



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.26.17.14-TDI

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE ESTÁGIOS
SUCESSIONAIS NO DOMÍNIO MATA ATLÂNTICA EM
DIFERENTES CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO LOCAL
UTILIZANDO IMAGENS TM/LANDSAT 5**

Ana Carolina Moreira Pessôa

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e
Ieda Del'Arco Sanches, aprovada
em 14 de março de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L8MD8P>>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.26.17.14-TDI

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE ESTÁGIOS
SUCESSIONAIS NO DOMÍNIO MATA ATLÂNTICA EM
DIFERENTES CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO LOCAL
UTILIZANDO IMAGENS TM/LANDSAT 5**

Ana Carolina Moreira Pessôa

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e
Ieda Del'Arco Sanches, aprovada
em 14 de março de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L8MD8P>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pessôa, Ana Carolina Moreira.

P439c Caracterização espectral de estágios sucessionais no domínio Mata Atlântica em diferentes condições de iluminação local utilizando imagens TM/Landsat 5 / Ana Carolina Moreira Pessôa. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xxvi + 126 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.26.17.14-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadores : Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Ieda Del’Arco Sanches.

1. Estágio sucessionais. 2. Tasseled Cap. 3. Iluminação local.
I.Título.

CDU 528.8(253)(815)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Ana Carolina Moreira Pessoa**

Título: "CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE ESTÁGIOS SUCESSIONAIS NO DOMÍNIO MATA ATLÂNTICA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO LOCAL UTILIZANDO IMAGENS TM/LANDSAT 5".

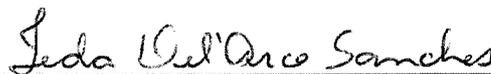
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



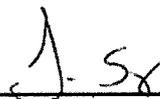
Presidente / Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Ieda Del' Arco Sanches



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão



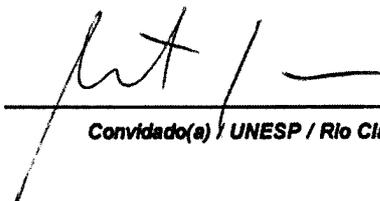
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Milton Cezar Ribeiro



Convidado(a) / UNESP / Rio Claro - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

São José dos Campos, 14 de Março de 2016

“Between every two pines is a doorway to a new world.”

JOHN MUIR

A meus pais, José e Maria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, com o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus orientadores, Dr. Flávio Jorge Ponzoni e Dra. Ieda Sanches, pela dedicação, apoio, ensinamentos e conversas que compartilhamos durante esses 2 anos. Vocês me fizeram ver uma beleza na carreira acadêmica que até então não via!

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo acolhimento e estrutura para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.

Ao corpo docente da PG-SER, pela enorme bagagem de conhecimento que me deixaram. Em especial, ao Dr. Camilo Daleles Renó pelas contribuições que deu ao trabalho sobre a análise estatística, e pela paciência com minhas curiosidades, e ao Dr. Lênio Galvão, pelas discussões, contribuições e sugestões para a melhoria do trabalho.

Ao Dr. Fabien Wagner, pelo auxílio técnico e ideias para a análise dos dados.

Ao Ricardo Breder, pela disponibilidade em me auxiliar remotamente com o desenvolvimento das rotinas para as análises dos dados.

Aos meus amigos computeiros David França, Rennan Marujo, Sacha Ortiz e Rodolfo Lotte, pela disponibilidade em momentos de desespero.

À amiga Aline Jacon, pelas discussões, nem sempre acadêmicas, que me fizeram crescer e me acalmaram quando era preciso.

A minha companheira de luta Bruna Pechini, por nossa sintonia. No final tudo dará certo!

A todos os amigos da querida turma PG-SER 2014, pelos bons momentos compartilhados e pela amizade.

Ao meu amigo e companheiro Wagner Romito, pela compreensão e pela partilha desta fase de nossas vidas.

A meus avós, por não terem medido esforços para me dar a melhor educação sempre.

A toda minha família, que sempre foram exemplos, e mais do que nunca, estão me mostrando na prática que para conseguir basta querer.

Por fim, a essa força espiritual que me acompanha sempre.

A todos, sinceramente, minha Gratidão!

RESUMO

Florestas secundárias possuem grande importância na absorção de CO₂ atmosférico e no equilíbrio ecossistêmico perdido com a supressão de florestas primárias. A Mata Atlântica, ecossistema altamente afetado pela ação antrópica, possui fragmentos florestais em diferentes estágios sucessionais, os quais são regulados legalmente mediante o estabelecimento de diretrizes específicas. A identificação desses estágios nos quais fragmentos florestais se encontram é interesse de diversos seguimentos da sociedade e de suma importância para a proteção de diferentes ecossistemas. Técnicas de sensoriamento remoto tem ganhado destaque em estudos de identificação e de caracterização de estágios sucessionais, porém, o Domínio Mata Atlântica acumulou poucos estudos utilizando esta abordagem. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo caracterizar espectralmente diferentes estágios sucessionais de fragmentos florestais no Domínio Mata Atlântica, através de uma análise multitemporal de imagens TM/Landsat 5, levando ainda em consideração aspectos relacionados à topografia. Dezoito cenas TM/Landsat 5 abrangendo um intervalo total de 25 anos foram utilizadas para selecionar e classificar fragmentos florestais (aqui denominados de polígonos) em diferentes estágios sucessionais por interpretação visual de imagens. Essa seleção levou em consideração a condição de iluminação de cada polígono. Polígonos em diferentes classes de iluminação foram analisados independentemente. A partir da transformação *Tasseled Cap*, as feições *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* compuseram um espaço tridimensional no qual foi avaliada a dinâmica espectral resultante da mudança na estrutura de dossel entre estágios sucessionais. De acordo com a metodologia adotada, os resultados sugerem que é possível distinguir estágios sucessionais por interpretação visual de imagens TM/Landsat 5 levando em consideração a classe de iluminação considerada. A classe Pouco Iluminado (PI) registrou maior número de inconsistências e, conseqüentemente, maior susceptibilidade a erros de classificação. A metodologia por fatiamento em classes de iluminação local destacou a necessidade de diferentes condições de iluminação serem tratadas independentemente. A caracterização espectral se mostrou importante como ferramenta de suporte para a interpretação visual de imagens.

SPECTRAL CHARACTERIZATION OF SUCCESSIONAL STAGES IN THE ATLANTIC FOREST DOMAIN UNDER DIFFERENT LOCAL ILLUMINATION CONDITIONS USING TM/LANDSAT 5 IMAGES

ABSTRACT

Secondary forests have a remarkable weight in the absorption of atmospheric CO₂ and in the ecosystem balance lost due to the primary forests suppression. The Atlantic Forest, which is a highly affected ecosystem by human action, presents forest remnants in different successional stages. These successional stages are legally regulated through the establishment of specific legal guidelines. Identifying forest secondary succession stages has been one of the most important interests of several society segments and it has great importance to the legal protection of different ecosystems. Several studies have been carried out using remote sensing techniques for the identification and characterization of successional stages of forest fragments. However, the Atlantic Forest Domain accumulated few studies using this approach. In this context, the present study aims to spectrally characterize different successional stages of forest fragments in the Atlantic Forest Domain through a multitemporal analysis of TM/Landsat 5 images, taking into account aspects related to topography. Eighteen TM/Landsat 5 scenes covering a total period of 25 years were used to select and classify polygons in different successional stages through visual image interpretation. This selection considered the illumination condition of each polygon, so that polygons on different illumination classes could be analyzed independently. From Tasseled Cap transformation, the Brightness, Greenness and Wetness features composed a three-dimensional space in which the spectral dynamics resulting from canopy structural changes between successional stages could be characterized. According to the methodology adopted, the results suggest that successional stages can be distinguished by visual interpretation of TM/Landsat 5 images as long as illumination conditions are considered. The less illuminated class recorded more inconsistencies and, consequently, higher susceptibility to misclassification. The methodology of slicing the images into illumination classes highlighted the need for different illumination conditions be treated independently. The spectral characterization showed to be useful as a support tool for the visual image interpretation.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 - Geometria de iluminação e sombreamento de um elemento de terreno.	15
Figura 3.2 - Estrutura básica dos dados TM.	17
Figura 3.3 - Dados de um sensor hipotético de três bandas. (A) O cubo representa o espaço multidimensional dos dados. O retângulo representa uma estrutura de dados dentro do cubo. (B) Mudança na perspectiva de observação para que a estrutura retângula dos dados seja vista diretamente. (C) Direção da variação espectral associada com dois processos físicos distintos em classes presentes na cena. (D) Ajustamento adicional na perspectiva de observação para alinhar as direções relacionadas a processos físicos com os novos eixos de coordenadas.	18
Figura 3.4 - Dados TM transformados em coordenadas <i>Tasseled Cap</i> . (A) Ponto de vista do Plano da Vegetação. (B) Ponto de vista do Plano do Solo. (C) Ponto de vista da Zona de Transição.	20
Figura 4.1 - Área de Estudo. (A) Limites dos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo, e localização da cena TM/Landsat 5 em composição R(4)G(5)B(3). (B) Cena TM/Landsat 5, órbita 218, ponto 76, e em composição R(4)G(5)B(3). Data de aquisição da cena 05/11/2011.	23
Figura 4.2 - Mapa de declividade (A), classificado segundo os limites descritos pela Embrapa (1999) e altimetria (B) da área de estudo. Os dados altimétricos foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM, e a declividade foi calculada a partir dos dados altimétricos no aplicativo R.	24
Figura 4.3 - Fluxograma da metodologia adotada.	26
Figura 4.4 - Faixas espectrais correspondentes às bandas do sensor TM, indicadas sobre um espectro da reflectância típico de vegetação verde sadia.	27
Figura 4.5 - Exemplo de polígono classificado como floresta primária (P). Cena TM/Landsat 5 composição R(4)G(5)B(3). A cena acima apresenta um polígono e seu entorno em escala 1:100.000. As cenas abaixo apresentam o entorno do polígono em escala 1:15.000. O polígono representado se insere na classe Muito Iluminado (MI). Cena	32
Figura 4.6 - Exemplo de polígono classificado como inicial (SS1), intermediário (SS2) e avançado (SS3), em três datas distintas, 1989, 2005 e 2011, respectivamente. Cena TM/Landsat 5 composição R(4)G(5)B(3). A cena acima apresenta um polígono e seu	

entorno em escala 1:100.000. As cenas abaixo apresentam o entorno do polígono em escala 1:15.000. O polígono representado se insere na classe Muito Iluminado (MI).	33
Figura 4.7 - Guia para interpretação da direção do deslocamento dos pontos no espaço TC.	44
Figura 5.1 - Reflectância de superfície dada em porcentagem ao longo das seis bandas espectrais ópticas TM/Landsat 5, considerando a classe de iluminação Muito Iluminado e data de aquisição da cena Landsat.	47
Figura 5.2 - Reflectância de superfície dada em porcentagem ao longo das seis bandas espectrais ópticas TM/Landsat 5, considerando a classe de iluminação Iluminado e data de aquisição da cena Landsat.	47
Figura 5.3 - Reflectância de superfície dada em porcentagem ao longo das seis bandas espectrais ópticas TM/Landsat 5, considerando a classe de iluminação Pouco Iluminado e data de aquisição da cena Landsat.	48
Figura 5.4 – Comportamento espectral dos estágios sucessionais em diferentes datas sob a condição de iluminação local Muito Iluminado.	51
Figura 5.5 - Histograma de densidade de cada feição TC, considerando as imagens obtidas em diferentes datas, na classe de iluminação local Muito Iluminado.	53
Figura 5.6 - Comportamento espectral dos estágios sucessionais em diferentes datas sob a condição de iluminação local Iluminado.	54
Figura 5.7 - Histograma de densidade de cada feição TC, considerando as imagens obtidas em diferentes datas, na classe de iluminação local Iluminado.	55
Figura 5.8 - Comportamento espectral dos estágios sucessionais em diferentes datas sob a condição de iluminação local Pouco Iluminado.	56
Figura 5.9 - Histograma de densidade de cada feição TC, considerando as imagens obtidas em diferentes datas, na classe de iluminação local Pouco Iluminado.	57
Figura 5.10 - Figura esquemática do padrão de distribuição dos estágios sucessionais no espaço TC.	58
Figura 5.11 - Dinâmica dos estágios sucessionais no espaço TC na condição de iluminação local Muito Iluminado.	60
Figura 5.12 – Espectro temporal de cinco polígonos exemplos da classe de iluminação Muito Iluminado.	61
Figura 5.13 - Dinâmica dos estágios sucessionais no espaço TC na condição de iluminação local Iluminado.	61

Figura 5.14 - Espectro temporal de cinco polígonos exemplos da classe de iluminação Iluminado.	62
Figura 5.15 - Dinâmica dos estágios sucessionais no espaço TC na condição de iluminação local Pouco Iluminado.	63
Figura 5.16 - Espectro temporal de cinco polígonos exemplos da classe de iluminação Pouco Iluminado.	64
Figura 5.17 - Boxplots considerando cada estágio em diferentes cenas na classe de iluminação Muito Iluminado. O quadro colorido destaca a inconsistência com o padrão esperado.	66
Figura 5.18 - Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov aplicado às comparações possíveis entre estágios e entre imagens na classe de iluminação Muito Iluminado. (*) comparações nas quais o teste resultou valores de $p < 0,05$. (-) comparações nas quais o teste resultou valores de $p > 0,05$. (X) comparações não possíveis. Espaços brancos são comparações não feitas. Espaços com fundo colorido representam inconsistências entre o resultado estatístico e a interpretação visual na classificação dos estágios sucessionais. (A) <i>Brightness</i> . (B) <i>Greenness</i> . (C) <i>Wetness</i>	67
Figura 5.19 - Boxplots considerando cada estágio em diferentes cenas na classe de iluminação Iluminado. Quadros coloridos marcam inconsistência com o padrão esperado.	68
Figura 5.20 - Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov aplicado às comparações possíveis entre estágios e entre imagens na classe de iluminação Iluminado. (*) comparações nas quais o teste resultou valores de $p < 0,05$. (-) comparações nas quais o teste resultou valores de $p > 0,05$. (X) comparações não possíveis. Espaços brancos são comparações não feitas. Espaços com fundo colorido representam inconsistências entre o resultado estatístico e a interpretação visual na classificação dos estágios sucessionais. (A) <i>Brightness</i> . (B) <i>Greenness</i> . (C) <i>Wetness</i>	69
Figura 5.21 - <i>Boxplots</i> considerando cada estágio em diferentes cenas na classe de iluminação Pouco Iluminado. Quadros coloridos marcam inconsistência com o padrão esperado.	70
Figura 5.22 - Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov aplicado às comparações possíveis entre estágios e entre imagens na classe de iluminação Pouco Iluminado. (*) comparações nas quais o teste resultou valores de $p < 0,05$. (-) comparações nas quais o teste resultou valores de $p > 0,05$. (X) comparações não possíveis. Espaços brancos são comparações não feitas. Espaços com fundo colorido representam inconsistências	

entre o resultado estatístico e a interpretação visual na classificação dos estágios
sucessionais. (A) *Brightness*. (B) *Greenness*. (C) *Wetness*. 71

