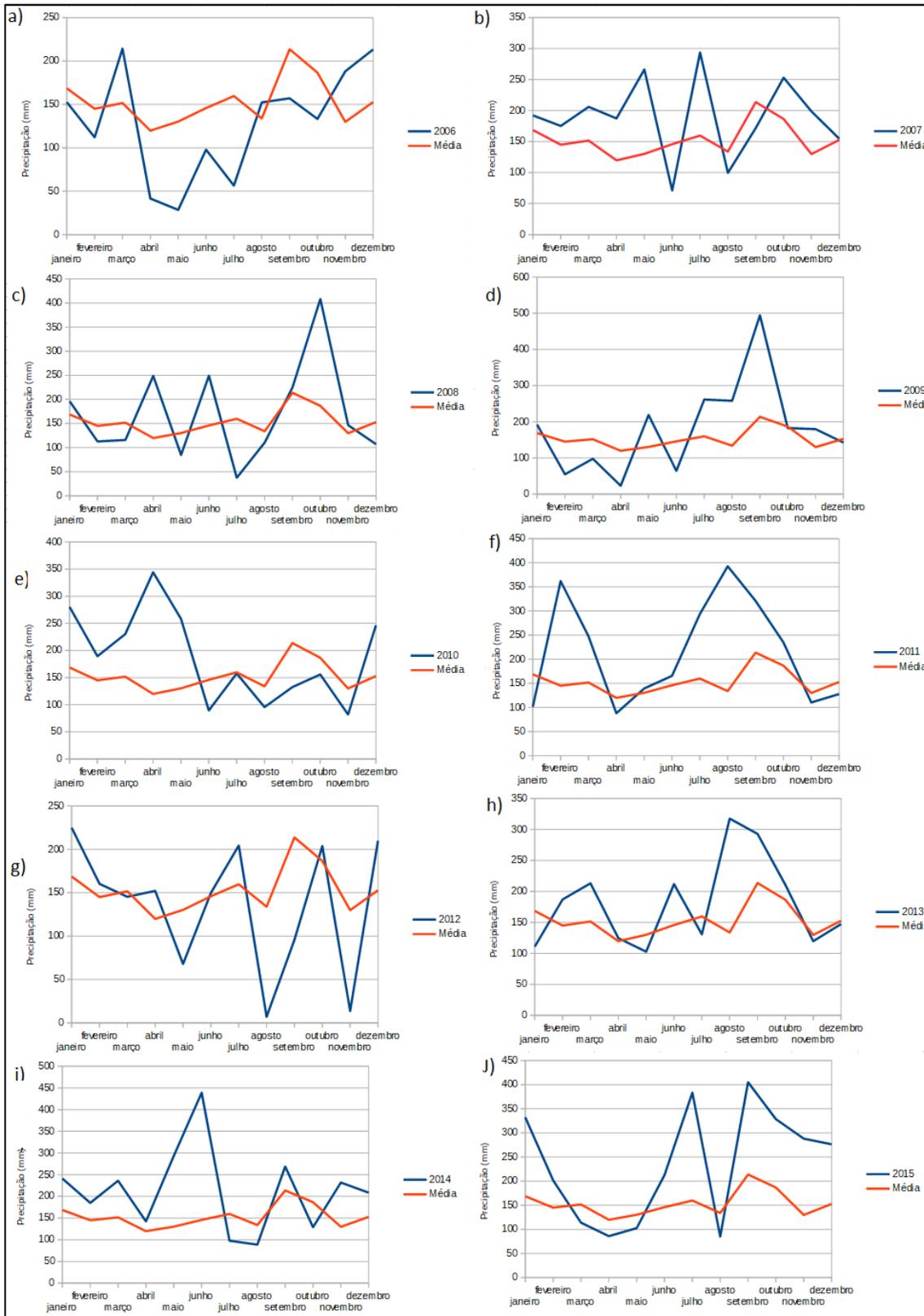


Gráfico 5.6 – Precipitação em mm Anual.
Fonte: INMET.

Analisando o gráfico da precipitação média mensal para os anos que compõem a série temporal, os anos com maior precipitação foram em 2011 e 2015, nesses anos os meses com maior volume de precipitação foram agosto e setembro. Os anos de 2008 e 2009, também apresentaram um volume acentuado de precipitação, principalmente nos meses de setembro e outubro. Esse aumento da precipitação nos anos de 2008 e 2009 pode estar relacionado o aumento do valor de máxima variação de EVI para praticamente todas as amostras, com exceção a amostra referente ao cultivo, que no ano de 2008 apresentou um valor de amplitude baixo.

Durante o ano de 2013, os meses de agosto e setembro também apresentaram valores de precipitação acima da média, provavelmente contribuindo para o aumento do valor de amplitude para todas as amostras. Já o ano com menor índice de precipitação ocorreu em 2012, apresentado praticamente ausência de chuvas durante os meses de agosto e novembro.

5.3.1 Análise da Variação da Amplitude e Fase para as Amostras e Dados Climáticos

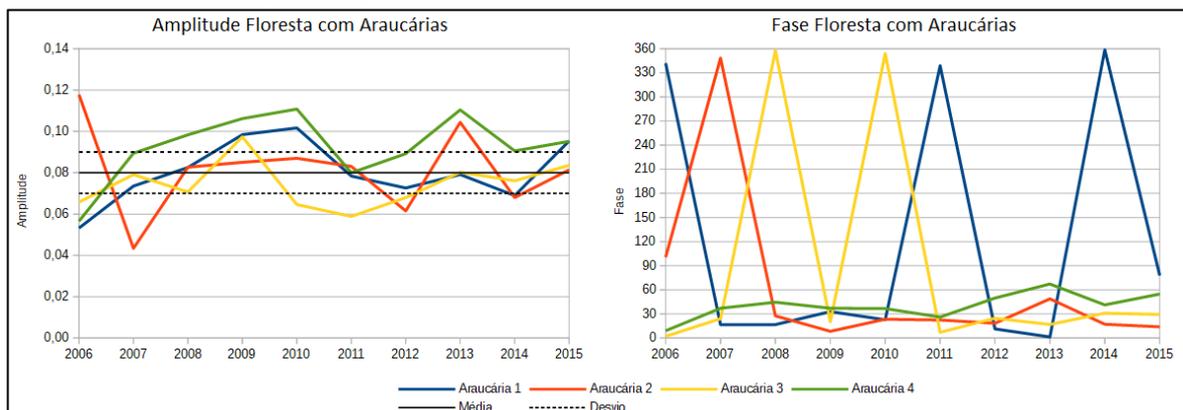
A variação dos valores de máxima amplitude do EVI, segundo Jakubauskas (2001), indica variações no tipo de uso e cobertura do solo, ou ainda em condições climáticas que atingem a vegetação. Já as mudanças que ocorrem apenas na fase, indicam o a vegetação manteve-se dentro no seu estágio de maior vigor.

Para uma compreensão melhor da dinâmica fenológica das coberturas vegetais no Parque Nacional das Araucárias durante a série temporal de 2006 a 2015, bem como as alterações do uso e ocupação do solo, os valores de amplitude e ângulo de fase foram sobrepostos para o conjunto de amostras de diferentes coberturas vegetais da superfície. Dessa forma, é possível analisar quais amostras representaram diferença apenas na amplitude, apenas na fase ou em ambas as imagens geradas, indicando alguma mudança brusca da cobertura do terreno.