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 – Especificação do comprimento de onda e resolução espacial das bandas espectrais do sensor TM.	27
Tabela 4.2 – Cenas utilizadas no trabalho e suas respectivas posições solares. Destacadas em cinza as cenas utilizadas para extração de dados.	28
Tabela 4.3 – Classes de Iluminação Local e seus limiares <i>cosy_i</i> máximo e mínimo. ...	30
Tabela 4.4 - Quantidade de polígonos selecionados por classe de iluminação local e por estágio sucessional.	34
Tabela 4.5 – Coeficientes utilizados no aplicativo ENVI para a transformação TC nos dados TM/Landsat 5.	36
Tabela 4.6 – Níveis de generalização utilizada em cada análise de dados.	36
Tabela 4.7 – Exemplo do cálculo dos eixos utilizados na análise do deslocamento no espaço TC para o período de 1989 – 1996 de um grupo de polígonos.	41
Tabela 5.1 – Polígonos selecionados nas três classes de iluminação, seus códigos identificadores (ID), e estado e fitofisionomia aos quais pertencem.	45
Tabela 5.2 – Continuação.	46
Tabela 5.3 – Contabilização das inconsistências geradas a partir da comparação de distribuições de dados entre estágios diferentes em uma mesma cena, e entre o mesmo estágio em imagens diferentes, considerando a classe de iluminação local.	72
Tabela 5.4 – Detalhamento da contabilização das inconsistências considerando os estágios sucessionais.	72
Tabela 5.5 - Valores de qui-quadrado do teste de deslocamento no espaço TC. Intervalos preenchidos com (-) não foram considerados. Resultados com fundo cinza apresentaram consistência.	75
Tabela 5.6 – Número de pontos por octantes e valor de qui-quadrado para grupos de polígonos que registraram consistência. Quadros cinzas sinalizam octante que registrou maior número de pontos.	76
Tabela 5.7 – Exemplos de grupos de polígonos sem dinâmica sucessional registrada por interpretação visual de imagens, e com deslocamento no TC que sugere o contrário. Quadros cinzas sinalizam octante que registrou maior número de pontos.	77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3D	- tridimensional
6S	- Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
ATE	- Áreas de Tensão Ecológica
AVHRR/ NOAA	- Advanced Very High Resolution Radiometer/ National Oceanic and Atmospheric Administration
CHRIS/PROBA	- Compact High Resolution Imaging Spectrometer/ Project for On-Board Autonomy
CO ₂	- Dióxido de Carbono
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAP	- Diâmetro a Altura do Peito
ETM+	- Enhanced Thematic Mapper Plus
FESD	- Floresta Estacional Semidecidual
FOD	- Floresta Ombrófila Densa
FOM	- Floresta Ombrófila Mista
FORTTRAN	- IBM Mathematical FORMula TRANslation System
FRB	- Fator de reflectância bidirecional
HA	- hectare
I	- Iluminado
ID	- Identificador
IVM	- Infravermelho Médio
IVP	- Infravermelho Próximo
Km	- Quilômetros
K-S	- Kolmogorov-Smirnov
LEGAL	- Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
L _{max}	- Radiância máxima
L _{min}	- Radiância mínima
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MI	- Muito Iluminado
MSS	- Multispectral Scanner
ND	- Números Digitais
P	- Floresta Primária
PCA	- Análise por Principais Componentes
PI	- Pouco Iluminado
SPRING	- Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas
SRTM	- Shuttle Radar Topography Mission
SS1	- Sucessão Secundária – Estágio Inicial
SS2	- Sucessão Secundária – Estágio Intermediário
SS3	- Sucessão Secundária – Estágio Avançado
TC	- Tasseled Cap
TM	- Thematic Mapper

TOA	- Radiância no topo da atmosfera
USGS	- United States Geological Survey
UTM	- Universal Transversal Mercator
WGS	- World Geodetic System

LISTA DE SÍMBOLOS

χ^2	- Valor de qui-quadrado
$L_{max\lambda}$	- Radiância máxima no comprimento de onda λ
$L_{min\lambda}$	- Radiância mínima no comprimento de onda λ
L_λ	- Radiância no topo da atmosfera (TOA) no comprimento de onda λ
$ND_{max\lambda}$	- Número Digital máximo no comprimento de onda λ
θ_s	- Ângulo Solar Zenital na hora de aquisição da imagem
θ_t	- Declividade
φ_s	- Ângulo Solar Azimutal na hora de aquisição da imagem
φ_t	- Orientação de Vertentes
D	- Desvio Máximo
E_i	- Número de casos esperados na categoria i
$F_0(x)$	- Distribuição teórica acumulada
H_0	- Hipótese Nula
O_i	- Número de casos observados classificados na categoria i
p	- Valor-p
$S_n(x)$	- Distribuição de frequências dos valores amostrais
α	- Nível de Significância
γ_i	- Ângulo de incidência
λ	- Comprimento de Onda
φ_o	- Ângulo Azimutal de Iluminação
θ_o	- Ângulo Zenital de Iluminação

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO..... 1
2	OBJETIVOS..... 5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 7
3.1	Mata Atlântica..... 7
3.2	Florestas Secundárias..... 8
3.2.1	Estágios Sucessionais 9
3.2.2	Identificação e caracterização espectral de estágios sucessionais 11
3.3	Iluminação local..... 14
3.4	Transformação <i>Tasseled Cap</i> (TC)..... 16
4	METODOLOGIA DE TRABALHO 23
4.1	Área de Estudo 23
4.2	Fluxo geral do trabalho 25
4.3	Especificação dos dados 26
4.4	Fatiamento em classes de iluminação local 29
4.5	Seleção de polígonos e identificação dos estágios sucessionais..... 31
4.6	Correção Atmosférica 34
4.7	Transformação <i>Tasseled Cap</i> (TC)..... 35
4.8	Extração de dados 36
4.9	Análise de dados 37
4.9.1	Abordagem Qualitativa..... 37
4.9.1.1	Etapa 1 38
4.9.1.2	Etapa 2..... 38
4.9.2	Abordagem Quantitativa..... 38
4.9.2.1	Análise de Inconsistência por Kolmogorov-Smirnov (K-S)..... 39
4.9.2.2	Análise do deslocamento no espaço TC..... 40

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	Dinâmica sucessional por interpretação visual	45
5.2	Caracterização espectral dos estágios sucessionais	46
5.2.1	Caracterização espectral através de espectros da reflectância	46
5.2.2	Caracterização espectral no espaço <i>Tasseled Cap</i> (TC)	50
5.2.2.1	Etapa 1	50
5.2.2.2	Etapa 2.....	58
5.3	Análises Quantitativas	65
5.3.1	Análise de Inconsistência por Kolmogorov-Smirnov.....	65
5.3.2	Análise do deslocamento no espaço TC	74
6	CONCLUSÃO.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
	ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS ESTÁGIOS SUCESSIONAIS SECUNDÁRIOS SEGUNDO AS RESOLUÇÕES CONAMA	93
	APÊNDICE A – HISTÓRICO DOS POLÍGONOS FEITO ATRAVÉS DE INTERPRETAÇÃO VISUAL DE IMAGENS	95
	APÊNDICE B – AGRUPAMENTO DOS POLÍGONOS SEGUNDO SUAS DINÂMICAS SUCESSIONAIS	99
	APÊNDICE C – ROTINA EM LINGUAGEM PYTHON UTILIZADA NA ANÁLISE DE DESLOCAMENTO NO ESPAÇO TC.....	105
	APÊNDICE D – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS ESTÁGIOS SUCESSIONAIS	119
	APÊNDICE E – ESTATÍSTICA DO TESTE KOLMOGOROV-SMIRNOV	123

1 INTRODUÇÃO

Impactos antrópicos sobre florestas primárias podem ser amenizados através da regeneração florestal. Essa regeneração acontece através do processo de sucessão ecológica, catalisada ou não por práticas de restauração florestal, o que permite que a floresta se recomponha formando o que se define como florestas secundárias. Na região tropical, florestas secundárias já foram estimadas em aproximadamente 40% do total de cobertura vegetal (BROWN; LUGO, 1990), e essa estimativa cresce com o avanço dos impactos sobre as florestas primárias que ainda existem. Ewel (1979) ressalta que conforme a área de florestas secundárias expande, simultaneamente com o encolhimento das áreas de florestas primárias, serão elas as responsáveis por serviços ambientais essenciais para a vida humana e que, conseqüentemente, precisarão ser geridas.

A degradação florestal no Brasil data desde a época de seu descobrimento (DEAN, 1995). A Mata Atlântica foi o domínio mais afetado e ainda hoje, seus fragmentos remanescentes sofrem grande pressão antrópica (RIBEIRO et al., 2009). Apesar do desmatamento contínuo da Mata Atlântica, nas últimas décadas foi possível observar crescente esforço no desenvolvimento de iniciativas que minimizam esse impacto, como a restauração ecológica (RODRIGUES et al., 2009). O domínio Mata Atlântica é, então, caracterizado por um mosaico de remanescentes florestais compostos por florestas primárias e florestas secundárias em diferentes estágios de regeneração.

A definição de cada estágio de regeneração de florestas secundárias difere entre domínios, e até mesmo dentro de um mesmo domínio, como é o caso da Mata Atlântica (MORELLATO; HADDAD, 2000). Na Mata Atlântica, a variabilidade florística e a diversidade no processo de sucessão ecológica ao longo de sua área de abrangência são grandes, devido, principalmente, às diferenças latitudinais e aos processos decorrentes da ação antrópica ao longo do tempo (MORELLATO; HADDAD, 2000; CASTRO et al., 2003; RODRIGUES et al., 2009). Como consequência dessa grande variabilidade, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu resoluções específicas, para cada estado brasileiro inserido no domínio, que definem o que seriam os estágios sucessionais em cada localidade. Para efeitos legais, cada estágio sucessional é regulado por diferentes restrições de uso e exploração. Apesar da existência destas resoluções, estas não garantem precisão da identificação dos estágios devido ao seu caráter subjetivo.

A identificação dos estágios sucessionais nos quais fragmentos florestais se encontram é interesse de diversos seguimentos da sociedade e de suma importância para sua proteção, fundamentada também em decisões jurídicas. Diferentes abordagens podem ser consideradas na identificação de estágios sucessionais; como a cronosequência ou a descrição estrutural desses estágios quando acompanhados ao longo de seu desenvolvimento. Essa descrição pode ser elaborada somente com parâmetros obtidos em campo (LU et al., 2003); ou com auxílio de variáveis espectrais (LU et al., 2004; GALVÃO et al., 2015), obtidas através do uso de sensores remotos.

Healey et al. (2005) afirmam que em escala regional ou menor, a única maneira factível de monitorar mudanças na estrutura florestal em uma base regular e contínua é com auxílio de sensoriamento remoto. O uso de imagens geradas por satélites tem ganhado destaque em estudos de identificação e de caracterização de estágios sucessionais (MORAN et al., 1994; FOODY et al., 1996; VIEIRA et al., 2003; PONZONI; REZENDE, 2004; GALVÃO et al., 2009; MILLÁN et al., 2014; GALVÃO et al., 2015). A radiação eletromagnética provinda da cobertura vegetal que é registrada por sensores é resultado de um processo de interação que leva em consideração aspectos biofísicos e fatores geométricos de iluminação e de visada (PONZONI; DISPERATI, 1994). Alterações da estrutura de dossel resultantes da dinâmica sucessional da floresta podem ser relacionadas a mudanças nesse registro da radiação eletromagnética refletida pela vegetação (KALACSKA et al., 2007).

No Brasil, a maior parte dos estudos de identificação e de caracterização de estágios sucessionais por meio de técnicas de sensoriamento remoto foram feitos na Amazônia (CASTRO et al., 2003). A Mata Atlântica acumulou poucos estudos ao longo dos anos com esta abordagem, e uma das razões para isto é a condição topográfica desafiante para o uso de dados orbitais. No entanto, considerando sua ampla extensão e nível de preservação bastante afetado, esse domínio carece de estudos que facilitem e agilizem tomadas de decisão voltadas a sua conservação. Sobretudo, é preciso que haja alguma preocupação sobre a influência da topografia nas análises que utilizam dados orbitais de áreas com relevo acidentado.

Dada a importância das florestas secundárias para o Domínio Mata Atlântica, da identificação dos estágios sucessionais como subsídio para a conservação destes fragmentos florestais e do promissor uso de sensores remotos para estudos sobre o tema,

o objetivo deste trabalho é caracterizar espectralmente fragmentos florestais do domínio da Mata Atlântica levando em consideração condições de iluminação local, resultado da ação conjunta do posicionamento topográfico e da geometria de iluminação.

2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é caracterizar espectralmente diferentes estágios sucessionais de fragmentos de Floresta Ombrófila Densa no Domínio Mata Atlântica através de análise multitemporal de imagens TM/Landsat 5, levando em consideração a iluminação local.

Os seguintes objetivos específicos são propostos:

- i) Compartimentar a área de estudo em unidades homogêneas de iluminação através do fatiamento de imagens *cosi*;
- ii) Classificar através da interpretação visual de uma série histórica de imagens, possíveis fragmentos florestais em três estágios sucessionais: inicial, intermediário, avançado, e em florestas primárias;
- iii) Avaliar o comportamento espectral dos estágios sucessionais e de floresta primárias através de espectros de reflectância de superfície;
- iv) Avaliar o comportamento espectral dos estágios sucessionais e de floresta primárias no espaço *Tasseled Cap*;
- v) Testar estatisticamente a significância do deslocamento no espaço *Tasseled Cap* de grupos de polígonos com mesma dinâmica sucessional, e analisar a consistência na direção deste deslocamento;
- vi) Avaliar a influência da condição de iluminação na susceptibilidade a erros na classificação dos estágios sucessionais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mata Atlântica

A Mata Atlântica é um dos domínios mais ameaçados dentre as florestas tropicais, considerado um *hotspot*, devido à sua alta biodiversidade (MYERS et al., 2000). Seus remanescentes representam não mais que 12% de seus 150 milhões de hectares originais (MORELLATO; HADDAD, 2000; RIBEIRO et al., 2009), devido, principalmente, ao longo histórico de desmatamento, acontecendo em ciclos desde o século XVI, como a exploração de madeira, o cultivo de cana de açúcar e o ciclo cafeeiro (DEAN, 1995; YOUNG, 2006). A pressão antrópica acontece ainda hoje de forma intensa, fazendo com que este bioma se resuma a fragmentos florestais cada vez mais esparsos (GASCON et al., 2000; RIBEIRO et al., 2009).

O domínio Mata Atlântica é caracterizado pela alta diversidade de espécies de fauna e de flora, sendo composta por diversas fitofisionomias que compõem um mosaico florestal. A fitofisionomia ‘Floresta Ombrófila Densa’ corresponde a florestas perenifólias que se situam em regiões montanhosas com variações fisionômicas (VELOSO; GOES-FILHO, 1982). Esta fitofisionomia ocorre ao longo de toda a costa brasileira, podendo ser dividida em dois blocos fitogeográficos, um formado pela região Nordeste e outro, pela região Sudeste/Sul (TABARELLI; MANTOVANI, 1999). A extensa área de domínio de Floresta Ombrófila Densa na divisa entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, englobando os maciços da Serra da Mantiqueira e Serra do Mar, é cortada por uma faixa de Floresta Estacional Semidecidual e áreas de Savana (IBGE, 2004).

A fitofisionomia ‘Floresta Estacional Semidecidual’ compreende florestas predominantemente caducifólias que podem ser subdivididas em de Terras Baixas, Submontana e Montana de acordo com sua altitude. A Floresta Estacional Semidecidual Submontana são florestas das encostas e planaltos que ocorrem desde a Serra da Mantiqueira até a Serra do Mar (IBGE, 2012).

Nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, a fitofisionomia “Floresta Ombrófila Mista” ocorre em maciços descontínuos como Serras da Paranapiacaba e Bocaina. O pinheiro brasileiro, *Araucaria angustifolia*, representa 40% dos indivíduos arbóreos, sendo a espécie mais abundante, dominante e frequente desta fisionomia (MEDEIROS et al., 2005). Principalmente devido a exploração econômica da madeira do pinheiro, hoje

estima-se que os remanescentes de Floresta Ombrófila Mista não cheguem a 0,7% da sua área original (MMA, 2013), o que a torna uma das fitofisionomias mais ameaçadas no Domínio Mata Atlântica (MEDEIROS et al., 2005). As Áreas de Tensão Ecológica são definidas como encaves de cerrado ou Campos de Altitude, e compreendem a vegetação dos planaltos de cadeias montanhosas marítimas, acima de 2.000 metros (IBGE, 2012).

Mesmo dentro de uma única fitofisionomia existem variações quanto à florística e aos aspectos fisionômicos da vegetação de acordo com o gradiente de altitude, como é o caso da Floresta Estacional Semidecidual. Helmer et al. (2000) delimitam zonas ecológicas como zonas da vegetação que ocorrem concomitantemente com mudanças na altitude. O gradiente altitudinal confere diferentes regimes climáticos e fatores ambientais que a vegetação estará sujeita, influenciando em sua diversidade, riqueza e estrutura (LIEBERMAN et al., 1996). O Domínio Mata Atlântica possui grande variação altimétrica que pode ocorrer subitamente na paisagem, o que define zonas ecológicas distintas em muitas fitofisionomias.

3.2 Florestas Secundárias

Florestas secundárias são resultadas da regeneração de florestas primárias que sofreram algum distúrbio (BROWN; LUGO, 1990). Essa regeneração se dá através do processo de sucessão ecológica, fazendo com que as florestas secundárias possam ser encontradas em diversos estágios regenerativos ou sucessionais. Nos trópicos, as florestas secundárias representam quase metade da área florestal e sua formação acontece em uma taxa de aproximadamente 9 milhões de hectares ao ano (BROWN; LUGO, 1990). É notável assim, o papel fundamental que essas florestas exercem na conservação de ecossistemas impactados, como é o caso do Domínio Mata Atlântica. Ewel (1979) ainda completa que em tempos que grande atenção tem sido voltada para perdas florestais, principalmente nos trópicos, mais estudos sobre florestas secundárias precisam ser considerados, já que a conservação da diversidade biológica no bioma tropical pode depender de como essas florestas são geridas.

A importância dada às formações secundárias varia de acordo com a abordagem em questão. Brown e Lugo (1990) apresentam uma revisão de alguns valores que florestas secundárias podem ter para o uso humano. Além disso, elas também são citadas como importantes reservatórios de diversidade genética de espécies florestais (VIEIRA et al.,

1996), e reguladoras de funções hidrológicas e biogeoquímicas da paisagem (NEPSTAD et al., 2001). Florestas secundárias, se não queimadas ou cortadas para uso agrícola novamente, eventualmente reestabelecem estoques de carbono e de propriedades da ciclagem de nutrientes de florestas maduras (CASTRO et al., 2003; VIEIRA et al., 2003). Apesar da diferença sutil entre os estágios sucessionais, cada um possui características específicas de estrutura e composição, contribuindo em escalas diferentes nas abordagens supracitadas; Lucas et al. (2000) concluem que estágios de regeneração distintos podem ser diretamente associados a diferentes taxas de sequestro de carbono. Muitos estudos dentro dessas diferentes abordagens utilizam a caracterização espectral de florestas secundárias a fim de estimar parâmetros biofísicos (NELSON et al., 2000; STEININGER, 2000; PONZONI; REZENDE, 2004).

As florestas secundárias inseridas no Domínio Mata Atlântica, assim como as florestas primárias, têm seu uso e conservação regulados pela Lei 11.428 (BRASIL, 2006) de Dezembro de 2006, também conhecida como Lei da Mata Atlântica. Para o cumprimento dessa lei, ficam estipuladas restrições específicas ao uso e à conservação da floresta de acordo com seu estágio de regeneração: primário, inicial, intermediário ou avançado. Sendo assim, tanto para estudos científicos envolvendo as florestas secundárias, quanto para o cumprimento da Lei da Mata Atlântica se faz necessária a identificação e a quantificação dos estágios sucessionais de florestas secundárias no Domínio Mata Atlântica.

3.2.1 Estágios Sucessionais

Segundo Ewel (1980), a sucessão ecológica nos trópicos apresenta grande variabilidade causada tanto pelas condições de umidade, quanto pelas mudanças de temperatura associada à altitude. Além disso, a Mata Atlântica se estende da linha do Equador às latitudes abaixo de 45° S (MORELLATO; HADDAD, 2000). Diferentes regiões têm, assim, suas peculiaridades no regime climático, na geologia, nas condições edáficas e na topografia (RODRIGUES et al., 2009), resultando em composições florísticas distintas ao longo das formações desse domínio (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000).

Em cumprimento ao artigo 6º do Decreto nº 750 de 10 de Fevereiro de 1993 (BRASIL, 1993) foi estabelecida a Resolução CONAMA nº 10 de 1 de Outubro de 1993, definindo parâmetros básicos para a análise dos estágios de sucessão secundária na Mata Atlântica

(CONAMA, 1993). Porém, devido à variabilidade encontrada ao longo de todo o bioma, foram elaboradas resoluções específicas a fim de orientar os procedimentos de licenciamento de exploração da vegetação nativa em cada estado da federação.

A Resolução CONAMA nº 1 de 31 de Janeiro de 1994 descreve parâmetros para a identificação dos estágios sucessionais da vegetação nativa no estado de São Paulo (CONAMA, 1994a). Segundo esta resolução, vegetação primária é “aquela vegetação de máxima expressão local, com grande diversidade biológica, sendo os efeitos das ações antrópicas mínimos, a ponto de não afetar significativamente suas características originais de estrutura e de espécie”. Os estágios inicial, intermediário e avançado de regeneração da vegetação secundária são descritos em função da fisionomia, parâmetros dendrométricos, espécies vegetais mais abundantes, entre outros parâmetros (Anexo A - Tabela A.1).

A Resolução CONAMA nº 6 de 4 de Maio de 1994 descreve parâmetros para a identificação dos estágios sucessionais no estado do Rio de Janeiro (CONAMA, 1994b). A vegetação primária tem a mesma descrição disposta para o estado de São Paulo. A descrição dos estágios sucessionais de florestas secundárias seguem o mesmo padrão, porém, incluem a idade média do fragmento, contada a partir do início da regeneração e área basal. Segundo esta resolução, após 10 anos de regeneração o fragmento florestal, antes no estágio sucessional inicial passa a apresentar características de estágio intermediário, e após mais 15 anos, de estágio avançado (Anexo A - Tabela A.1).

A descrição dos estágios sucessionais apresentada nestas resoluções é bastante genérica, cabendo ao técnico em campo decidir sobre diversos aspectos na identificação dos estágios (SIMINSKI et al., 2004). Além disso, existe notável diferença entre as duas resoluções em diversos parâmetros, como, por exemplo, a altura média e a lista de espécies lenhosas comuns. A diferença é esperada dada a localização, a dimensão, e o histórico ao longo de uma grande área, porém não é o limite político entre os dois estados que definem ou explicam essas diferenças. A transição sutil entre os estágios sucessionais, principalmente nos estágios mais avançados (FOODY et al., 1996) e a grande variabilidade encontrada entre eles ao longo de toda a Mata Atlântica justifica a subjetividade na descrição do CONAMA, e também no consenso da comunidade científica sobre a identificação deles.

3.2.2 Identificação e caracterização espectral de estágios sucessionais

Análise de imagens de satélite tem sido adotada para mapear desflorestamentos e identificar estágios de regeneração por diversos pesquisadores há mais de 20 anos (MAUSEL et al., 1993; MORAN et al., 1994; BRONDIZIO et al., 1996; STEININGER, 1996). Segundo Castro et al. (2003), imagens orbitais representam ferramenta prática para a identificação e a caracterização de florestas secundárias. Através da análise de seus dados podem ser extraídas informações sobre a presença e o processo de regeneração dessas florestas. Neste contexto, o sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat 5 tem uma grande importância, devido, principalmente, à longa janela temporal de disponibilidade de seus dados (CASTRO et al., 2003).

Diferentes abordagens podem ser consideradas na identificação de estágios sucessionais. Em estudos utilizando dados orbitais, em geral, são adotadas as abordagens de cronosequência, isto é, estabelecimento de faixas etárias correspondente a cada estágio sucessional, ou acompanhamento de parcelas permanentes ao longo de um tempo (JOHNSON; MIYANISHI, 2008). A caracterização dos estágios sucessionais pode ser feita, então, relacionando a idade da floresta ou a observação na mudança estrutural ao longo do processo de regeneração com parâmetros ecológicos, como composição, riqueza e abundância de espécies (BRONDIZIO et al., 1996); biofísicos, como biomassa e variáveis dendrométricas (NELSON et al., 2000); espectrais (GALVÃO et al., 2015); ou a combinação destas.

Apesar de a cronosequência ser um dos métodos mais utilizados, é também alvo de muitas críticas (VIEIRA et al., 2003; JOHNSON; MIYANISHI, 2008). O acompanhamento de parcelas permanentes ao longo de um intervalo de tempo é considerado o método ideal, porém requer recursos humanos e financeiros significativos (QUESADA et al., 2009); sendo o uso de sensoriamento remoto para esse monitoramento temporal alternativa interessante.

A natureza e os aspectos morfológicos de um objeto podem ser caracterizados espectralmente de diferentes maneiras. Mausel et al. (1993) identificaram as características espectrais de estágios sucessionais na Amazônia relacionando dados de campo e dados do sensor TM/Landsat 5. De acordo com os autores, o estágio inicial de regeneração apresenta reflectância relativamente mais alta nas bandas TM2 (0,50 – 0,60

μm) e TM3 (0,63 – 0,69 μm), e nas feições de absorção de água das bandas TM5 (1,55 – 1,75 μm) e TM7 (2,08 – 0,35 μm) deste sensor, comparado aos estágios intermediário e avançado. Valores da razão entre as faixas espectrais TM2 e TM3 são maiores para regiões ocupadas por fragmentos florestais no estágio intermediário, e valores de reflectância da faixa TM4 (0,76 – 0,90 μm) mais alta comparados ao estágio inicial; esse padrão reflete as características estruturais do estágio intermediário que apresenta grandes árvores jovens, maior biomassa e maior umidade no dossel que o estágio inicial. O estágio avançado apresenta menores valores de reflectância em todas as bandas, o que pode ser explicado pelo incremento de camadas no dossel (estratos horizontais), aumento do conteúdo hídrico (maior quantidade de folhas) e principalmente aumento da interferência das sombras na reflectância.

Além de Mausel et al. (1993), Moran et al. (1994) também concluíram que dados do sensor TM/Landsat 5 podem ser usados na identificação de três estágios sucessionais e de suas taxas de mudança ao longo do tempo. Foody et al. (1996) também testaram a habilidade de dados TM/Landsat 5 em identificar classes de regeneração florestal. Nesse estudo, classes de idade das florestas foram determinadas a partir de uma série temporal de imagens e suas separabilidades foram avaliadas por classificadores de máxima verossimilhança. A maior parte do erro encontrado na classificação correspondeu à classe florestal mais jovem. Ponzoni e Rezende (2004) avaliam o potencial e as limitações do uso de dados TM/Landsat 5 na caracterização espectral de vegetação secundária estabelecendo correlações com parâmetros biofísicos; a caracterização dos estágios foi feita através de curvas espectrais. Galvão et al. (2015) utilizam imagens deste mesmo sensor para acompanhar continuamente a sucessão secundária. Os autores utilizaram transformação *Tasseled Cap*, análise por principais componentes (PCA), e modelo linear de mistura espectral para caracterizar variações na reflectância dos fragmentos florestais ao longo do processo sucessional.

Lucas et al. (2000) utilizaram dados do sensor AVHRR/ NOAA para mapear classes de regeneração de floresta tropical. Foi utilizado um classificador não supervisionado baseado na relação entre dados AVHRR/NOAA e na idade florestal. Os autores utilizaram quatro classes: menor que 5 anos (SS1), de 5 a 9 anos (SS2), de 9 a 20 (SS3), e maior que 20 anos (SS4). Galvão et al. (2009) e Millán et al. (2014) testaram o potencial de dados hiperespectrais e multiangulares CHRIS/PROBA na discriminação de estágios sucessionais. Galvão et al. (2009) concluíram que a análise multiangular aprimorou a

discriminação entre estágios sucessionais, especialmente entre floresta primária e estágios mais avançados de regeneração. Arroyo-Mora et al. (2005) integraram dados de estrutura florestal obtidos em campo e dados orbitais para caracterizar espectralmente quatro estágios sucessionais. A separabilidade espectral entre as classes foi avaliada por gráficos de dispersão entre pares de bandas (ETM+4 (0,76 – 0,90 μm): ETM+3 (0,63 – 0,69 μm), ETM+5 (1,55 – 1,75 μm): ETM+4 e ETM+7 (2,08 – 2,35 μm): ETM+5). Vieira et al. (2003) identificam estágios sucessionais por idade (3-6 anos, jovem; 10-20, intermediário; 40-70, avançado) e os caracterizam através de parâmetros biofísicos e espectrais. Vieira et al. (2003) e Arroyo-Mora et al. (2005) utilizaram dados do sensor ETM+/Landsat 7 e correlacionaram os estágios sucessionais com índices de vegetação.

Evidências mostram que após 19 anos de regeneração, florestas secundárias parecem ser indistinguíveis espectralmente de florestas primárias (MORAN et al., 1994; STEININGER, 1996). Essa estimativa foi feita na Amazônia, e para outras regiões tropicais esse limite pode variar (NELSON et al., 2000). Helmer et al. (2000) ressaltam a existência de variação no comportamento espectral em decorrência das composições florística ou fenotípica considerando diferentes zonas ecológicas, além da variação no ângulo de iluminação, como fatores que podem permitir a diferenciação de estágios, mesmo em fragmentos florestais com mais de 19 anos.

A maior parte dos estudos em regiões tropicais de identificação e de caracterização de florestas secundárias utilizando imagens de satélite foi realizada em baixas elevações com pouca variação topográfica (HELMER et al., 2000; CASTRO et al., 2003). No Brasil, a maioria dos trabalhos foi feita na Amazônia (MAUSEL et al., 1993; FOODY et al., 1996; LUCAS et al., 2000; NELSON et al., 2000; PONZONI; REZENDE, 2004; NEEFF et al., 2006; GALVÃO et al., 2009; CHAMBERS et al., 2013; DA SILVA et al., 2014; GALVÃO et al., 2015). A Mata Atlântica acumulou poucos trabalhos ao longo dos anos com essa abordagem, principalmente devido a sua condição topográfica. A topografia é um fator complicador em estudos florestais que utilizam dados orbitais, pois pode causar erros de classificação, devido à variação de luminosidade entre superfícies planas e inclinadas contidas em uma mesma classe (FAHSI et al., 2000). Portanto, é preciso prestar a devida atenção na adoção de metodologias que considerem este fator. Helmer et al. (2000), utilizando imagens TM, estratificaram classes de uso do solo por iluminação topográfica. A estratificação foi feita visualmente em categorias sombreado/iluminado. Esse estudo representa um dos poucos que incorporam o efeito topográfico em um sistema

de classificação incluindo diversas classes de regeneração, e ressalta a importância de se considerar a topografia em estudos de ambientes com relevo acidentado. Helmer et al. (2000) atentam não só para o efeito de luminosidade imposto pela topografia, mas também para o impacto que a topografia confere ao mapear estágios sucessionais em regiões tropicais montanhosas que são complexas, pois se estendem ao longo de diversas zonas ecológicas.

Apesar de diversos autores enfatizarem a importância de dados auxiliares de campo em estudos que utilizam técnicas de sensoriamento remoto (MAUSEL et al., 1993; ARROYO-MORA et al., 2005; ANDERSON, 2012; CHAMBERS et al., 2013), Castro et al. (2003) ressaltam que a coleta desses dados na extensão apropriada não é prática em diversos ambientes tropicais, devido a difícil acesso, registros históricos defasados de uso da terra, e restrições de tempo e de financiamento.

3.3 Iluminação local

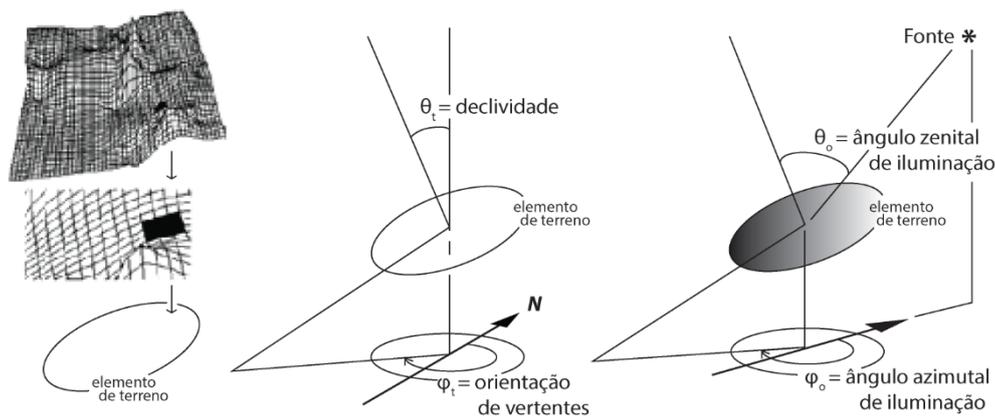
No que se refere ao processo de interação da radiação eletromagnética com a cobertura vegetal, o fluxo da radiação refletida apresenta comportamento anisotrópico, o que faz com que dados radiométricos orbitais sejam influenciados pela geometria de iluminação/observação (GALVÃO et al., 2009). Essa geometria, fonte-alvo-sensor, é chamada por Ponzoni et al. (2014) de geometria de aquisição dos dados. A influência da geometria de aquisição dos dados sobre a reflectância de superfície de uma cobertura vegetal já foi intensamente estudada (PONZONI et al., 2010; BREUNIG et al., 2011; SIMS et al., 2011). Estudos anteriores mostram grande dependência da reflectância de dosséis vegetais com o ângulo de incidência (ou de iluminação) e os comprimentos de onda (BREECE; HOLMES, 1971). Combal e Isaka (2002) avaliaram a influência da topografia no fator de reflectância bidirecional (FRB) de dosséis. Sabendo que o FRB apresenta dependência não linear com a declividade e a orientação das vertentes, mesmo em terrenos pouco acidentados, o estudo mostrou que com o Sol a um ângulo zenital de 60°, a reflectância de dosséis pode variar se forem considerados terrenos planos e terrenos com 10% de declividade ou menos, sugerindo grande influência da topografia na caracterização espectral de alvos.

Quando considerando uma área com topografia acidentada, não só a geometria de aquisição de dados influenciará a reflectância de superfície de uma cobertura vegetal.

Neste caso, o efeito adicional conferido pela topografia é definido como ‘iluminação local’ (PONZONI et al., 2014). A iluminação local é a intensidade de radiação eletromagnética refletida por cada pixel, definida pela geometria de aquisição dos dados para cada pixel levando-se em consideração sua condição topográfica.