5.3.1.1 Amostras de Floresta com Araucárias

Para o conjunto de amostras Floresta com Araucárias, percebe-se que os valores, durante o período analisado mantiveram-se dentro do desvio padrão da média para praticamente toda a série analisada (Gráfico 5.7) apresentando valores de Amplitude estável e com valores baixos, coerente com valores encontrados com outros estudos nesta mesma área de floresta ombrófila mista. Que demonstram que a floresta ombrófila mista onde ocorre a presença de *Araucárias angustifolia* apresenta baixa variação de valores de EVI ao longo do ano, ou seja, os valores de máximo vigor tendem a não serem elevados (NORA; MARTINI, 2010).

Gráfico 5.7 – A) Amplitude para as Amostras Floresta com Araucárias
B) Fase para as Amostras Floresta com Araucárias



No ano de 2007, com exceção da amostra Araucária 1, todas as demais apresentaram um aumento na Amplitude. Segundo Jacobsen *et al.* (2004) em eventos de La Niña, como os ocorridos entre os anos de 2005 e 2006, ocorre a diminuição da precipitação, ocasionando anomalias nos valores de índices de vegetação. Os baixos valores de precipitação podem ser perceptíveis no ano de 2006 do Gráfico 5.3 (A). Estas anomalias podem estar relacionadas com o acréscimo de Amplitude durante os anos subsequentes ao fenômeno La Niña quando a precipitação tende a se normalizar e contribuir para o aumento do vigor da vegetação. Comparando com os valores de EVI ao longo da série temporal (Gráfico 5.1) percebe-se justamente uma menor variação anual dos valores de EVI, que aumentam até os anos de 2010 e 2011, contribuindo assim para o menor valor de Amplitude.

Analisando os valores de Fase para as amostras Floresta com Araucárias, o período de máximo vigor da vegetação ocorreu para todos os anos variando entre os meses de dezembro e março. Estes valores são coerentes com os valores encontrados nas poucas bibliografias referentes ao comportamento de florestas ombrófila mista com copa dominante formada por *Araucaria angustifolia*. Segundo Pereira *et al.* (2016) o ciclo de crescimento anual e a variação respiratória que contribuirá para o aumento da biomassa, possuem a mesma tendência, sendo períodos de baixa atividade durante os meses de outono e inverno e alta atividade durante os meses da primavera e verão. A *Araucaria angustifolia* tende a ter menor atividade metabólica durante os meses do inverno contribuindo para uma menor absorção dos comprimentos de onda correspondentes ao vermelho.

5.3.1.2 Amostras de Floresta sem Araucárias

Para as amostras de Floresta sem Araucárias (Gráfico 5.8), que representam áreas no interior do parque que não possuem predominância de *Araucaria angustifolia* no estrato superior das copas, os valores de amplitude mantiveram um comportamento semelhante dos valores de Amplitude encontrados para as amostras de Floresta com Araucárias, ficando a maior parte das amostras durante toda série temporal dentro dos valores de desvio padrão em relação à média. As variações negativas de Amplitude ocorreram para as amostras Flor. Sem Araucárias 3 e 4 nos anos de 2007 e 2013.

Já as variações positivas ocorreram para as amostras Flor. Sem Araucárias 1 e 2 nos anos de 2008 a 2010, durante estes períodos de variação dos valores de Amplitude, os valores de Fase se mantiveram todos dentro da estação do ano correspondente a Primavera. Isso indica que o motivo da variação nos valores de Amplitude encontrados esteja ligado há alguma alteração climática ocorrida e não há algum evento de desmatamento na área abrangida pelas amostras.

Os valores de Fase diferenciam das amostras Floresta com Araucárias, indicando a menor presença de indivíduos de *Araucaria angustifolia*, a identificação da coerência destes valores com o encontrado em estudos da dinâmica sazonal floresta ombrófila

mista não foi possível ser executada de forma direta, uma vez que a maior parte da bibliografia não há a separação das áreas onde a presença das demais formações florestais possui maior significância. A dinâmica sazonal dos valores de EVI para a floresta ombrófila mista segundo Kuplich (2013) tende a ter um maior vigor vegetativo nos meses de dezembro a março, porém, para os valores de Fase das amostras indicam que este período ocorreu durante a série temporal durante os meses da Primavera, com exceção dos anos de 2006 e 2007.

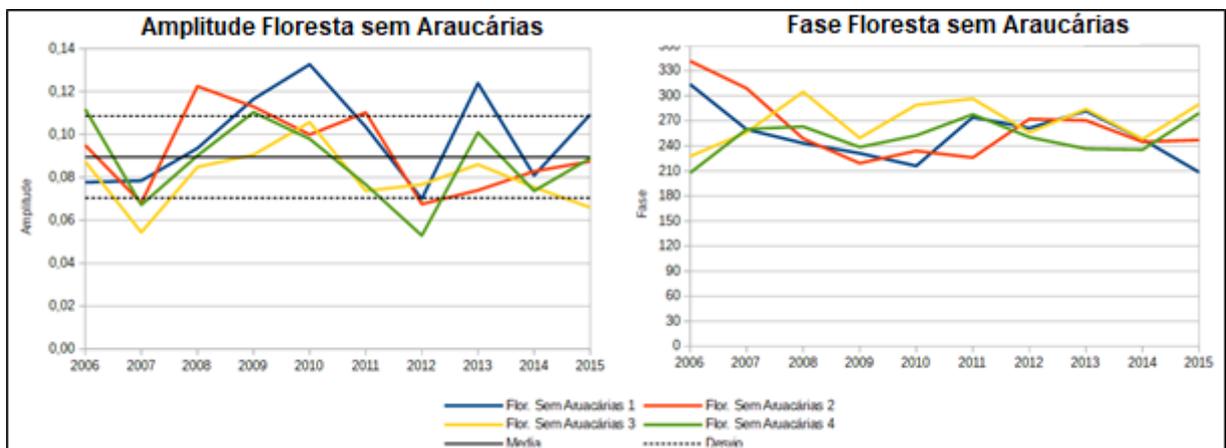


Gráfico 5.8 – A) Amplitude para as Amostras Floresta sem Araucárias
B) Fase para as Amostras Floresta sem Araucárias

5.3.1.3 Amostras de Floresta Plantada

Analisando os valores de amplitude e fase encontrado para as quatro amostras da classe correspondente Florestas Plantadas. No gráfico de Amplitude (Gráfico 5.9 A) os valores apresentam diminuição acima do desvio padrão durante os anos de 2006 a 2007, após este período os valores de Amplitude sem mantiveram estáveis durante o restante da série temporal. Uma característica segundo Alvares *et al.* (2013) em áreas com floresta plantada com Pinus, como no caso das amostras do Parque Nacional das Araucárias, as variações dos índices de vegetação apresentam rápido crescimento nos estágios iniciais pós plantio das mudas de Pinus, isso devido ao rápido crescimento dos valores de biomassa indicando valores mais elevados de Amplitude, sendo pouco sensível às alterações de precipitação e temperatura.

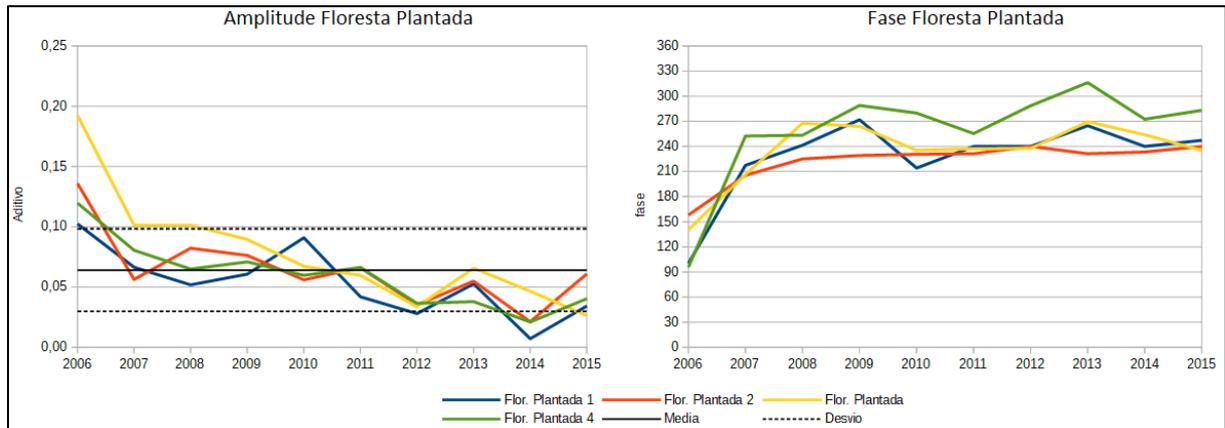


Gráfico 5.9 – A) Amplitude para as Amostras Floresta Plantada
B) Fase para as Amostras Floresta Plantada

A alteração dos valores de Fase (Gráfico 5.9 B), ocorridas também durante os anos de 2006 e 2007 associadas as variações de Amplitude, indicam a mudança de uso e cobertura do solo durante este período. Após o ano de 2008 o valor de Fase estabiliza e indica que o período de máximo vigor deste tipo de vegetação ocorre entre os meses de setembro e dezembro.

5.3.1.3 Amostras de Cultivo

Os valores de Amplitude e Fase (GRAFICO 5.10) encontrado para as amostras de Cultivo, apresentam a maior diferenciação em relação as demais amostras, principalmente por não se tratar de coberturas florestais. Segundo Kuplish *et al.* (2013), o comportamento sazonal das áreas agrícolas tendem a apresentar um comportamento bem marcado, dividido entre as épocas de plantio, crescimento, maturação e colheita. Para estas amostras, provavelmente a resposta teria sido mais precisa com a aplicação dos valores correspondentes ao segundo harmônico, que apresenta melhor relação com as alterações semestrais, como as que ocorrem nos cultivos de milho, arroz e soja presentes na região do Parque Nacional das Araucárias. A alteração dos valores de Fase, apresentam consideráveis alterações do período de maior vigor vegetativo, indicando que estas áreas apresentaram diferenças na cobertura da superfície.

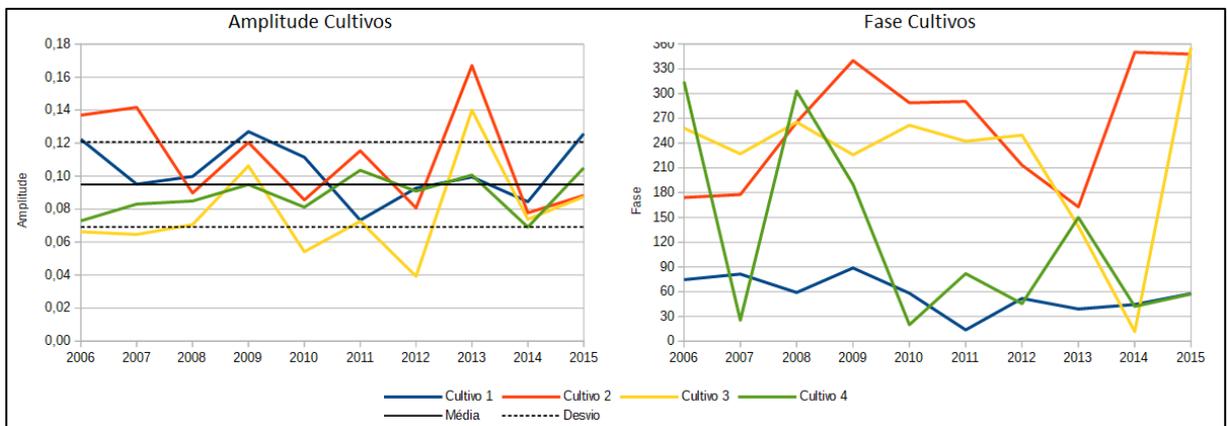


Gráfico 5.10 – A) Amplitude para as Amostras de Cultivo
B) Fase para as Amostras de Cultivo

5.3 COMPOSIÇÃO HLS

Analisando as respostas dos três harmônicos gerados pela rotina *HANTS*, definiu-se que as imagens que melhor representam a fenologia dos tipos de cobertura vegetal do Parque Nacional das Araucárias são as imagens de amplitude e fase de primeiro harmônico gerado; isto é, o período completo da série temporal.

Para uma ideia melhor da espacialização dos valores referentes ao primeiro harmônico, foi realizada uma composição RGB com as bandas referentes à fase do primeiro harmônico, amplitude do primeiro harmônico e termo aditivo respectivamente do ano de 2015, sendo o último ano da série temporal analisada. Convertida essa composição para o espaço de cores HLS (Figura 5.6), é possível analisar os locais no interior do Parque Nacional das Araucárias onde ocorrem as diferentes dinâmicas sazonais. Isso é possível devido ao fato de que o valor de Fase aplicado varia entre 0 e 360, sendo que quanto mais baixo o valor mais próximo ao mês de janeiro a ocorrência do pico de vigor vegetativo, e quanto mais elevado os valores mais próximos ao mês de dezembro. A tonalidade das cores, tende ainda a variar pelo valor de Amplitude e Termo Aditivo.

As áreas com presença predominante de *Araucaria angustifolia*, estas áreas possuem valor de Fase baixo, indicando que o vigor máximo para o ano de 2015 ocorreu entre os meses de janeiro e fevereiro. Já os valores de Amplitude variaram para as duas áreas, na área indicada pelo número 1 os valores de Amplitude foram superiores aos encontrados na área 2.

Por sua vez, as áreas em tons de azul mais claro, representando as regiões com florestas sem presença em grande escala de *Araucaria angustifolia* obtiveram valores médio de ângulo de fase e um valor elevado de amplitude. As áreas com tons de roxo mais escuro representam os locais onde há predominância de florestas plantadas com *Pinus* predominantemente. Nesses locais os valores de fase indicam ângulos próximos a 200° e os valores de amplitude são baixos.

Já nas regiões com tons de roxo mais claro, encontrados principalmente na parte sul

do Parque Nacional das Araucárias, possuem valores de ângulo de fase também próximo a 200° , mas com valores de amplitude mais elevados.