Ponzoni et al. (2014) propõem um fatiamento em classes de iluminação a fim de compartimentar o terreno em unidades homogêneas em relação a condição média de iluminação. Tal fatiamento incorpora variações no regime de radiação solar como condicionante à diferenciação de compartimentos. Para isto, é necessária uma abordagem que considere os vetores da iluminação e da normal à superfície no espaço tridimensional (VALERIANO, 2011). A Figura 3.1 exemplifica um elemento de terreno sob uma certa condição topográfica e os ângulos e vetores necessários para a classificação do elemento em classes de iluminação local¹.

Figura 3.1 - Geometria de iluminação e sombreamento de um elemento de terreno.



Fonte: Adaptado de Valeriano (2011).

O elemento de terreno representa um pixel, ou um conjunto deles. Neste caso, o elemento de terreno possui além da posição geográfica, uma posição topográfica. Na Figura 3.1, a fonte está representada pelo símbolo (*). A distribuição da iluminação dada pela topografia é descrita pelo cosseno do ângulo zenital de iluminação (θ_o), chamado de cosseno do ângulo de incidência ($\cos i$) (SLATER, 1980). Os parâmetros necessários para o cálculo do $\cos i$ podem ser divididos quanto sua relação à localização topográfica, ou geográfica do elemento de terreno. Os parâmetros relacionados à localização topográfica são declividade e orientação. A declividade (θ_t) é calculada em porcentagem e definida

¹ A partir desta seção, o termo iluminação refere-se à variável Iluminação Local.

como o ângulo zenital da normal à superfície. A orientação de vertentes (φ_t), também denominada aspecto, é definida com o ângulo azimutal da normal à superfície, considerando o Norte geográfico. Os parâmetros relacionados à localização geográfica são influenciados pela geometria fonte-alvo, sendo eles os ângulos solares azimutal (φ_s) e zenital (θ_s) na hora da aquisição da imagem. Na Figura 3.1 estão representados os ângulos azimutal e zenital de iluminação. O ângulo azimutal de iluminação (φ_o) é a diferença entre φ_s e φ_t . A partir destes parâmetros, $\cos i$ pode ser calculado e compartimentado em função da intensidade de radiação eletromagnética que chega ao elemento de terreno.

3.4 Transformação *Tasseled Cap* (TC)

A aplicação de dados orbitais multiespectrais em estudos da vegetação pode ser facilitada por transformações de dados. Essas transformações reduzem o número de atributos espectrais a serem considerados, fornecem associação mais direta entre sinal e processos físicos em nível do solo, e destaca os tipos de informação que mais interessam (CRIST et al., 1986). Uma transformação muito utilizada em estudos de vegetação é a *Tasseled Cap* (TC).

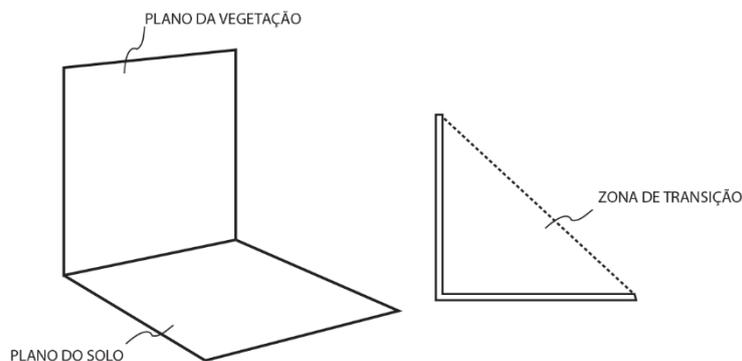
Tasseled Cap é uma ferramenta eficiente de compressão de dados espectrais em poucas feições, sendo essas associadas com características físicas da cena (CRIST; CICONE, 1984). A transformação TC de dados TM fornece combinações lineares das bandas espectrais originais do sensor. Essas combinações respondem principalmente a características físicas de classes específicas da cena, como vegetação e solo, e capturam 95% ou mais do total de variação dos dados (CRIST et al., 1986).

Essa transformação foi primeiramente descrita para dados do sensor *Multispectral Scanner* (MSS), presente nas primeiras gerações de satélites Landsat (KAUTH; THOMAS, 1976), com posterior adaptação para seu uso em dados do sensor TM/Landsat 5 (CRIST; CICONE, 1984) e ETM+/Landsat 7 (HUANG et al., 2002). Crist e Kauth (1986) explicam que essa metodologia é sensor-específica, por definir *a priori* como os dados provindos do sensor são estruturados. Essas estruturas são características de cada sensor e a aplicação da transformação em dados de novos sensores requer reavaliação dos coeficientes de transformação, começando na identificação do tipo de estruturação de dados que o sensor fornece. Essa reavaliação dos coeficientes não é

necessária quando são utilizados diferentes conjuntos de dados, porém oriundos de um mesmo sensor, como por exemplo uma análise multitemporal de imagens TM. Apesar desta reavaliação não ser necessária, cuidados com a calibração do sensor, correção atmosférica e de geometria de iluminação precisam ser considerados em uma abordagem multitemporal (CRIST; KAUTH, 1986).

Essas estruturas de dados mencionadas são explicadas por Crist e Kauth (1986). Segundo os autores, os sinais registrados por um sensor podem ser projetados em um espaço multidimensional, onde cada banda do sensor corresponde a uma dimensão. Para um sensor com três bandas, por exemplo, tem-se um espaço cúbico. Classes específicas contidas na cena compartilham entre si propriedades físicas fundamentais, produzindo padrões de reflectância espectral previsíveis. Sabendo disto, todas as combinações possíveis de valores de sinais não possuem probabilidades iguais de ocorrência no cubo (exemplo de um sensor com três bandas). Em vez disso, os dados tenderiam a agrupamentos em certas porções do cubo, o que caracteriza as estruturas dos dados. A Figura 3.2 mostra a estrutura básica de dados TM, os quais se acumulam majoritariamente em um espaço delimitado por dois planos. Mais informações sobre esses planos serão fornecidas mais adiante.

Figura 3.2 - Estrutura básica dos dados TM.

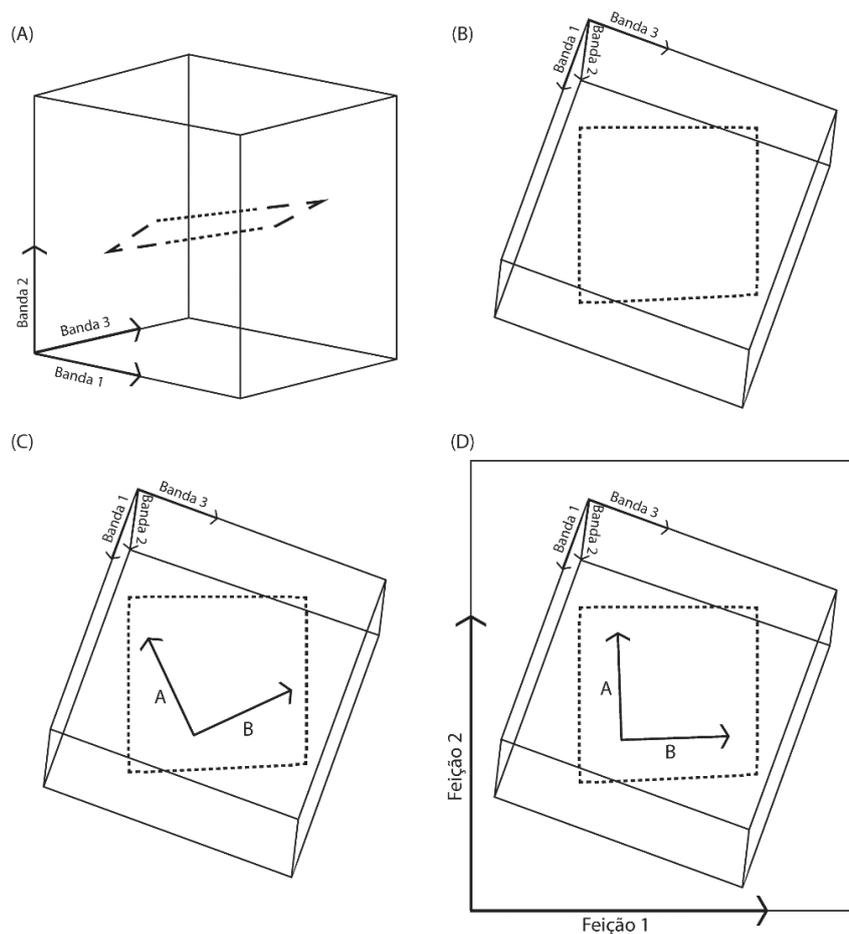


Fonte: Adaptado de Crist et al. (1986).

A transformação TC consiste em uma mudança na perspectiva de observação dos dados (CRIST; KAUTH, 1986). Como mencionado anteriormente, as estruturas dos dados de um sensor específico são diretamente relacionadas às características físicas de classes presentes na cena. Se o objetivo é inferir sobre tais características, a observação dessas estruturas de uma maneira mais direta aumenta a capacidade de extração de informações relevantes de cada classe. Essa mudança, na perspectiva de observação, correspondente a

uma rotação de eixos, permite que cada estrutura de dados possa ser vista inteira e separadamente de outras estruturas, preservando informação e relação geométricas entre elas (CRIST; KAUTH, 1986). A Figura 3.3 mostra um exemplo das etapas da transformação TC aplicada aos dados de um sensor de três bandas.

Figura 3.3 - Dados de um sensor hipotético de três bandas. (A) O cubo representa o espaço multidimensional dos dados. O retângulo representa uma estrutura de dados dentro do cubo. (B) Mudança na perspectiva de observação para que a estrutura retângula dos dados seja vista diretamente. (C) Direção da variação espectral associada com dois processos físicos distintos em classes presentes na cena. (D) Ajustamento adicional na perspectiva de observação para alinhar as direções relacionadas a processos físicos com os novos eixos de coordenadas.



Fonte: Adaptado de Crist e Kauth (1986).

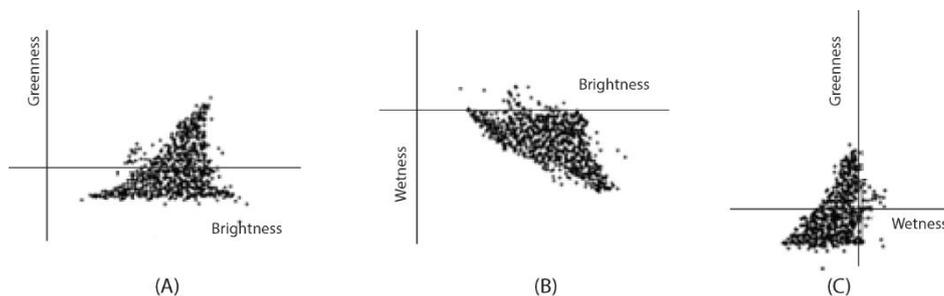
No exemplo, os dados se concentram em uma estrutura plana (retângulo dentro do cubo, Figura 3.3 (A)). A Figura 3.3 (B) mostra a mudança na perspectiva de observação, isto é, rotação do espaço multidimensional dos dados. Essa rotação faz com que a maior parte da variação dos dados possa ser vista no plano. As letras A e B representam classes específicas da cena, e suas variações tendem, principalmente, a acontecer nas direções

apontadas na Figura 3.3 (C). Uma segunda rotação acontece para que as direções de variação inerentes às classes em questão alinhem-se vertical e horizontalmente com os novos eixos x e y (Figura 3.3 (D)). Esses novos eixos definem feições, que por sua vez são combinações das três bandas originais do sensor. Essas feições possuem maior correspondência às variações observadas em classes da cena, e podem, assim, ser interpretadas de forma mais prática e inequívoca quanto às características físicas dessas classes (CRIST; KAUTH, 1986).

Considerando a transformação TC aplicada a dados TM/Landsat 5, são definidas três feições, *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* (CRIST; CICONE, 1984). *Brightness* representa a primeira feição e corresponde a soma ponderada das seis bandas refletivas do sensor TM. Essa feição é sensível a mudanças no total de reflectância da cena e aos processos físicos que a afeta. É altamente influenciada por diferenças nas características do solo. *Greenness* representa a segunda feição e corresponde a contrastes entre a soma das bandas do visível e as do IVP. Essa feição responde à combinação de alta absorção da radiação nas bandas do visível e alta reflectância no IVP, o que é característico de vegetação verde, devido a pigmentos como a clorofila, e de sua estrutura interna foliar, respectivamente. *Wetness* corresponde ao contraste da soma das bandas do visível e do IVP com a soma das bandas do IVM. As bandas TM correspondentes ao infravermelho médio são sensíveis à umidade do solo (STONER; BAUMGARDNER, 1980) e da vegetação (TUCKER, 1980). Sendo assim, alterações nesse contraste destacariam características da cena relacionadas à umidade (CRIST; CICONE, 1984).

Crist e Cicone (1984) ainda definem o que seriam os “pontos de vista fundamentais”. Esses pontos seriam aqueles que apresentam as estruturas de dados de maneira mais direta. Para dados TM/Landsat 5 referentes às cenas contendo o alvo vegetação, transformados para coordenadas TC, é possível observar três pontos de vista fundamentais; Plano da Vegetação, definido pelas feições *Brightness* e *Greenness*; Plano dos Solos, definido pelas feições *Brightness* e *Wetness*; e a Zona de Transição, isto é, as bordas dos outros dois planos. A Figura 3.4 ilustra os três pontos de vista fundamentais de dados TM/Landsat 5 transformados. O conteúdo de um conjunto de dados vai determinar que porção de cada plano será ocupada (CRIST; KAUTH, 1986). Assim, a posição na qual os dados se localizam em cada plano pode ser diretamente relacionada às características dos alvos em questão.

Figura 3.4 - Dados TM transformados em coordenadas *Tasseled Cap*. (A) Ponto de vista do Plano da Vegetação. (B) Ponto de vista do Plano do Solo. (C) Ponto de vista da Zona de Transição.



Fonte: Adaptado de Crist e Cicone (1984).

A transformação TC tem sido utilizada em estudos de vegetação, tendo em destaque sua potencial aplicação em revelar atributos florestais chaves, incluindo idade e estrutura (COHEN et al., 1995; HUANG et al., 2002). Crist et al. (1986) ressaltam a disponibilidade de informações, como tipo de vegetação, estágio de desenvolvimento, e tipo e status hídrico do solo, que essa transformação pode fornecer. Fiorella e Ripple (1993) apontam as três feições TC como importantes instrumentos na distinção entre florestas primárias e florestas em estágio avançado de regeneração, porém enfatizam a maior significância da feição *Wetness* em frente às duas outras feições. Horler e Ahern (1986) e Cohen et al. (1995) sugerem que a feição TC *Wetness* é particularmente sensível a densidade de vegetação, especialmente nos estágios iniciais de regeneração. Cohen et al. (1995) utilizaram a feição *Wetness* para distinguir classes de idade de parcelas, isto é, floresta jovem, madura, e em estágio avançado de regeneração. Song et al. (2002) caracterizam a manifestação temporal/espectral de sucessão florestal em dados orbitais simulados e em dados TM através de feições TC. Os autores concluem que a trajetória sucessional não acontece linearmente no espaço espectral, e além do aspecto curvilíneo, essa trajetória é fortemente influenciada pelas condições iniciais de background/sub-bosque e topografia. Healey et al. (2005) utilizaram a transformação TC para destacar mudanças na vegetação relevantes a mapeamentos de distúrbios florestais. Os autores ressaltam o uso recorrente desta técnica. No estudo, quatro variantes da transformação TC foram testadas quanto às suas habilidades na identificação de regeneração florestal em parcelas que sofreram distúrbios. Todas as variantes testadas produziram classificações mais acuradas do que comparadas ao uso dos dados originais Landsat. Os autores ainda ressaltam que ambos, taxa de regeneração local e intervalo de