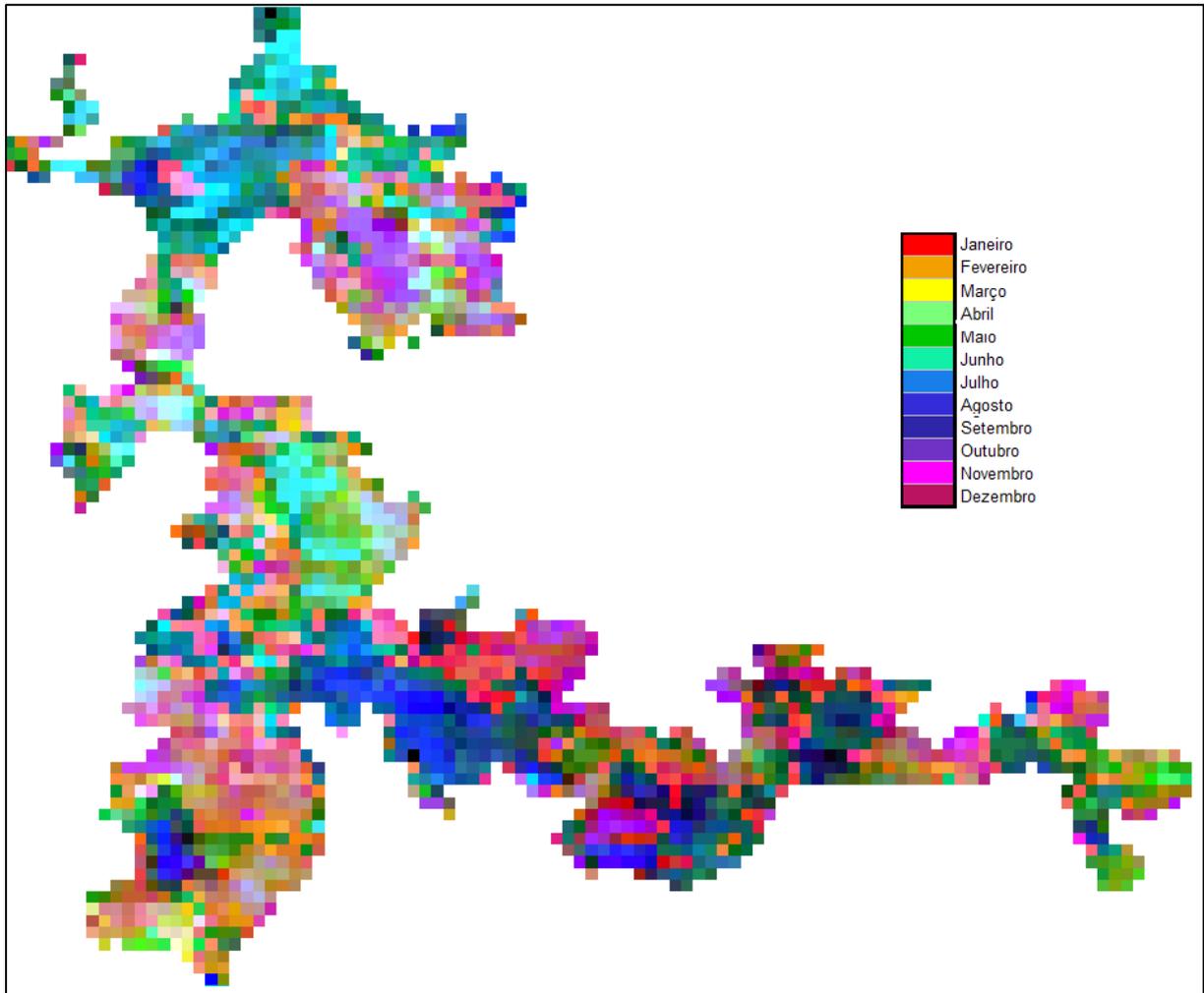


Figura 5.6 – Composição colorida com as bandas: H(fase1); L(amplitude 1); S(termo aditivo) para o ano de 2015.

5.4 IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES COM *Araucaria angustifolia*

A principal função da implementação do Parque Nacional das Araucárias foi a de preservar importantes remanescentes de *Araucaria angustifolia*, sendo essa uma de extrema importância para a floresta ombrófila mista, tanto ambiental, quanto cênica e econômica, porém essa espécie se encontra em risco de extinção. Desta forma, a identificação destes remanescentes se torna de grande importância (Figura 5.7).

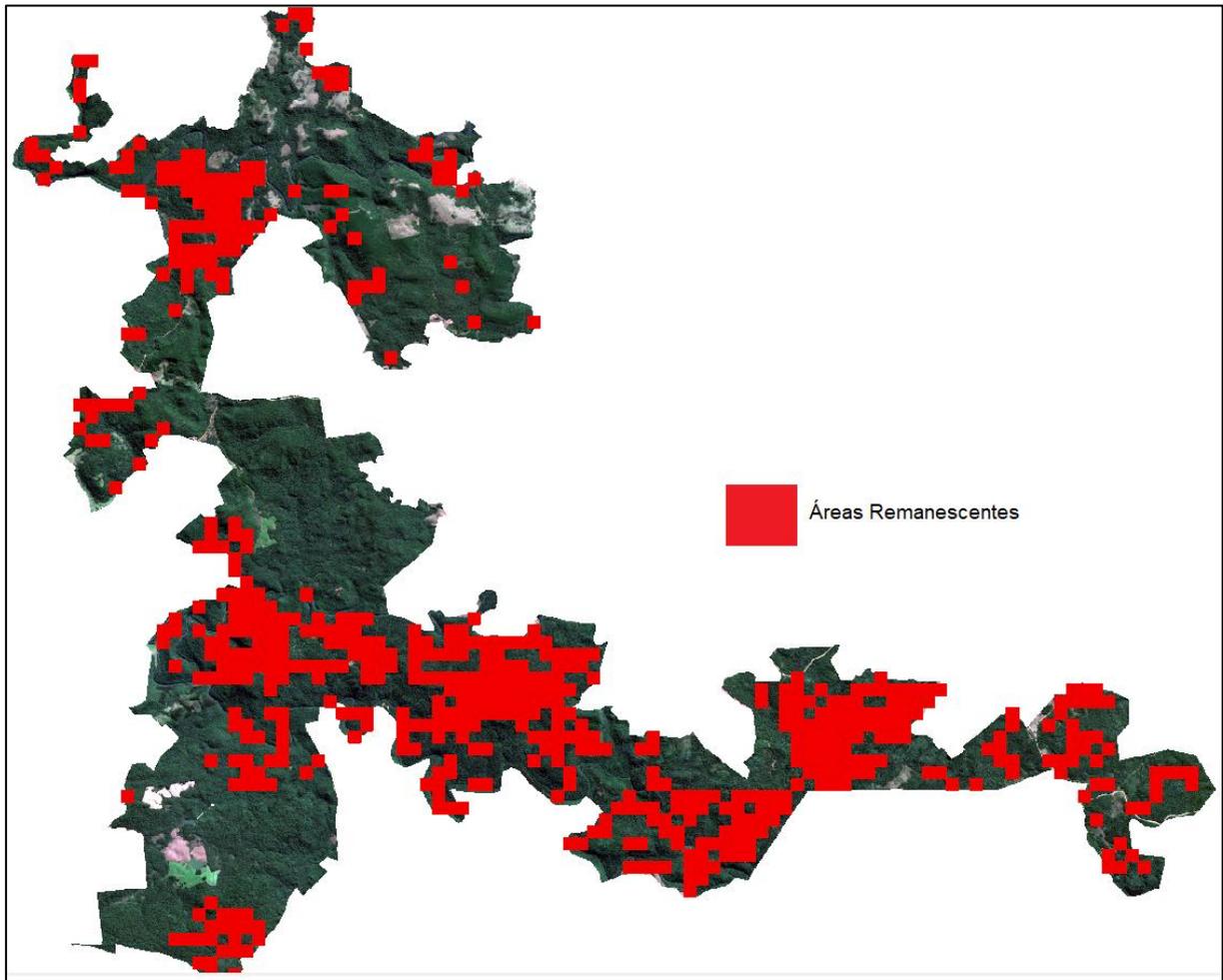


Figura 5.7 – Áreas com Predominância de *Araucaria angustifolia*.