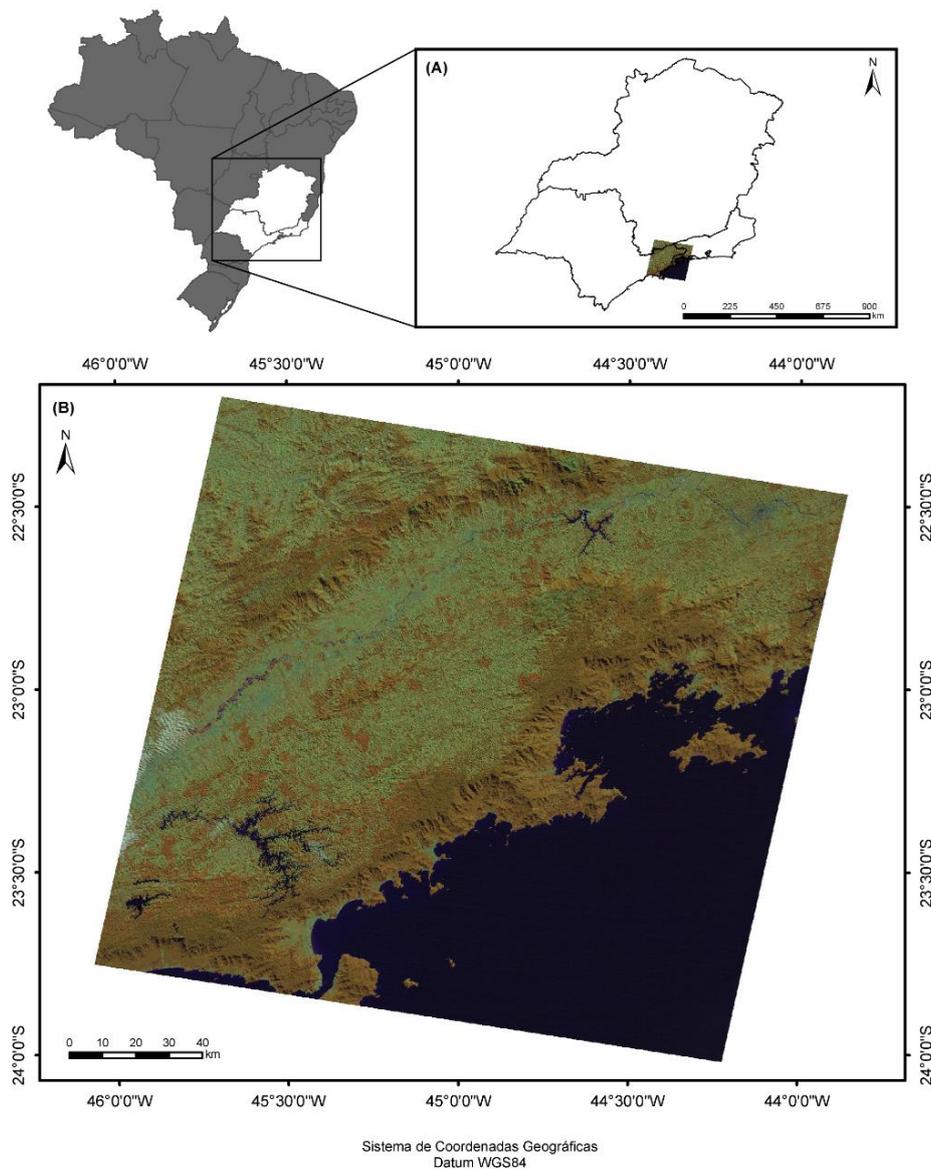
reamostragem, deveriam ser considerados na escolha da transformação utilizada para detecção de regeneração florestal. Galvão et al. (2015) utilizaram a transformação TC em dados TM para reduzir cada conjunto de dados nas três feições ortogonais *Brightness*, *Greenness* e *Wetness*. *Brightness* e *Greenness* foram plotados ao longo do tempo a fim de avaliar suas variações ao longo do processo sucessional.

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

4.1 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na divisa entre os estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo, e corresponde a área delimitada pela cena TM/Landsat 5, órbita 218 e ponto 76, centralizada na coordenada $23^{\circ}06'59''$ S e $44^{\circ}58'49''$ O (Figura 4.1).

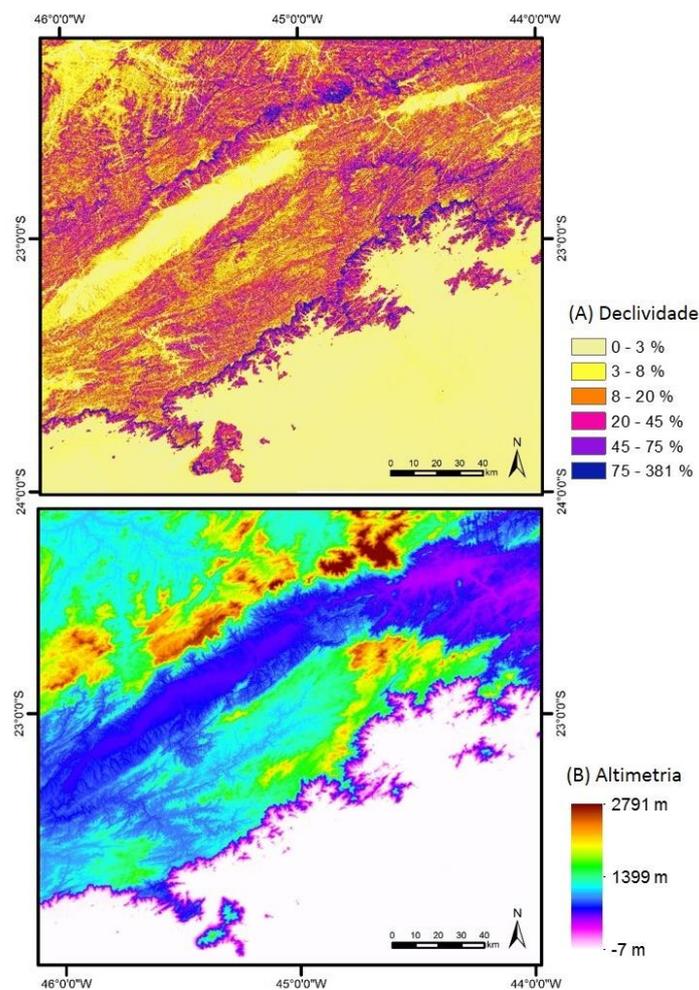
Figura 4.1 - Área de Estudo. (A) Limites dos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo, e localização da cena TM/Landsat 5 em composição R(4)G(5)B(3). (B) Cena TM/Landsat 5, órbita 218, ponto 76, e em composição R(4)G(5)B(3). Data de aquisição da cena 05/11/2011.



A paisagem na área de estudo apresenta alta fragmentação de remanescentes florestais devido principalmente à proximidade de grandes centros urbanos como o da cidade de

São Paulo, e a alta exploração imobiliária no litoral dessa região como um todo. Entretanto, trata-se de uma área de predominância de Florestas Ombrófilas Densas, com sub-regiões ainda bem conservadas como as dos Corredores das Serras da Mantiqueira e da Serra do Mar. O Corredor da Serra do Mar é uma das áreas mais ricas em biodiversidade da Mata Atlântica (AGUIAR et al., 2003). Segundo De Almeida e Carneiro (1998), o sistema de montanhas das Serras da Mantiqueira e do Mar constitui a mais destacada feição orográfica da borda atlântica da América do Sul. A presença dessa feição pode ser observada na variação da altimetria e declividade que compõe a cena (Figura 4.2).

Figura 4.2 - Mapa de declividade (A), classificado segundo os limites descritos pela Embrapa (1999) e altimetria (B) da área de estudo. Os dados altimétricos foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM, e a declividade foi calculada a partir dos dados altimétricos no aplicativo R.

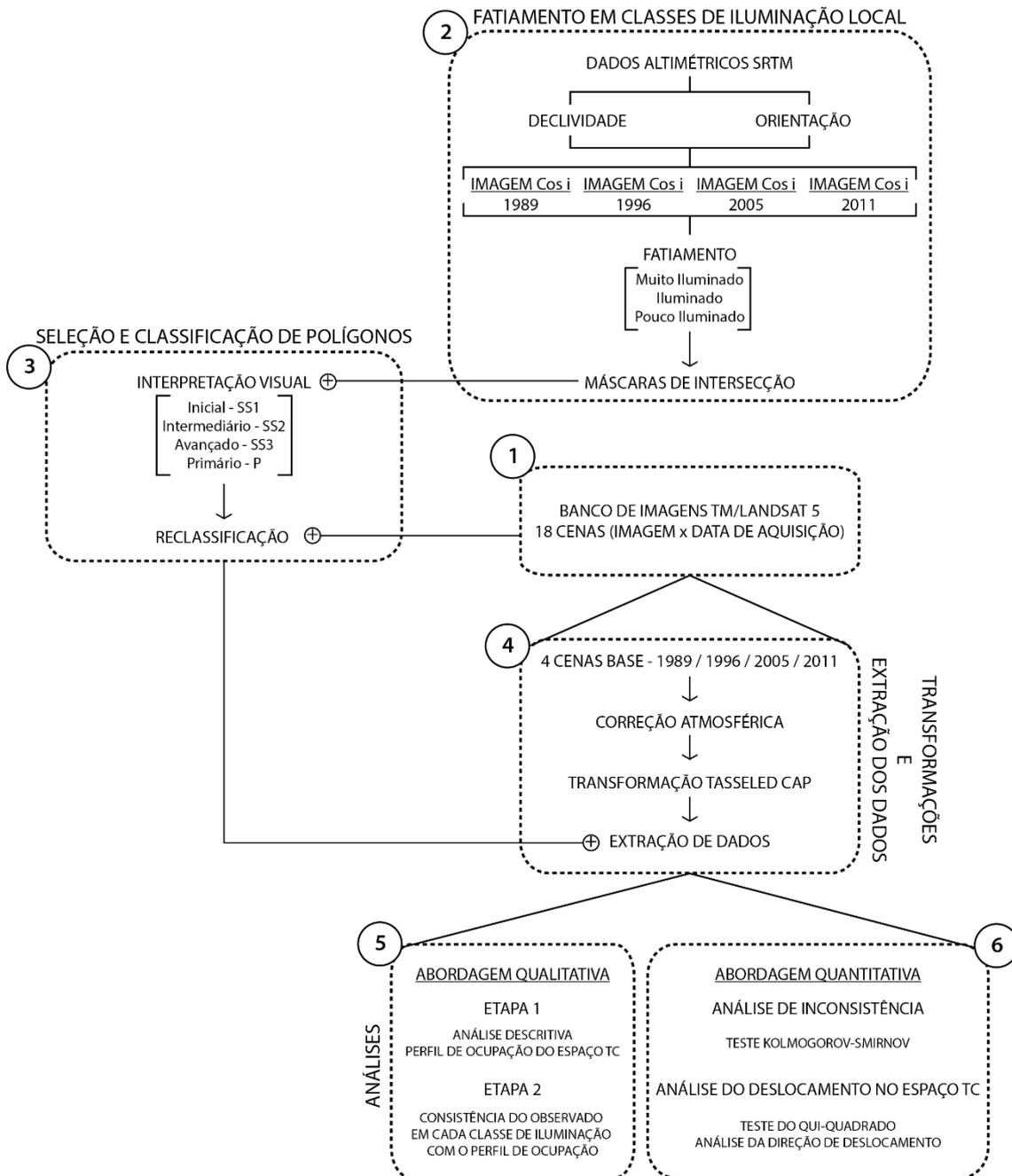


A porção de Floresta Ombrófila Densa inserida na cena TM inclui alta variação altimétrica e de declive. Praticamente todas as classes de declividade propostas pela Embrapa (1999) inserem-se na área de estudo (Figura 4.2 (A)), e a faixa altimétrica chega à 2.791 metros (Figura 4.2 (B)). A paisagem contém escarpas e vales que formam o relevo acidentado característico da Mata Atlântica. Devido a essa heterogeneidade em sua paisagem, a área de estudo apresenta diferentes zonas ecológicas, sendo possível separar Floresta Ombrófila Densa em Baixo-montana, Montana e Alti-montana (IBGE, 2012) de acordo com o estrato altimétrico em que se encontram. Essas zonas, também chamadas de orobiomas, são resultado de variações no regime climático (COUTINHO, 2006).

4.2 Etapas do trabalho

O trabalho contemplou as etapas mostradas no diagrama seguir (Figura 4.3). A metodologia do trabalho pode ser dividida em seis grandes etapas. A primeira consiste na composição do banco de imagens e a escolha das quatro cenas bases, as quais serão usadas para a extração de dados. A segunda etapa trata-se do fatiamento em classes de iluminação local, que resultará em máscaras de intersecção a serem utilizadas como guia para a seleção de polígonos, que acontece na terceira etapa. A quarta etapa engloba o pré-processamento das cenas base e a transformação *Tasseled Cap*, bem como a extração dos dados. Finalizando, as etapas 5 e 6 consistem nas etapas analíticas qualitativa e quantitativa, respectivamente.

Figura 4.3 – Diagrama da metodologia adotada.



4.3 Especificação dos dados

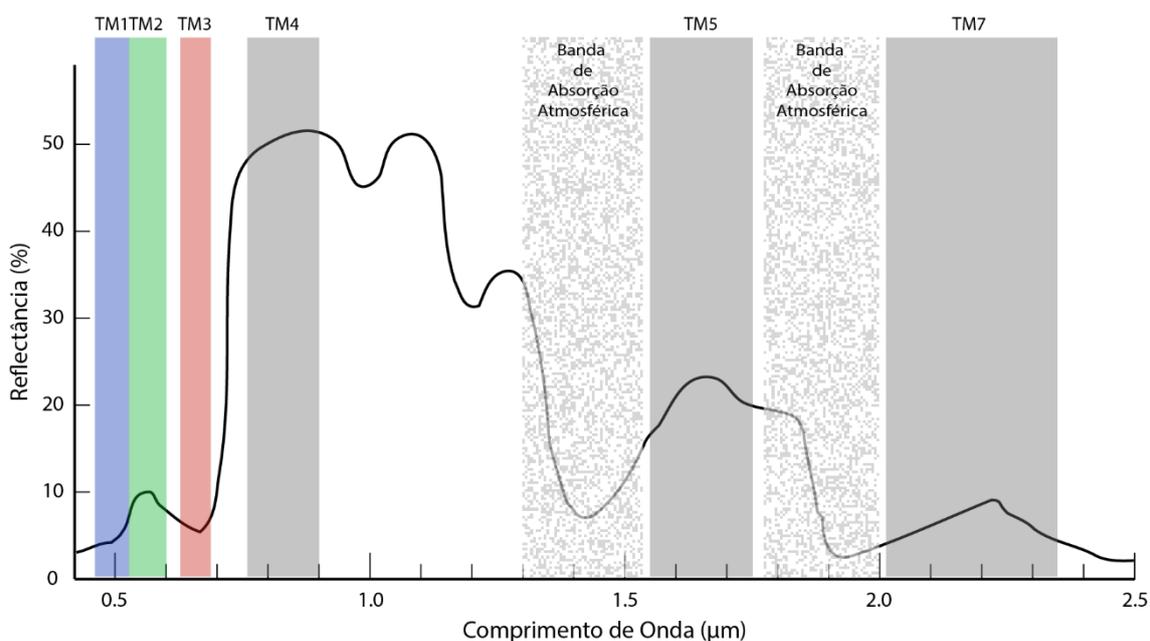
O satélite Landsat 5 possui órbita quase-polar, síncrona com o Sol. Sua configuração de órbita cria um ciclo de repetição de 16 dias. O sensor TM possui seis bandas no espectro óptico; azul, verde, vermelho, infravermelho próximo (IVP), e infravermelho médio (IVM), que correspondem às bandas espectrais TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7, respectivamente (Tabela 4.1). As bandas TM do espectro óptico, as quais serão utilizadas neste trabalho, possuem resolução espacial de 30 metros, e radiométrica de 8 bits. A

Figura 4.4 ilustra um espectro da reflectância típico de vegetação verde sadia, bem como as faixas espectrais contidas no sensor TM.

Tabela 4.1 – Especificação do comprimento de onda e resolução espacial das bandas espectrais do sensor TM.

Bandas Espectrais	Comprimento de Onda (μm)	Resolução Espacial (m)
TM1 (Azul)	0,45 – 0,52	30
TM2 (Verde)	0,50 – 0,60	30
TM3 (Vermelho)	0,63 – 0,69	30
TM4 (Infravermelho próximo)	0,76 – 0,90	30
TM5 (Infravermelho médio)	1,55 – 1,75	30
TM6 (Infravermelho termal)	10,4 – 12,5	120
TM7 (Infravermelho médio)	2,08 – 2,35	30

Figura 4.4 - Faixas espectrais correspondentes às bandas do sensor TM, indicadas sobre um espectro da reflectância típico de vegetação verde sadia.



Fonte: Adaptado de Ponzoni et al. (2012).

Foi composto um banco de imagens do sensor (TM) de dezoito datas distintas, totalizando dezoito cenas que compreendem um intervalo temporal de 25 anos. Cada cena é composta por seis imagens, correspondendo às bandas espectrais TM1 a TM5 e a banda TM7. Segundo as resoluções CONAMA, um intervalo de 25 anos permite diferenciação entre estágios sucessionais, devido à variação estrutural da vegetação. Além disso, as cenas foram escolhidas em uma janela de no máximo quatro meses de diferença, a fim de

minimizar a variação da elevação solar entre elas. A escolha considerou concomitantemente a qualidade das imagens e a baixa cobertura de nuvens (Tabela 4.2). As imagens foram obtidas no catálogo da *U.S. Geological Survey* (USGS) através do *website* < <http://earthexplorer.usgs.gov/>>.