Das 163 amostras (Figura 5.8) geradas aleatoriamente para serem utilizadas com medida de precisão da classificação, 107 representavam áreas sem a presença de *Araucaria angustifolia* como árvore dominante em número de indivíduos, e 55 amostras representavam as áreas onde a presença de *Araucaria angustifolia* ocorre de maneira predominante. Quando estas amostras foram sobrepostas sobre a imagem com os polígonos de áreas remanescentes de *Araucaria angustifolia*, obteve-se os seguintes valores:

Falso-positivo: 34 amostras

Falso-negativo: 14 amostras

Correta sem araucárias: 73

Correta com araucárias: 41



Figura 5.8 – Distribuição das Amostras de Conferência.

Dessa forma, 48 amostras foram classificadas incorretamente e 114 amostras foram classificadas de forma correta, ou seja, pode-se dizer que os polígonos com áreas remanescentes de *Araucaria angustifolia* obtiveram uma precisão de 70% na identificação correta destas áreas.

Não foram encontradas bibliografias com a finalidade de classificação de áreas com predominância de *Araucaria angustifolia* em áreas de floresta ombrófila mista, normalmente as áreas de floresta ombrófila mista são classificadas de forma

homogênea independente da quantidade de indivíduos de *Araucaria angustifolia* no substrato superior do dossel. Longhi (2016), classificou um exemplar de floresta ombrófila mista no município de São Francisco de Paula – RS, porém, não utilizou os valores de dinâmica sazonal, mas sim dados dendométricos. Neste estudo foi classificado que as áreas com presença mais significativa de *Araucaria angustifolia* correspondem as áreas de floresta primária.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho buscou-se apresentar uma metodologia para caracterização e mapeamento das diferentes fenologias com o intuito de auxiliar na gestão e manejo de uma unidade de conservação, bem como identificar

Uma vez gerado os três primeiros harmônicos da série temporal, representando as variações anual, semestral e trimestral, concluiu-se que a maior parte da vegetação no interior do parque possui um comportamento fenológico anual, com exceção das áreas com presença de cultivos, em número muito pequeno dentro dos limites do parque.

Foi possível também diferenciar as áreas com florestas nativas com presença significativa de *Araucaria angustifolia*, daquelas com um menor número de *Araucaria angustifolia*. Isso foi possível por meio da definição dos valores de amplitude da variação máxima do índice de vegetação EVI, já que áreas com presença abundante de *Araucaria angustifolia* a variação dos *pixels* ocorreu de forma sensivelmente menor que das áreas com florestas compostas por um dossel mais diversificado. Analisando ainda o conjunto de informações produzidas pela análise harmônica, pode-se perceber que para a maior parte das amostras os valores de Amplitude e Fase, bem como do perfil de EVI ao longo da série se mostraram coerentes com o que é encontrado na bibliografia. Em algumas regiões houve variações positivas do valor médio de EVI, porém possivelmente esta relacionado presença de áreas com florestas plantas, ocasionando a alteração do período de máximo vigor vegetativo, indicando que o plantio ocorreu após a consolidação da implementação dos limites do parque, mostrando a necessidade de uma possível atualização do plano de manejo.

A proposta de metodologia também propicia uma possibilidade de identificação de áreas com importantes remanescentes de *Araucaria angustifolia*, baseada na criação de imagens com composições dos dados de fase, amplitude e termo aditivo que, quando convertidos para um espaço de cores HLS, apresenta uma representação dos diferentes uso e ocupação do solo, baseados em dados que vão além da simples análise visual.

Como proposta para futuros trabalhos, recomenda-se a aplicação dessa metodologia em uma série temporal composta por imagens com maior resolução espacial, para aumentar a precisão do tamanho do pixel em relação as variações da cobertura da superfície, mesmo que seja necessária a criação de uma série temporal multi-sensores, para alcançar uma resolução temporal igual ou maior que a disponibilizada pelos dados MODIS. Neste caso deve-se avaliar o custo-benefício desta aplicação já que será necessário executar todas as correções fornecidas pelos dados MODIS. Outra possibilidade é a aplicação da análise harmônica em uma área de maior extensão e diversidade de usos e cobertura do solo.

REFERÊNCIAS

ALARCON, G. G, *et al.* Fragmentação da Floresta com Araucária e Ecossistemas Associados no Corredor Ecológico Chapecó, Santa Catarina. **Biotemas**, 24(3): 25-38, 2011. Ed. UFSC.

ALVARES, C.A.; MUNHOZ, J.S.B; STAPE J.L; STAHL, J; ANDRADE, L; SANTOS, G; LIMA, R; COUTINHO, R.T; HOINACKI, R; FOX, T. **Caracterização da Dinâmica dos Índices de Vegetação NDVI e EVI em Plantações de Pinus do Brasil**. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013. INPE.

ANTUNES, J.F.G.; ESQUERDO, J.C.D.M.; LAMPARELLI, R.A.C.; RODRIGUES, L.H.A. **Analysis of the vegetation phenology from the Alto Paraguai Basin through the representation of harmonic cycles of EVI/Modis time-series**. Geografia, v.38, p.109-122, 2013. Número especial.

AYERES, J.M., FONSECA, G.A.B., RYLANDS, A.B., QUEIROZ, H.L., PINTO, L.P., MASTERSON, D. & CAVALCANTI, R.B. **Corredores Ecológicos das Florestas Tropicais do Brasil**. Belém: Soc. Civil Mamirauá. 2015 p. 256.

BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation, **Int. J. Remote Sens.**, 1993. 14:711- 722.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. SNUC – **Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza: Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000; Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002; Decreto nº 5.746, de 5 de abril de 2006. Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas: Decreto nº 5.758, de 13 de abril de 2006**. Brasília: MMA, 2011. 76 p.

GONÇALVES, A. R, *et al.* **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Chapeco**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2013. 221p.

GOWARD, D. G., TURNER, S., DYE, D. G., LIANG, J. Improved Global Vegetation Index. University of Maryland, **Int. J. Remote Sensing**. 1994 **15**, 3365-3395.

GUTMAN, G.G. **Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. Remote Sensing of Environment**, 1991. (35):121-136.

HALLBEYER, M. IHS corepresentation of circular and noncircular variables using harmonic analysis parameters. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 2007. v.33, p.416-421.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, W. **MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document. versão 3**, 1999. p. 1-142.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI), **Remote Sens. Environ.**, 1988. p. 25:295-309.

HUETE, A; DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ EP, GAO X, FERREIRA LG, Overview of the radiometric and biophysical performance of the modis vegetation indices. **Remote Sens Environ.** 2002 83(1):195–213.

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, 2002. v.83. p.195-213.

IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil, primeira aproximação.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004

JACÓBSEN, L. O. **Efeitos Associados a El Niño e La Niña na Vegetação do Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto).** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Porto Alegre. 2002.

JAKUBAUSKAS, M. E.; DANA L. PETERSON, Kastens, J. H, IEGATES. Time Series Remote Sensing of Landscape-Vegetation Interactions in the Southern Great Plains. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** Vol. 68, NO. 10. 2002, pp. 1021-1030.

JIA, L.; SHANG, H.; HU, G.; MENENTI, M. Phenological response of vegetation to upstream river flow in the Heihe River basin by time series analysis of Modis data. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2011. v.15, p.1047-1064.

KAUFMAN, Y. J.; TANRE, D. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.**, 1992. 30 (2), 261~270.

KLEIN, R. M. 1960. **O aspecto dinâmico do pinheiro brasileiro.** *Sellowia*, 12: 17-45.

KUPLISH, TATIANA MORA; MARTIN EDUARDO VÉLEZ. **Identificação de tipologias da vegetação campestre e o uso de imagem Thematic Mapper (Landsat 5) na região dos Campos de Cima da Serra, Bioma Mata Atlântica.** Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 2009, INPE.

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

LIU, G.; LIANG, C.; KUO, T.; LIN, T.; HUANG, S. Comparison of the NDVI, ARVI and AFRI vegetation index, along with their relations with the AOD using SPOT 4 vegetation data. **Terr. Atmos. Ocean.** 2004, 15, 15–31.

LONGHI; SOLON, J; DOÁDI, A; GOMES, F; NARVAES, D.S; BERGER, I; SOLIGO, G. Classificação e caracterização de estágios sucessionais em remanescentes de floresta ombrófila mista na flona de são francisco de Paula, RS, Brasil. **Ciência Florestal.** 2006, 16

NIMER, E. **Climatologia do Brasil.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ; 1989. p.421.

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

PANOFSKY, H.A.; BRIER, G.W. **Some Applications of statistics to meteorology**. Pennsylvania: University Park, 1968. p.224.

PARDI LACRUZ, MARIA SILVIA. **Análise harmônica de séries temporais de dados MODIS como uma nova técnica para caracterização da paisagem e análise de lacunas de conservação**. São José dos Campos: INPE, 2007. (Tese de Doutorado – inédita).

PERCIVAL, D. B.; WANG, M.; OVERLAND, J. E. An introduction to wavelet analysis with application to vegetation time series. **Community Ecology**, 2004. v.5, p.19-30.

PEREIRA, G, P; et al. ATIVIDADE RESPIRATÓRIA DE MERISTEMAS APICAIS DE RAMOS PLAGIOTRÓPICOS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, 2016. v. 26, n. 1, p. 203-211.

PONZONI, FLÁVIO JORGE, **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação / Flávio Jorge Ponzoni, Yosio Edemir Shimabukuro**. São José dos Campos, SP: ^a Silva Vieira Ed., 2007.

ROERINK, G.J.; MENENTI, M.; VERHOEF, W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. **International Journal of Remote Sensing**, 2000. v.21, p.1911- 1917.

ROERINK, G.J., MENENTI, M.; SOEPBOER, W.; SU, Z. **Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing**. Wageningen University and Research Centre, Alterra Green World Research, P.O. Box 47, 6700 AA Wageningen, Netherlands. 2003

ROSEMBACK R, FERREIRA NJ, SHIMABUKURO YE, CONFORTE JC. Análise da dinâmica da cobertura vegetal na região sul do Brasil a partir de dados MODIS/TERRA. **Rev. Bras. de Cartografia** 2010. 2:401-406

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington, 1973. Proceedings... Whashington: NASA**, 1974, v.1, p.309-317.

RUDORFF, BERNARDO F. T.; SHIMABUKURO, YOSIO E.; CEBALLOS, JUAN C (ORG.). **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos, SP: ^a Silva Ed., 2007.

SANTA CATARINA, **Decreto Estadual nº 2.957, de 20 de janeiro de 2010**. Institui o Corredor Ecológico Chapecó na região da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Chapecó,

região hidrográfica RH2 - Meio Oeste do Estado de Santa Catarina. 2010.

SCHAFFER, W. B.; PROCHNOW, M. Mata Atlântica. In: **A Mata Atlântica e Você: como preservar, recuperar e se beneficiar da mais ameaçada floresta brasileira**. Brasília: APREMAVI, 2002.

SEITZ RA. Crown development of *Araucaria angustifolia* in its natural environment during sixty years. In: Fujimori T, Whitehead D, editores. Crown and canopy structure in relation to productivity, Proceedings of an International Workshop held in Japan; Ibaraki, Japan. **Ibaraki: Forestry and Forest Products Research Institute; 1986. p. 129-146.**

TIEPO, ERASMO NEI. **Diagnóstico Florístico do Parque Nacional das Araucárias. In: Projeto de Elaboração dos Planos de Manejo do Parque Nacional das Araucárias e da Estação Ecológica da Mata Preta.** Apremavi, 2009.

GOOR, C. V. **Reflorestamento com coníferas. no Brasil: aspectos ecológicos dos plantios da região Sul, particularmente com *Pinus elliottii* e *Araucaria angustifolia*.** Rio de Janeiro: Serviço Florestal do Ministério da Agricultura, Setor de Inventários Florestais, 1965. (Boletim; 9).

VERMOTE, E.F.; EL SALEOUS, N.Z.; JUSTICE, C.O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, 2002. v.83, p.97-111.

VOGELMANN J, ROCK B, MOSS D. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, 1993. v. 14, n. 8, p. 1563–1575.

WAGNER, W., Dech, S. W., and Kuenzer, C.: **Remote Sensing Time Series: Revealing Land Surface Dynamics**, Springer, Cham, Switzerland, 2015.

XIE, Y.; ZHANG, Y.; XIONG, X.; QU, J.J.; CHE, H. Validation of MODIS aerosol optical depth product over China using CARSNET measurements. **Atmos. Environ.** 2011,45, 5970–5978.

ZANON, M. L. B.; FINGER, C.A.G. Relação de variáveis meteorológicas com o crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em povoamentos implantados. **Ciência Florestal** 2010; 20(3): 467-476

ANEXO 1

Algoritmo *HANTS* utilizado para geração da análise harmônica.

```
; $Id: CGI_HANTS.pro,v 1.3 2005/07/18 16:35:52 scottm Exp $
;
;+
; NAME:
;   CGI_HANTS
;
; PURPOSE:
;   ENVI wrapper for fourier analyses through NDVI time series
;
; CATEGORY:
;   1D signal processing
;
; CALLING SEQUENCE:
;   CGI_HANTS, FET=value, FREQS=[f1,f2,f3,..], RANGE=[min,max], $
;     TAT=value, iMAX=value, /PLOT, DATA_IF=data input file,
;     MASK_IF=mask input file, HANTS_OF=output file for FFT components, $
;     STATUS_OF=output file with status information, $
;     SMOOTH_OF=output file with smoothed results, $
;     INTERP_OF=output file with interpolated results
;
; INPUTS:
;   Input: n-layer file with NDVI time-series
;   Mask: 1-layer file with a mask, processing will only be carried
;         out where mask has value '1'
;
; KEYWORD VARIABLES
; Processing Keywords (OBLIGATORY):
;   FET:  Fit Error Tolerance, is maximum tolerable downward deviation
;         between fourier fit and NDVI data values (in DN values)
;   FREQS: 1D array with frequencies that should be selected from the
;         fourier spectrum. i.e. freqs=[0,1,2,3] to use the fourier
;         compoments 0 (mean), 1 (1 sine wave), 2 (2 sine waves) and 3.
;   RANGE: Array of size 2 to specify the minimum and maximum valid data
;         values. i.e. range=[1,254]
;   TAT:  Throw Away Treshold, is maximum number of NDVI observations that
;         can be discarded in the fitting process.
;   iMAX:  Maximum nr. of iterations to be performed during processing
;
; I/O Keywords (OPTIONAL):
;   DATA_IF: (full path to) Filename used as input for processing (NDVI),
;         will ask for filename if not specified
;   MASK_IF: (full path to) Filename used as mask,
;         will ask for filename if not specified
;   HANTS_OF: (full path to) Filename used to write FFT components,
;         set this to an empty string ("") to avoid output being written
;         to disk.
;   STATUS_OF: (full path to) Filename used to write processing status info
;         set this to an empty string ("") to avoid output being written
;         to disk.
;   SMOOTH_OF: (full path to) Filename used to write smoothed results
;         set this to an empty string ("") to avoid output being written
;         to disk.
;   INTERP_OF: (full path to) Filename used to write interpolated results
;         set this to an empty string ("") to avoid output being written
```

```

;         to disk.
;
;
; Other Keywords (OPTIONAL):"
;   LOG_FILE: (full path to) Filename used to write the log to."
;
;
;   PLOT:   Visualise the optimisation process. Only applied for debugging
;           because it is very slow!
;
;
; SIDE EFFECTS:
; Will need ENVI to run
;
;
; MODIFICATION HISTORY:
; Written by: Allard de Wit, August 2003
; Modified by: Allard de Wit, April 2004 (General cleanup and improvements)
; Modified by: Allard de Wit, July 2005 (specifying input on commandline added,
;                                     logging added)
;
;
; LICENSE:
; This software is made available under the GPL. See http://www.gnu.org/licenses/gpl.html
;-