As cenas foram adquiridas em Nível 1T de processamento estabelecido pelo USGS. O Nível 1T de correção fornece imagens com precisões radiométrica e geométrica, incorporando pontos de controle no terreno e utilizando um modelo digital de elevação (MDE) para acurácia topográfica. Essas imagens já são, portanto, entregues aos usuários georreferenciadas.

Tabela 4.2 – Cenas utilizadas no trabalho e suas respectivas posições solares. Destacadas em cinza as cenas utilizadas para extração de dados.

	Aquisição	Hora GMT	Elevação Sol	Azimute Sol	Cobertura de nuvens
Cena 1	14/07/1986	12:20:57	29,8667	44,9092	0
Cena 2	03/07/1988	12:28:50	30,4533	42,1001	0
Cena 3	24/09/1989	12:23:54	47,5911	63,1745	0
Cena 4	30/07/1992	12:20:59	32,0961	47,7632	3
Cena 5	20/07/1994	12:16:10	29,7271	46,7390	0
Cena 6	26/08/1996	12:14:48	37,3161	55,4128	0
Cena 7	26/06/1997	12:28:00	30,2349	41,6226	0
Cena 8	04/09/1999	12:35:14	43,5628	53,4891	2
Cena 9	21/08/2000	12:35:53	39,7585	49,7117	21
Cena 10	09/09/2001	12:38:20	45,8278	54,5584	0
Cena 11	14/08/2003	12:35:08	37,5960	47,9586	2
Cena 12	29/06/2004	12:40:03	32,0356	39,4653	8
Cena 13	03/08/2005	12:46:07	36,9685	43,2868	0
Cena 14	21/07/2006	12:51:17	35,4057	39,7241	0
Cena 15	08/07/2007	12:51:53	34,1063	37,6980	0
Cena 16	30/08/2009	12:47:43	44,4352	49,2870	6
Cena 17	02/09/2010	12:48:26	45,4335	49,8646	0
Cena 18	05/09/2011	12:46:35	46,0116	51,0822	0

Essas cenas foram consultadas para as etapas de identificação dos estágios sucessionais e acompanhamento da dinâmica sucessional. A identificação visual dos estágios sucessionais foi embasada no histórico de cada um e para o acompanhamento deste histórico, os polígonos selecionados foram revisitados em todas as dezoito cenas. A cena de 1989 foi usada como base para a seleção dos polígonos, e partir desta seleção, estes mesmos polígonos foram revisitados nas outras cenas. As seções seguintes apresentarão descrição mais detalhada sobre este procedimento. As cenas de 1986 e 1988 foram

consultadas somente para verificar se os polígonos selecionados não compreendiam áreas de agricultura ou floresta plantada. Apesar de todas terem sido consultadas, quatro cenas foram escolhidas para a extração de dados (em destaque na Tabela 4.2), correspondendo àquilo que será denominado a seguir como ‘cenas base’. Essas quatro cenas base foram selecionadas procurando não ultrapassar dois meses de distanciamento temporal no ano entre elas, também considerando a qualidade visual das imagens, cobertura de nuvens, e o intervalo de tempo entre elas. Esse intervalo é importante, pois as cenas base precisam ser defasadas no tempo o suficiente para que mudanças na estrutura de dossel possam ser detectadas pelo sensor, assim foi selecionada a cena mais recente e três outras em intervalos de tempo não menores que cinco anos.

Além das cenas TM/Landsat 5 foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de aproximadamente 30 metros da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), também obtido no *website* < <http://earthexplorer.usgs.gov/>>. A missão SRTM utilizou processamento interferométrico de dados obtidos por um radar de abertura sintética na banda C. O MDE foi transformado em imagens declividade e orientação, variáveis geomorfológicas necessárias para o cálculo do cosseno do ângulo de incidência, usado no fatiamento em classes de iluminação local.

4.4 Fatiamento em classes de iluminação local

A abordagem adotada para minimizar o efeito da topografia na caracterização espectral dos estágios sucessionais consiste em um fatiamento das cenas base em classes de iluminação, permitindo que diferentes condições de iluminação sejam tratadas individualmente. A distribuição da iluminação descrita pelo cosseno do ângulo da incidência da radiação eletromagnética formado entre o Sol e a normal à superfície ($\cos i$) (SLATER, 1980) é calculado segundo a Equação 4.1.

$$\cos i = \cos\theta_t \cdot \cos\theta_s + \sin\theta_t \cdot \sin\theta_s \cdot \cos(\varphi_s - \varphi_t) \quad (4.1)$$

Onde, i é o ângulo de incidência, θ_t é a inclinação da superfície (declividade), θ_s é o ângulo zenital solar na hora de aquisição da imagem, φ_s é o ângulo azimutal solar na hora de aquisição da imagem, e φ_t é o ângulo azimutal da inclinação da superfície (orientação). A equação não contempla o ângulo de visada do sensor, pois o mesmo é definido ao nadir.

Variáveis básicas locais, como declividade e orientação, necessárias para o cálculo do $\cos i$, foram modeladas a partir do MDE obtido da base de dados SRTM. Foram geradas quatro imagens $\cos i$ referentes a cada data de aquisição das cenas base TM. Essas imagens são formadas por números digitais que representam a intensidade de radiação eletromagnética recebida em cada pixel considerando o momento de aquisição das diferentes cenas. O fatiamento em si consiste em ordenar arbitrariamente os valores de $\cos i$ em classes de iluminação de acordo com a posição solar em cada imagem. Admite-se aqui que $\cos i$ descreve o que é definido anteriormente de iluminação local, sendo esta, caracterizada pelas classes de iluminação.

Para a caracterização dos estágios sucessionais é essencial que os polígonos selecionados estejam na mesma classe de iluminação nas quatro cenas base analisadas. Assim, cada classe de iluminação precisa ter área de intersecção, considerando as quatro datas, suficiente para a seleção desses polígonos. Os limiares de cada classe foram estabelecidos arbitrariamente de forma a obter equilíbrio entre a amplitude da classe e a área de intersecção. As classes não poderiam ser amplas demais, pois englobariam grande variação de condições de iluminação, e por outro lado, não podem ser estreitas demais, pois a área de intersecção seria insuficiente entre as quatro imagens e não permitiria a seleção de polígonos de tamanho suficiente para as análises. A partir de cinco classes iniciais com limiares calculados considerando a amplitude máxima de $\cos i$ de todas as imagens, foram determinadas três classes de iluminação. A Tabela 4.3 apresenta as classes e seus limiares $\cos i$. A classe de iluminação Pouco Iluminado (PI) possui uma maior amplitude de seus limiares, pois corresponde a uma pequena parte das cenas.

Tabela 4.3 – Classes de Iluminação Local e seus limiares $\cos i$ máximo e mínimo.

	Máximo	Mínimo
Muito Iluminado (MI)	0,9999	0,8263
Iluminado (I)	0,8264	0,6599
Pouco Iluminado (PI)	0,6598	-0,7935

As quatro imagens fatiadas geradas foram sobrepostas e as áreas de intersecção de cada classe de iluminação foram utilizadas como máscaras para a seleção de polígonos, chamadas neste documento de máscaras de intersecção. O fatiamento em classes de iluminação, incluindo os tratamentos necessários nos dados SRTM para o cálculo de

cos *i*, foi realizado no aplicativo SPRING através de rotinas em linguagem LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algebrico).

4.5 Seleção de polígonos e identificação dos estágios sucessionais

A identificação dos estágios sucessionais foi realizada por interpretação visual. Através da interpretação visual de imagens foram identificados polígonos correspondentes aos estágios Inicial (SS1), Intermediário (SS2), Avançado (SS3) e Primário (P) nas três classes de iluminação. A seleção dos polígonos obedeceu às áreas delimitadas pelas máscaras criadas a partir da intersecção das áreas de cada classe de iluminação. Mediante a adoção desse critério de seleção, foi possível garantir que um mesmo polígono pudesse ser observado ao longo do tempo sempre em uma mesma classe de iluminação, minimizando assim o efeito da variação da condição de iluminação na caracterização espectral.

A interpretação visual de imagens consiste em uma abordagem qualitativa de classificação, a qual é fundamentada no julgamento subjetivo do intérprete quanto à delimitação de polígonos que apresentam padrões de tonalidade, textura e cor similares (PONZONI et al., 2012). Fixando a escala em 1:15.000, e utilizando uma composição falsa-cor R(4)G(5)B(3)², a interpretação foi feita definindo aqueles que seriam os padrões visualmente distinguíveis dos estágios sucessionais, explorando os elementos da fotointerpretação como, cor, tonalidade, textura e contexto. Espera-se que estágios mais avançados, como SS3 e P, apresentem tonalidade vermelho mais escura e com textura mais rugosa do que aquela verificada nos dosséis dos estágios SS2 e SS1. Além disso, a consulta ao banco de imagens permite acompanhar o polígono ao longo do tempo, o que ajuda no discernimento sobre a idade do fragmento florestal, e, conseqüentemente, sua classificação.

A seleção dos polígonos foi feita na cena de 1989, e respeitou alguns critérios, conforme descrito a seguir: primeiramente, os polígonos foram selecionados tendo suas áreas inteiramente contidas em uma das máscaras de iluminação. A utilização de múltiplas cenas em uma sequência temporal permitiu a estimativa da idade de florestas secundárias (HELMER et al., 2000). Portanto, os polígonos foram selecionados na cena de 1989,

² As letras RGB referem-se aos canais vermelho, verde e azul, respectivamente. Os números relacionados à cada canal referem-se às bandas espectrais do sensor TM.

porém a definição dos estágios só aconteceu após a revisita deste polígono nas outras 17 cenas, para que se tivesse uma ideia da idade do fragmento, e com isso maior suporte na definição, mesmo que de forma subjetiva. Áreas de Florestas Ombrófilas Densas foram preferidas em relação a outras fitofisionomias, devido à sua menor variação fenológica. Poucos fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Ombrófila Mista, e Áreas de Tensão Ecológica foram incluídos, porém, sempre próximo aos limites destas fitofisionomias com os da Floresta Ombrófila Densa. As áreas com dinâmica que sugerissem agricultura ou florestas plantadas foram descartadas.

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 apresentam exemplos de polígonos em cada estágio sucessional, todos pertencendo à classe de iluminação MI. O polígono apresentado na Figura 4.5 (ID = PC8) foi identificado como floresta primária (P), não havendo mudança sucessional em todo o período analisado. Já o polígono apresentado na Figura 4.6 (ID = OC11) foi identificado como estágio SS1 em 1989, SS2 em 2005 e SS3 em 2011 (Apêndice A - Tabela A.1).

Figura 4.5 - Exemplo de polígono classificado como floresta primária (P) na cena de 1989. Cena TM/Landsat 5 composição R(4)G(5)B(3). A cena acima apresenta um polígono e seu entorno em escala 1:100.000. As cenas abaixo apresentam o entorno do polígono em escala 1:15.000. O polígono representado se insere na classe Muito Iluminado (MI). Cena

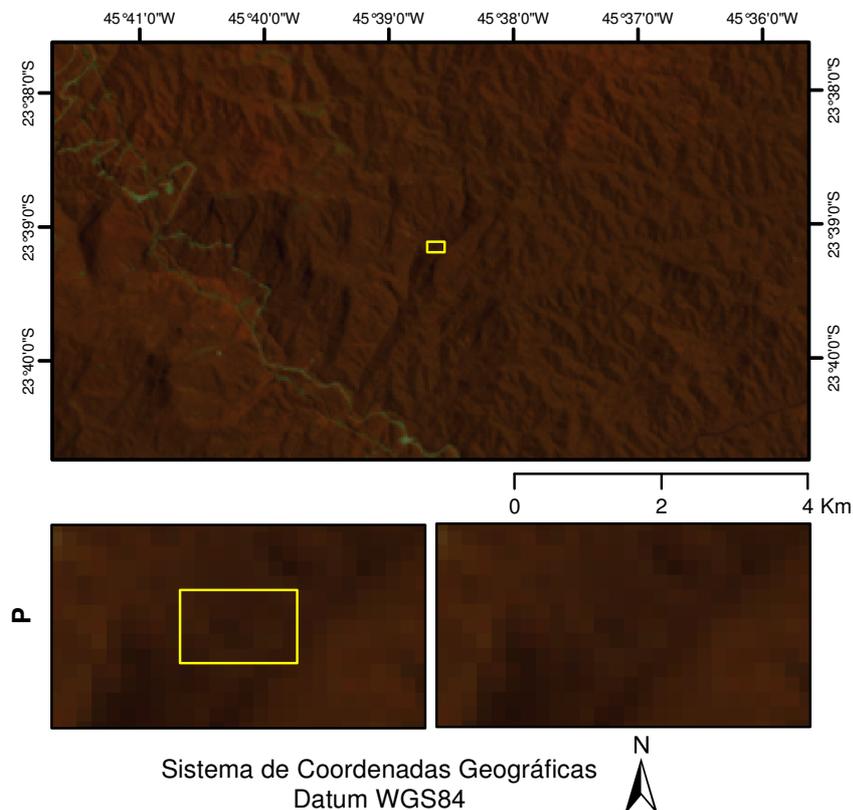
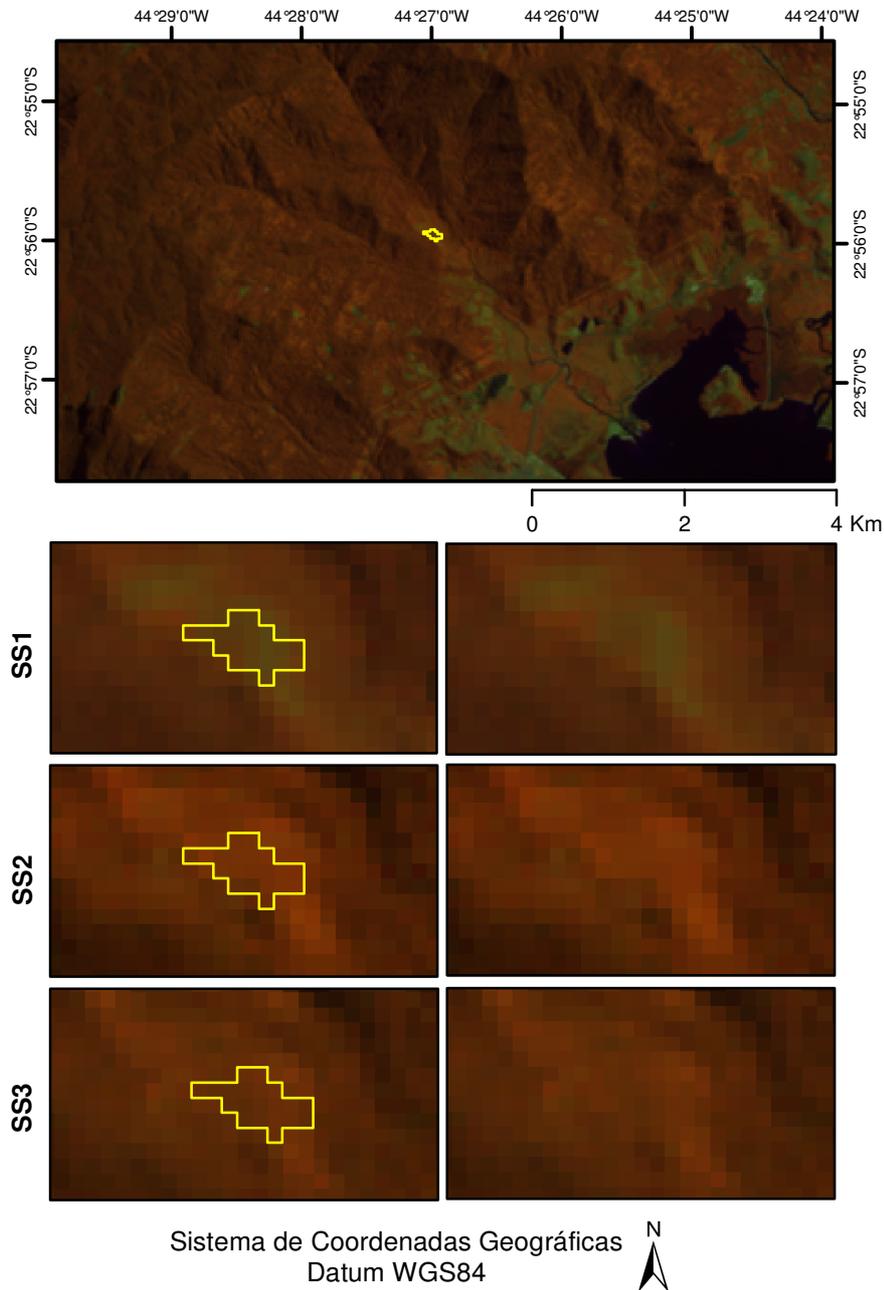


Figura 4.6 - Exemplo de polígono classificado como inicial (SS1), intermediário (SS2) e avançado (SS3), em três datas distintas, 1989, 2005 e 2011, respectivamente. Cena TM/Landsat 5 composição R(4)G(5)B(3). A cena acima apresenta um polígono e seu entorno em escala 1:100.000. As cenas abaixo apresentam o entorno do polígono em escala 1:15.000. O polígono representado se insere na classe Muito Iluminado (MI).