```

```

PRO cgi_hants, ev, freqs=freqs, _EXTRA=extra, data_if=data_if, mask_if=mask_if, $
      hants_of=hants_of, status_of=status_of, smooth_of=smooth_of, $
      interp_of=interp_of, log_file=log_file

```

```

;Check for correct command-line inputs

```

```

IF (N_ELEMENTS(freqs) EQ 0) THEN BEGIN
  PRINT, "USAGE: CGI_HANTS, FET=<value>, FREQS=[f1,f2,f3,..], RANGE=[min,max], $"
  PRINT, "   TAT=<value>, iMAX=<value>, /PLOT, DATA_IF=<data input file>,"
  PRINT, "   MASK_IF=<mask input file>, HANTS_OF=<output file for FFT components>,"
  PRINT, "   STATUS_OF=<output file with status information>,"
  PRINT, "   SMOOTH_OF=<output file with smoothed results>,"
  PRINT, "   INTERP_OF=<output file with interpolated results>"
  PRINT, "INPUTS:"
  PRINT, "   No commandline input, will ask for two input files:"
  PRINT, "   Input: n-layer file with NDVI time-series"
  PRINT, "   Mask: 1-layer file with a mask, processing will only be carried"
  PRINT, "         out where mask has value '1'"
  PRINT, ""
  PRINT, "KEYWORD VARIABLES"
  PRINT, " Processing keywords (OBLIGATORY):"
  PRINT, "   FET:  Fit Error Tolerance, is maximum tolerable downward deviation"
  PRINT, "         between fourier fit and NDVI data values (in DN values)"
  PRINT, "   FREQS: 1D array with frequencies that should be selected from the "
  PRINT, "         fourier spectrum. i.e. freqs=[0,1,2,3] to use the fourier"
  PRINT, "         compoments 0 (mean), 1 (1 sine wave), 2 (2 sine waves) and 3."
  PRINT, "   RANGE: Array of size 2 to specify the minimum and maximum valid data"
  PRINT, "         values. i.e. range=[1,254]"
  PRINT, "   TAT:  Throw Away Treshold, is maximum number of NDVI observations that"
  PRINT, "         can be discarded in the fitting process."
  PRINT, "   iMAX: Maximum nr. of iterations to be performed during processing"
  PRINT, ""
  PRINT, " I/O Keywords (OPTIONAL):"
  PRINT, "   DATA_IF: (full path to) Filename used as input for processing (NDVI),"
  PRINT, "             will ask for filename if not specified"
  PRINT, "   MASK_IF: (full path to) Filename used as mask,"
  PRINT, "             will ask for filename if not specified"
  PRINT, "   HANTS_OF: (full path to) Filename used to write status information,"

```

```

PRINT, "          set this to an empty string ("" to avoid output being written"
PRINT, "          to disk. Will ask for filename if not specified"
PRINT, " STATUS_OF: (full path to) Filename used to write processing status info"
PRINT, "          set this to an empty string ("" to avoid output being written"
PRINT, "          to disk. Will ask for filename if not specified"
PRINT, " SMOOTH_OF: (full path to) Filename used to write smoothed results"
PRINT, "          set this to an empty string ("" to avoid output being written"
PRINT, "          to disk. Will ask for filename if not specified"
PRINT, " INTERP_OF: (full path to) Filename used to write interpolated results"
PRINT, "          set this to an empty string ("" to avoid output being written"
PRINT, "          to disk. Will ask for filename if not specified"
PRINT, ""
PRINT, " Other Keywords (OPTIONAL):"
PRINT, " LOG_FILE: (full path to) Filename used to write the log to."
PRINT, " PLOT: Visualise the optimisation process. Only applied for debugging"
PRINT, "       because it is very slow!"
RETURN
ENDIF

;Define file units
unit1=0 & unit2=0 & unit3=0 & unit4=0

;Start logging
IF N_ELEMENTS(log_file) EQ 0 THEN log_file="HANTS_log.txt"
hants_log=obj_new("cgi_logger", log_file=log_file, log_init_message="Log file created by HANTS")

;Define error handler for CGI_HANTS routine
CATCH, error_status
IF error_status NE 0 THEN BEGIN
;Close any open files
IF unit1 GT 0 THEN BEGIN CLOSE, unit1 & FREE_LUN, unit1 & ENDIF
IF unit2 GT 0 THEN BEGIN CLOSE, unit1 & FREE_LUN, unit1 & ENDIF
IF unit3 GT 0 THEN BEGIN CLOSE, unit1 & FREE_LUN, unit1 & ENDIF
IF unit4 GT 0 THEN BEGIN CLOSE, unit1 & FREE_LUN, unit1 & ENDIF
;Close and destroy log
hants_log->write_log_messages
OBJ_DESTROY, hants_log
CATCH, /CANCEL
RETURN
ENDIF

;Select input file (NDVI or something else)
IF N_ELEMENTS(data_if) EQ 0 THEN BEGIN
envi_select, title='Input Filename', fid=infid, /FILE_ONLY, /NO_DIMS, /NO_SPEC
IF (infid eq -1) THEN MESSAGE
ENDIF ELSE BEGIN
envi_open_file, data_if, r_fid=infid, /NO_INTERACTIVE_QUERY, /NO_REALIZE
IF (infid eq -1) THEN BEGIN
hants_log->add_log_message, "ERROR: Specified input file '" + data_if + "' not found!"
MESSAGE, "ERROR: Specified input file '" + data_if + "' not found!"
ENDIF
ENDELSE

;Query input file for information (lines, columns, bands, etc)
envi_file_query, infid, data_type=data_type, xstart=xstart, $
ystart=ystart, interleave=interleave, nb=nb, nl=nl, ns=ns,$
fname=fname
map_info=envi_get_map_info(fid=infid)