Como já mencionado, todos os polígonos foram revisitados nas dezessete outras cenas do banco de imagens TM, e seus estágios sucessionais foram determinados. A história de cada polígono, aqui também denominada como dinâmica ou trajetória sucessionais, foi então registrada para um intervalo de 25 anos. Apesar de somente quatro cenas serem

utilizadas para a extração de dados para o registro da dinâmica sucessional, mais cenas precisaram ser consideradas. O Apêndice A apresenta a lista de polígonos selecionados e suas respectivas trajetórias sucessionais. Nas tabelas contidas neste Apêndice, o campo ID fornece um código identificador de cada polígono. Esses identificadores consistem de duas letras e um número. As letras se referem ao estágio sucessional (A = avançado; I = intermediário; O = inicial; e P = floresta primária) que o polígono pertence na cena de 1989, e à classe de iluminação (C = Muito Iluminado; M = Iluminado; e I = Pouco Iluminado), respectivamente. Nas colunas referentes aos anos, as siglas SS1, SS2, SS3 e P referem-se aos estágios Inicial, Intermediário, Avançado e Primário, respectivamente. A Tabela 4.4 resume a quantidade de polígonos selecionados inicialmente em cada classe de iluminação e em cada estágio sucessional.

Tabela 4.4 - Quantidade de polígonos selecionados por classe de iluminação local e por estágio sucessional.

	Muito Iluminado (MI)	Iluminado (I)	Pouco Iluminado (PI)
Inicial (SS1)	10	5	6
Intermediário (SS2)	9	10	10
Avançado (SS3)	10	10	10
Floresta primária (P)	5	5	5
TOTAL	34	30	31

Vale ressaltar que não houve trabalho de campo para uma comparação entre a correspondência da interpretação visual na classificação de estágios sucessionais e parâmetros estabelecidos pelo CONAMA. Como destacado na seção 3.2.1, a identificação dos estágios sucessionais em campo no Domínio Mata Atlântica apresenta fragilidade por também estar sujeita a grande subjetividade. Além disso, a escala de trabalho adotada, por ser regional, dificulta a obtenção da verdade de campo, considerando recursos financeiros e disponibilidade de tempo. Foi adotada estratégia metodológica similar àquela adotada por empresas prestadoras de serviços de mapeamento, visando gerar alguma informação ou aprimoramento relevante aos profissionais do setor ao final deste trabalho.

4.6 Correção Atmosférica

Os números digitais (ND) das imagens originalmente baixadas foram convertidos para radiância aparente, isto é, radiância no topo da atmosfera (TOA) seguindo a Equação 4.2

(MARKHAM; BARKER, 1987). Os valores de L_{min} e L_{max} foram extraídos de Chander et al. (2009) levando em consideração cada período de obtenção das cenas utilizadas.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max_{\lambda}} - L_{min_{\lambda}}}{ND_{max_{\lambda}}} \right) ND_{max} + L_{min_{\lambda}} \quad (4.2)$$

onde: L_{λ} = Radiância no topo da atmosfera (TOA) no comprimento de onda λ ($mW/m^2/Sr/\mu m$); $L_{max_{\lambda}}$ = radiância máxima no comprimento de onda λ ($mW/m^2/Sr/\mu m$); $L_{min_{\lambda}}$ = radiância mínima no comprimento de onda λ ($mW/m^2/Sr/\mu m$); $ND_{max_{\lambda}}$ = número digital máximo no comprimento de onda λ (2^n).

Efeitos de absorção e de espalhamento de constituintes da atmosfera foram minimizados através da correção atmosférica por meio da aplicação de modelo fundamentado na teoria da transferência radiativa. Foi utilizado o algoritmo 6S implementado em ambiente FORTRAN. Foi adotado modelo atmosférico tropical, tipo de aerossol continental, e 60 km de visibilidade para todas as imagens. Como resultado, as imagens radiância TOA foram transformadas em imagens reflectância de superfície. A qualidade das imagens resultantes foi analisada plotando espectros de alvos conhecidos, como vegetação, solo e água. Os espectros observados corroboraram com o que é esperado para os respectivos alvos, isto é, as formas das curvas de reflectância para cada alvo corresponderam aos comportamentos espectrais típicos descritos na literatura (JENSEN, 2009). A curva da água, por exemplo, manteve valores de reflectância baixos em relação aos outros alvos, principalmente na faixa espectral do IVM; a curva da vegetação apresentou o pico de reflectância típico na faixa espectral do IVP; o solo, que corresponde à uma área de concreto, apresentou menor reflectância na região do visível e maior na faixa espectral do IVM.

4.7 Transformação *Tasseled Cap* (TC)

A transformação TC foi realizada nas quatro cenas base já corrigidas atmosféricamente. Como resultado da transformação, cada cena gerou três imagens: *Brightness*, *Greenness* e *Wetness*. A transformação TC foi realizada no aplicativo ENVI 5.1 (EXELIS, 2012). O algoritmo implementado em tal aplicativo realiza uma transformação ortogonal dos dados originais em um novo espaço tridimensional definido por *Brightness*, *Greenness* e *Wetness*, utilizando os coeficientes apresentados na Tabela 4.5 (EXELIS, 2012).

Tabela 4.5 – Coeficientes utilizados no aplicativo ENVI para a transformação TC nos dados TM/Landsat 5 corrigidos atmosféricamente.

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Brightness	0,33183	0,33121	0,55177	0,42514	0,48087	0,25252
Greenness	-0,24717	-0,16263	-0,40639	0,85469	0,05493	-0,11749
Wetness	0,13929	0,22490	0,40359	0,25178	-0,70133	-0,45732

Fonte: Exelis (2012).

4.8 Extração de dados

Para a caracterização espectral dos estágios sucessionais, foram extraídos os valores de reflectância de superfície das imagens das bandas TM/Landsat 5 para todos os pixels de cada polígono. Foi utilizada a média dos pixels por polígono, e estes agrupados por estágio e classe de iluminação para a construção dos espectros.

Para as demais análises, foram extraídos os valores *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* de todos os pixels de cada polígono selecionado. Esses dados foram utilizados em níveis de generalização distintos para atender a pressupostos necessários das análises (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Níveis de generalização utilizada em cada análise de dados.

	Análise		Polígono	Grupo
Caracterização Espectral	Espectros da Reflectância		Média de todos os pixels	Média de todos os polígonos do mesmo estágio sucessional e classe de iluminação
	Espaço TC	Etapa 1	Média de todos os pixels	Média de todos os polígonos do mesmo estágio sucessional e classe de iluminação
		Etapa 2	Média de todos os pixels	
Análise de Inconsistência por Kolmogorov-Smirnov			Média de todos os pixels	Média de todos os polígonos do mesmo estágio sucessional e classe de iluminação
Análise do deslocamento no espaço TC			60 % do total de pixels, escolhidos por sorteio	Agrupamento dos polígonos com a mesma dinâmica sucessional no período e classe de iluminação considerados

Os testes estatísticos, bem como o objetivo da adoção de cada um, serão melhores detalhados na seção 4.9.2, a qual trata da abordagem quantitativa da análise dos dados.

Para a caracterização espectral dos estágios sucessionais no espaço TC, bem como para a análise de inconsistência por Kolmogorov-Smirnov (K-S), foi usada a média de todos os pixels por polígono. Na Etapa 1 da caracterização no espaço TC, e também na análise de inconsistência por K-S, os polígonos foram agrupados por estágio sucessional e classe de iluminação, utilizando uma só média em cada cenário. Na Etapa 2, foi considerada a média de cada polígono, mantendo-os individualizados. Ao final desta etapa, foram escolhidos cinco polígonos de cada classe de iluminação para acompanhando ao longo de um espectro temporal. Já para a análise do deslocamento no espaço TC foi sorteado aleatoriamente um número de pixels igual a 60% do número total de cada polígono, sendo o pixel a unidade amostral. A aleatoriedade é importante nesta análise para que não haja auto-correlação espacial entre os dados, premissa necessária para o teste estatístico qui-quadrado. No entanto, a localização dos pixels selecionados foi mantida entre as imagens para garantir a auto-correlação temporal, essencial para a comparação. Ainda nesta análise, os polígonos tiveram de ser agrupados segundo suas trajetórias sucessionais, para que o número de amostras (pixels) por grupo fosse suficiente para o teste adotado. Detalhes sobre esses agrupamentos serão fornecidos mais adiante.

4.9 Análise de dados

4.9.1 Abordagem Qualitativa

Foram adotadas duas estratégias para a caracterização espectral dos estágios sucessionais. A primeira estratégia consistiu no uso de espectros da reflectância de superfície. O objetivo da adoção desta estratégia foi procurar identificar consistências entre os espectros dos diferentes estágios sucessionais, isto é, se fatores como, a componente sombra, a participação do solo e do sub-bosque, e o adensamento do dossel de fato influenciam o espectro de reflectância dos diferentes estágios. A segunda estratégia consistiu na caracterização espectral dos estágios sucessionais no espaço TC. Acredita-se que a caracterização sendo feita no espaço TC possui maior sensibilidade, fazendo com que esta estratégia possua maior capacidade para detectar diferenças sutis entre os estágios. A abordagem qualitativa da análise dos dados englobou as duas caracterizações e iniciou com a construção dos espectros de reflectância. A discussão dos resultados da caracterização por espectros de reflectância foi embasada na comparação visual entre os espectros observados e aquilo que é esperado de acordo com a literatura para diferentes

objetos. A caracterização no espaço TC foi dividida em duas etapas, as quais serão detalhadas a seguir.

4.9.1.1 Etapa 1

A Etapa 1 teve como objetivo descrever a dinâmica sucessional no espaço TC dos estágios ao longo do tempo, relacionando-a com o esperado de acordo com a literatura, e atentando para a diferença espectral existente entre as cenas utilizadas. Para cada classe de iluminação, foi descrito o padrão de posicionamento do espaço TC pelos estágios. Como essa descrição foi feita ao longo do tempo, permitiu que a existência e a magnitude das diferenças radiométricas entre as cenas fossem discutidas. Posteriormente, a confusão entre os estágios foi analisada utilizando histogramas de densidade que permitiram a observação de sobreposição e de amplitude dos dados. Ao final desta etapa, de acordo com as descrições observadas, foi possível traçar um padrão do posicionamento dos estágios sucessionais no espaço TC.

4.9.1.2 Etapa 2

A Etapa 2 teve como objetivo observar a disposição dos polígonos no espaço TC, contrapondo essa observação com o padrão traçado na etapa anterior. Nesta etapa, como já mencionado anteriormente, os polígonos foram considerados individualizados, permitindo observar o posicionamento de cada polígono no espaço TC.

4.9.2 Abordagem Quantitativa

O termo inconsistência ganhará força e estará bastante presente, e sua quantificação concluirá cada análise. Inconsistência se define aqui como todo evento diferente do padrão de caracterização esperado, significando que apesar da classificação visual ter distinguido um par de estágios sucessionais entre si, o teste estatístico não foi capaz de diferenciá-los, e vice-versa.

Duas análises quantitativas foram adotadas com o objetivo de testar estatisticamente as observações feitas nas respectivas etapas da abordagem qualitativa. Sendo assim, a primeira estabeleceu estatisticamente o grau de inconsistência na separabilidade entre os estágios sucessionais, utilizando o teste Kolmogorov-Smirnov (K-S). A segunda análise considerou o deslocamento de grupo de polígonos com a mesma trajetória sucessionais

com o objetivo de comparar a dinâmica que se observa no espaço TC com a classificação visual dos polígonos.

Vale ressaltar que como não existiu uma verdade de campo, não há como dizer em qual etapa o erro ocorreu, se na análise quantitativa ou na interpretação visual de imagens. Os testes se ativeram, então, a análises de inconsistências.

4.9.2.1 Análise de Inconsistência por Kolmogorov-Smirnov (K-S)

A Etapa 1 da análise qualitativa descreveu um padrão do posicionamento dos estágios sucessionais no espaço TC. O objetivo da análise de inconsistência por K-S foi testar estatisticamente a diferença da distribuição dos dados dos estágios sucessionais, bem como de um mesmo estágio sucessional em diferentes datas. É de se esperar que um mesmo estágio sucessional não tenha diferença significativa em sua distribuição de dados entre duas cenas. No entanto, isso nem sempre é observado e possíveis explicações para isso foram discutidas.

Foram definidas, então, todas as comparações possíveis entre estágios sucessionais dentro de uma mesma cena (entre estágios), e um mesmo estágio dentre todas as cenas utilizadas (entre cenas). As comparações entre um mesmo estágio sucessional em diferentes cenas foram feitas como mais uma forma de avaliar as diferenças radiométricas entre as cenas. Uma vez que não é esperada diferença significativa nos valores de reflectância referentes ao mesmo estágio sucessional em diferentes cenas, se essa diferença existe e é significativa, ela pode estar associada às diferenças radiométricas. As comparações ainda levaram em consideração cada feição TC e classes de iluminação. Ao todo, foram quatro estágios sucessionais, três feições TC, três classes de iluminação e seis possíveis combinações entre estágios ou entre cenas, o que significa 216 comparações entre estágios e 216 entre cenas. O teste K-S foi aplicado a todas as comparações.

O teste K-S, quando aplicado para duas amostras independentes, infere se as amostras podem possivelmente ter sido extraídas de uma mesma população (ou populações com mesma distribuição). O teste é sensível a qualquer diferença nas distribuições das quais se extraíram as amostras, como diferenças na posição central, na dispersão e na assimetria (SIEGEL, 1977). O teste K-S de duas amostras utiliza as distribuições acumuladas, e acessa a concordância entre dois conjuntos de valores amostrais. Se as duas amostras foram extraídas da mesma população, então é de se esperar que as distribuições

acumuladas das duas amostras sejam bastante próximas. Se as distribuições acumuladas se distanciam uma da outra em qualquer ponto, isto sugere que as amostras provenham de populações distintas. Assim, um desvio grande pode levar a rejeição da hipótese de nulidade. A estatística teste é o ponto de maior diferença (em valor absoluto) entre as duas distribuições.

As distribuições acumuladas (sob H_0) são representadas por $S_1(x)$ e $S_2(x)$ (Equação 4.3). Sob H_0 , espera-se que as diferenças entre $S_1(x)$ e $S_2(x)$ sejam pequenas. O teste K-S toma a maior destas diferenças em módulo que é denominada de desvio máximo e é anotada por D .

$$D = \text{máx}|S_1(x) - S_2(x)| \quad (4.3)$$

A distribuição amostral de D , sob H_0 , é conhecida, e a partir dela é possível calcular o valor-p. Esse valor-p, considerando um nível de significância, é usado para aceitar ou rejeitar H_0 (SIEGEL, 1977).

Gráficos *boxplots* foram utilizados para ilustrar a dispersão dos dados e servir de base para a discussão da análise de inconsistências. A partir dos resultados de rejeição ou não de H_0 foram analisadas as inconsistências com o padrão traçado na abordagem qualitativa. Foi adotado nível de significância 5%. Essa análise foi implementada em ambiente R.

4.9.2.2 Análise do deslocamento no espaço TC

O deslocamento dos polígonos no espaço TC, de acordo com suas dinâmicas sucessionais, foi avaliado quanto à sua significância estatística e à sua direção. Para tal, o espaço TC aqui foi substituído por um espaço diferença, no qual os eixos foram constituídos pela diferença entre os valores *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* em intervalos distintos considerando os quatro anos das cenas utilizadas. A Tabela 4.7 exemplifica a construção dos eixos. No exemplo, é utilizado o período de 1989 - 1996, e somente um grupo de polígonos (definição desses grupos será dada mais adiante). No entanto, a análise foi feita para todos os grupos de polígonos considerados e intervalos possíveis (1989 – 1996; 1989 – 2005; 1989 – 2011; 1996 – 2005; 1996 – 2011; 2005 – 2011).

Tabela 4.7 – Exemplo do cálculo dos eixos utilizados na análise do deslocamento no espaço TC para o período de 1989 – 1996 de um grupo de polígonos.