```

```

proj_info=envi_get_projection(fid=infid)
hants_log->add_log_message, "Using input file: " + fname

;Select MASK file
IF N_ELEMENTS(mask_if) EQ 0 THEN BEGIN
envi_select, title='Mask Filename', fid=maskfid, /FILE_ONLY, /NO_DIMS, /NO_SPEC
IF (maskfid eq -1) THEN MESSAGE
ENDIF ELSE BEGIN
  envi_open_file, mask_if, r_fid=maskfid, /NO_INTERACTIVE_QUERY, /NO_REALIZE
  IF (maskfid eq -1) THEN BEGIN
    hants_log->add_log_message, "ERROR: Specified mask file " + mask_if + " not found!"
    MESSAGE, "ERROR: Specified mask file ", mask_if, " not found!"
  ENDIF
ENDELSE

;Query mask file for information (lines, columns, bands, etc)
envi_file_query, maskfid, nb=m_nb, nl=m_nl, ns=m_ns, fname=m_fname
hants_log->add_log_message, "Using mask file: " + m_fname

;Check if mask and input file have equal number of lines and columns
IF (ns NE m_ns) OR (nl NE m_nl) THEN BEGIN
  hants_log->add_log_message, "Mask file and input file do not have an " + $
    "equal number of lines and/or columns!"
  MESSAGE, "Mask file and input file do not have an equal number of lines and/or columns!"
ENDIF

; Get output files and check for an output filename
IF N_ELEMENTS(hants_of) EQ 0 THEN BEGIN
  hants_of=envi_pickfile(filter='*.img', title='Output file for fourier components!')
  IF (hants_of eq "") THEN MESSAGE
  OPENW, unit1, hants_of, /GET_LUN
ENDIF ELSE BEGIN
  IF hants_of EQ "" THEN $
    unit1=0 $
  ELSE $
    OPENW, unit1, hants_of, /GET_LUN
  ENDELSE
hants_log->add_log_message, "Write fourier components to: " + hants_of

IF N_ELEMENTS(status_of) EQ 0 THEN BEGIN
  status_of=envi_pickfile(filter='*.img', title='Output file for status indicator!')
  IF (status_of eq "") THEN MESSAGE
  OPENW, unit2, status_of, /GET_LUN
ENDIF ELSE BEGIN
  IF status_of EQ "" THEN $
    unit2=0 $
  ELSE $
    OPENW, unit2, status_of, /GET_LUN
  ENDELSE
hants_log->add_log_message, "Write status info to: " + status_of

IF N_ELEMENTS(smooth_of) EQ 0 THEN BEGIN
  smooth_of=envi_pickfile(filter='*.img', title='Output file for smoothed results!')
  IF (smooth_of eq "") THEN MESSAGE
  OPENW, unit3, smooth_of, /GET_LUN
ENDIF ELSE BEGIN
  IF smooth_of EQ "" THEN $
    unit3=0 $

```

```

ELSE $
  OPENW, unit3, smooth_of, /GET_LUN
ENDELSE
hants_log->add_log_message, "Write smoothed results to: " + smooth_of

IF N_ELEMENTS(interp_of) EQ 0 THEN BEGIN
  interp_of=envi_pickfile(filter='*.img', title='Output file for interpolated results!')
  IF (interp_of eq "") THEN MESSAGE
  OPENW, unit4, interp_of, /GET_LUN
ENDIF ELSE BEGIN
  IF interp_of EQ "" THEN $
    unit4=0 $
  ELSE $
    OPENW, unit4, interp_of, /GET_LUN
  ENDELSE
hants_log->add_log_message, "Write interpolated results to: " + interp_of

;Open input files and initialise tiling
tile_id1 = envi_init_tile(infid, INDGEN(nb), num_tiles=num_tiles, interleave=1)
tile_id2 = envi_init_tile(maskfid, [0], num_tiles=mask_tiles, interleave=1)
hants_log->add_log_message, "Initialised tiling!"

;Initialise reporting
rstr=['Applying HANTS']
envi_report_init, rstr, title="Processing", base=base, /interrupt
envi_report_inc, base, num_tiles

;Main processing loop
nr_freqs=N_ELEMENTS(freqs)
FOR i=0L, num_tiles-1 DO BEGIN
  hants_log->add_log_message, "Processing tile: " + STRING(i)
  envi_report_stat, base, i, num_tiles
  data = envi_get_tile(tile_id1, i)
  mask = envi_get_tile(tile_id2, i)
  datasize=SIZE(data, /DIMENSIONS)
  result=DCOMPLEXARR(datasize[0], nr_freqs)
  status=INTARR(datasize[0],3)
  smNDVI=FLTARR(datasize[0], datasize[1])
  iNDVI=FLTARR(datasize[0], datasize[1])
  tmp1=INTARR(3) & tmp2=FLTARR(datasize[1]) & tmp3=tmp2
  FOR j=0, datasize[0]-1 DO BEGIN
    IF mask[j] EQ 1 THEN BEGIN
      result[j,*]=cgi_fftnvdi(data[j,*], freqs=freqs, $
        status=tmp1, smNDVI=tmp2, iNDVI=tmp3, _EXTRA=extra)
      IF tmp1[0] EQ -1 THEN $
        hants_log->add_log_message, "Processing error occured at pixel X,Y: " + $
          STRCOMPRESS(STRING(i+1)+","+STRING(j+1), /REMOVE_ALL)
    ENDIF ELSE BEGIN
      tmp1=0 & tmp2=FLTARR(datasize[1]) & tmp3=tmp2
    ENDELSE
    status[j,*]=tmp1
    smNDVI[j,*]=tmp2
    iNDVI[j,*]=tmp3
  ENDFOR
  IF unit1 GT 0 THEN WRITEU, unit1, result
  IF unit2 GT 0 THEN WRITEU, unit2, status
  IF unit3 GT 0 THEN WRITEU, unit3, smNDVI
  IF unit4 GT 0 THEN WRITEU, unit4, iNDVI

```

ENDFOR

envi_report_init, base=base, /finish

envi_tile_done, tile_id1

envi_tile_done, tile_id2

hants_log->**add_log_message**, "Closing ENVI tiling"

envi_file_mng, id=infid, /remove

envi_file_mng, id=maskfid, /remove

IF unit1 **GT 0 THEN BEGIN**

CLOSE, unit1 & **FREE_LUN**, unit1

envi_setup_head, fname=hants_of, ns=ns, nl=nl, nb=nr_freqs, \$

data_type=9, offset=0, interleave=1, \$

xstart=xstart, ystart=ystart, \$

descrip='HANTS FFT Frequencies', /write, /open, \$

map_info=map_info

hants_log->**add_log_message**, "Closing and writing header for: " + hants_of

ENDIF

IF unit2 **GT 0 THEN BEGIN**

CLOSE, unit2 & **FREE_LUN**, unit2

envi_setup_head, fname=status_of, ns=ns, nl=nl, nb=3, \$

data_type=2, offset=0, interleave=1, \$

xstart=xstart, ystart=ystart, \$

descrip='HANTS status', /write, /open, \$

map_info=map_info, bnames=['Nr. of retained data points', \$

'Nr. of iterations 1st loop', 'Nr. of iterations 2nd loop']

hants_log->**add_log_message**, "Closing and writing header for: " + status_of

ENDIF

IF unit3 **GT 0 THEN BEGIN**

CLOSE, unit3 & **FREE_LUN**, unit3

envi_setup_head, fname=smooth_of, ns=ns, nl=nl, nb=datasize[1], \$

data_type=4, offset=0, interleave=1, \$

xstart=xstart, ystart=ystart, \$

descrip='HANTS Smoothed Results', /write, /open, \$

map_info=map_info

hants_log->**add_log_message**, "Closing and writing header for: " + smooth_of

ENDIF

IF unit4 **GT 0 THEN BEGIN**

CLOSE, unit4 & **FREE_LUN**, unit4

envi_setup_head, fname=interp_of, ns=ns, nl=nl, nb=datasize[1], \$

data_type=4, offset=0, interleave=1, \$

xstart=xstart, ystart=ystart, \$

descrip='HANTS Interpolated Results', /write, /open, \$

map_info=map_info

hants_log->**add_log_message**, "Closing and writing header for: " + interp_of

ENDIF

;Write and close log

hants_log->**write_log_messages**

OBJ_DESTROY, hants_log

END