		1989			1996			1996 - 1989		
		Brightness	Greenness	Wetness	Brightness	Greenness	Wetness	Eixos		
								x	y	z
Grupo de Polígono 1	Pixel 1	52,84	36,59	-1,32	40,85	41,54	-2,45	40,85 - 52,84	41,54 - 36,59	-2,45 - (-1,32)
	Pixel 2	51,41	38,12	-3,10	42,52	43,65	-3,98	42,52 - 51,41	43,65 - 38,12	-3,98 - (-3,10)
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	Pixel n	51,47	37,69	-3,05	44,70	43,74	-4,66	-6,76	6,04	-1,61

Os pontos (pixels) foram plotados no espaço diferença e através do teste qui-quadrado a significância do deslocamento dos pontos no respectivo intervalo foi avaliada. Considerando a hipótese nula (H_0) de que o movimento de cada ponto é aleatório nesse espaço, esperaríamos que os pontos se espalhassem por todos os octantes (definidos pelos três eixos) de forma uniforme. O teste qui-quadrado foi empregado, então, para avaliar o quanto a distribuição observada dos pontos se distancia dessa distribuição padrão esperada (uniforme).

O teste qui-quadrado comprovou se existia diferença significativa entre um grupo esperado e um observado de frequências. Neste trabalho, a determinação das frequências esperadas foi dada pelo número total de pixels no grupo de polígonos analisado dividido por oito – distribuição uniforme dos pontos nos oito espaços definidos pelos três eixos. Esse número foi comparado à frequência observada, dada pela contagem de pontos incidentes em cada octante. A hipótese de nulidade pode ser testada através da estatística:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (4.4)$$

onde χ^2 é valor qui-quadrado, O_i é o número de casos observados classificados no octante i e E_i o número de casos esperados no octante i sob H_0 . Se há concordância entre os valores observados e esperados, as diferenças ($O_i - E_i$) serão pequenas e, conseqüentemente, χ^2 também será pequeno (SIEGEL, 1977). Adotando o teste qui-quadrado como um teste de aderência perde-se um grau de liberdade (SIEGEL, 1977). Foi considerado, assim, um teste com 7 graus de liberdade. O nível de significância seguiu o que já foi adotado no teste K-S, $\alpha = 0,05$. Para estes parâmetros o valor χ^2 crítico

tabelado é 14,07. Resultados acima deste valor são considerados significativos, permitindo a rejeição de H_0 .

Alguns pressupostos do teste qui-quadrado precisaram ser considerados, como:

- Número mínimo de pontos (amostras);
- Seleção de amostras não correlacionadas espacialmente.

A unidade amostral nesta análise correspondeu a um pixel, e como nem todos os polígonos possuíam o número mínimo de pixels requerido para o teste, a fim de serem tratados individualmente, os polígonos tiveram que ser agrupados de acordo com sua dinâmica sucessional. A respeito da seleção de amostras não correlacionadas espacialmente, foi feito um sorteio aleatório de 60% dos pixels de cada polígono. Esse sorteio minimizou a auto-correlação espacial. Sendo assim, em cada intervalo mencionado acima, os polígonos foram agrupados por dinâmica sucessional, e os grupos que somavam mais de 40 pixels foram analisados.

É recomendado que cada frequência esperada não fosse inferior a 5 (SIEGEL, 1977). Esse número seria o mínimo para garantir o desempenho estatístico do teste. Se em cada octante, a frequência esperada de pontos for igual a 5, o número mínimo de pontos de entrada seria 40. Portanto, esse foi o número mínimo de pontos necessário para que o grupo de polígonos fosse analisado.

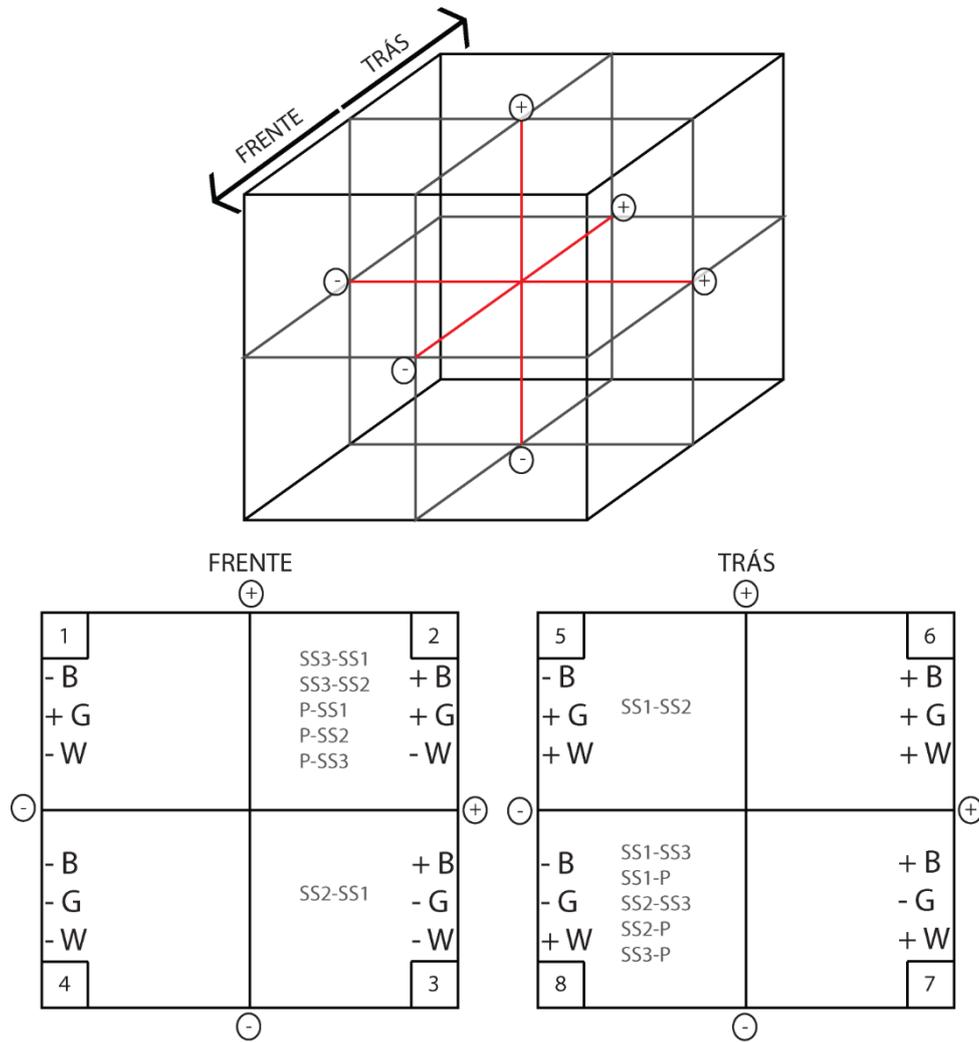
O agrupamento dos polígonos, como dito anteriormente, foi feito segundo a dinâmica sucessional sofrida em um intervalo específico. Por exemplo, todos os polígonos que se mantiveram no estágio SS3 entre 1989 e 1996 foram agrupados. De cada um desses polígonos foram extraídos 60% do número total de pixels. Posteriormente, se a soma dos pixels sorteados foi maior que 40 esse grupo de polígonos foi analisado pelo teste qui-quadrado. O Apêndice B apresenta tabelas para cada classe de iluminação contendo os agrupamentos que obtiveram número de pontos igual ou superior a 40, bem como os polígonos de cada grupo.

Analisando o resultado do teste, se for obtido um valor significativo, isto é, se as distribuições observada e esperada forem significativamente diferentes, será possível considerar que a dinâmica sofrida pelo grupo de polígonos em questão, e naquele período analisado, foi estatisticamente significativa. Isso seria consistente se na identificação dos

estágios sucessionais, feita através de interpretação visual, esse polígono apresentasse mudança de estágio sucessional durante o período analisado.

Uma vez os pontos plotados no espaço diferença, e a significância estatística determinada pelo teste qui-quadrado, a direção de deslocamento foi avaliada. Para isto, a interpretação seguiu o que mostra a Figura 4.7. A figura ilustra os octantes e as zonas de diferença positiva ou negativa. Os octantes foram numerados em sentido horário começando pelo de cima à esquerda e à frente, terminando com o de baixo à esquerda, atrás. Abaixo, os octantes são projetados, e recebem uma numeração e a interpretação sugerida, de acordo com o que acontece com as feições TC. Sendo assim, as dinâmicas assinaladas dentro de cada octante na figura representam o que é esperado que acontecesse, caso houvesse concentração de pontos nestas regiões. Em uma análise hipotética no intervalo de 1996 a 2005, se houvesse uma grande concentração de pontos no octante 5, sugere-se que os valores de *Brightness* de 2005 são menores que os de 1996, e que os de *Greenness* e *Wetness* são maiores em 2005. Vale lembrar que os pontos não são os valores de *Brightness*, *Greenness* e *Wetness*, e sim a diferença desses valores no intervalo 1996-2005. A diminuição de *Brightness*, seguida de aumento de *Greenness* e *Wetness*, sugere que tenha havido dinâmica do estágio SS1 para o estágio SS2, de acordo com o padrão traçado na seção 4.9.1.1. Essa interpretação foi repetida para todos os grupos de polígonos analisados.

Figura 4.7 - Guia para interpretação da direção do deslocamento dos pontos no espaço TC.



A análise do deslocamento no espaço TC foi implementada em linguagem Python, e a rotina é apresentada no Apêndice C.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados em três seções, partindo de uma visão mais generalizada da caracterização espectral dos estágios sucessionais até uma visão mais particular de cada polígono, finalizando com as análises quantitativas. A seção 5.1 apresenta resumidamente o resultado da seleção dos polígonos em cada classe de iluminação. A seção 5.2 tem por objetivo apresentar os resultados da caracterização espectral dos estágios sucessionais através de curvas de reflectância e no espaço *Tasseled Cap*. Por fim, na seção 5.3 serão apresentadas as abordagens quantitativas para as análises de separabilidade dos estágios sucessionais e do deslocamento sofrido pelos polígonos no espaço TC ao longo do tempo.

5.1 Dinâmica sucessional por interpretação visual

O Apêndice A apresenta a lista dos polígonos selecionados e suas respectivas dinâmicas sucessionais. A maior parte dos polígonos, aproximadamente 80%, foram selecionados no estado de São Paulo (Tabela 5.1). Somente três polígonos possuem parte de suas extensões no estado de Minas Gérias. Cerca de 94% dos polígonos pertencem a fitofisionomia Floresta Ombrófila Densa. Aproximadamente 3% pertencem às Áreas de Tensão Ecológica, 1% à Floresta Estacional Semidecidual, e 2% à Floresta Ombrófila Mista.

Tabela 5.1 – Polígonos selecionados nas três classes de iluminação, seus códigos identificadores (ID), e estado e fitofisionomia aos quais pertencem.

MUITO ILUMINADO			ILUMINADO			POUCO ILUMINADO		
ID	Estado	Fitofisionomia	ID	Estado	Fitofisionomia	ID	Estado	Fitofisionomia
OC1	MG	FOD	OM1	SP	FOD	O11	SP	FOD
OC1	SP	FOD	OM3	MG	FOD	O12	SP	FOD
OC3	SP	FOD	OM3	SP	ATE	O16	SP	FOD
OC5	SP	FOD	OM3	SP	FOD	O17	SP	FOD
OC6	SP	FOD	OM9	SP	FOD	O19	SP	FOD
OC8	RJ	FOD	OM10	SP	FOD	O110	RJ	FOD
OC10	RJ	FOD	OM13	SP	FOD	II2	SP	FOD
OC11	RJ	FOD	IM1	SP	FOD	II3	SP	FOD
OC13	RJ	FOD	IM3	SP	FOD	II6	SP	FOD
OC18	SP	FOD	IM3	SP	FESD	II8	RJ	FOD
OC20	SP	FOD	IM5	SP	FOD	II10	SP	FOD
IC8	SP	FOD	IM8	SP	FOD	II11	SP	FOD
IC9	SP	FOD	IM9	SP	FOD	II13	SP	FOD
IC11	SP	FOD	IM10	SP	FOD	II14	SP	FOD

(Continua)

Tabela 5.2 – Continuação.

IC12	SP	FOD	IM11	SP	FOD	II15	SP	FOD
IC14	SP	FOD	IM12	SP	FOD	II16	SP	FOD
IC17	SP	FOD	IM14	SP	FOD	AI1	SP	ATE
IC18	RJ	FOD	IM15	SP	FOD	AI2	SP	ATE
IC19	RJ	FOD	AM1	SP	FOM	AI4	SP	FOD
IC20	RJ	FOD	AM2	SP	FOD	AI5	SP	FOD
AC3	SP	FOD	AM5	MG	FOD	AI6	SP	FOM
AC4	SP	FOD	AM7	SP	FOD	AI7	SP	FOD
AC5	SP	FOM	AM8	SP	FOD	AI8	SP	FOD
AC12	RJ	FOD	AM9	SP	FOD	AI9	SP	FOD
AC14	RJ	FOD	AM10	SP	FOD	AI10	SP	FOD
AC15	RJ	FOD	AM11	SP	FOD	AI12	SP	FOD
AC16	RJ	FOD	AM12	SP	FOD	PI1	SP	FOD
AC17	RJ	FOD	AM13	SP	FOD	PI2	SP	FOD
AC19	RJ	FOD	PM1	SP	FOD	PI3	SP	FOD
AC20	RJ	FOD	PM3	SP	FOD	PI5	SP	FOD
PC8	SP	FOD	PM4	SP	FOD	PI6	SP	FOD
PC9	SP	FOD	PM5	SP	FOD			
PC10	SP	FOD	PM6	SP	FOD			
PC11	SP	FOD						
PC12	RJ	FOD						

FOD = Floresta Ombrófila Densa / FOM = Floresta Ombrófila Mista / ATE = Áreas de Tensão Ecológica / FESD = Floresta Estacional Semidecidual

Fonte do Mapa de Fitofisionomias: IBGE (2004).

5.2 Caracterização espectral dos estágios sucessionais

As seções a seguir apresentam os resultados da caracterização espectral dos estágios sucessionais através de espectros da reflectância de superfície e do espaço TC.

5.2.1 Caracterização espectral através de espectros da reflectância

Após a conversão dos números digitais (NDs) das imagens em valores de reflectância de superfície, conforme descrito na seção 4.6, a caracterização espectral dos estágios sucessionais foi avaliada quanto às formas de suas curvas de reflectância. A Figura 5.1, Figura 5.2, e Figura 5.3 apresentam os espectros de reflectância de superfície dos quatro estágios sucessionais considerados, nas classes MI, I e PI, respectivamente. Os espectros foram agrupados por classe de iluminação e por cena. Vale salientar que se trata de valores médios específicos de amostras em cada estágio e classe de iluminação.

Figura 5.1 - Reflectância de superfície dada em porcentagem ao longo das seis bandas espectrais ópticas TM/Landsat 5, considerando a classe de iluminação Muito Iluminado e data de aquisição da cena Landsat.

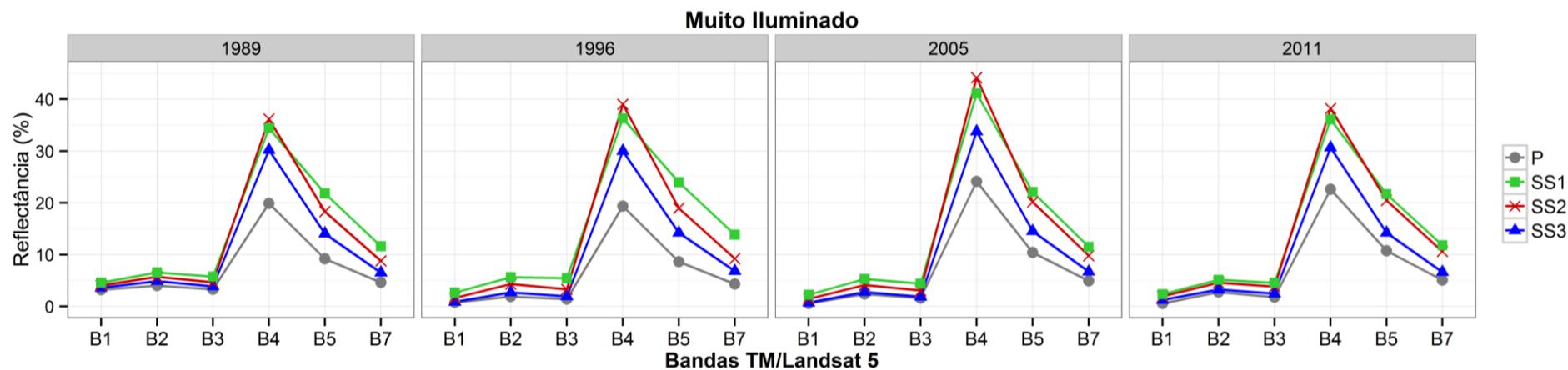


Figura 5.2 - Reflectância de superfície dada em porcentagem ao longo das seis bandas espectrais ópticas TM/Landsat 5, considerando a classe de iluminação Iluminado e data de aquisição da cena Landsat.

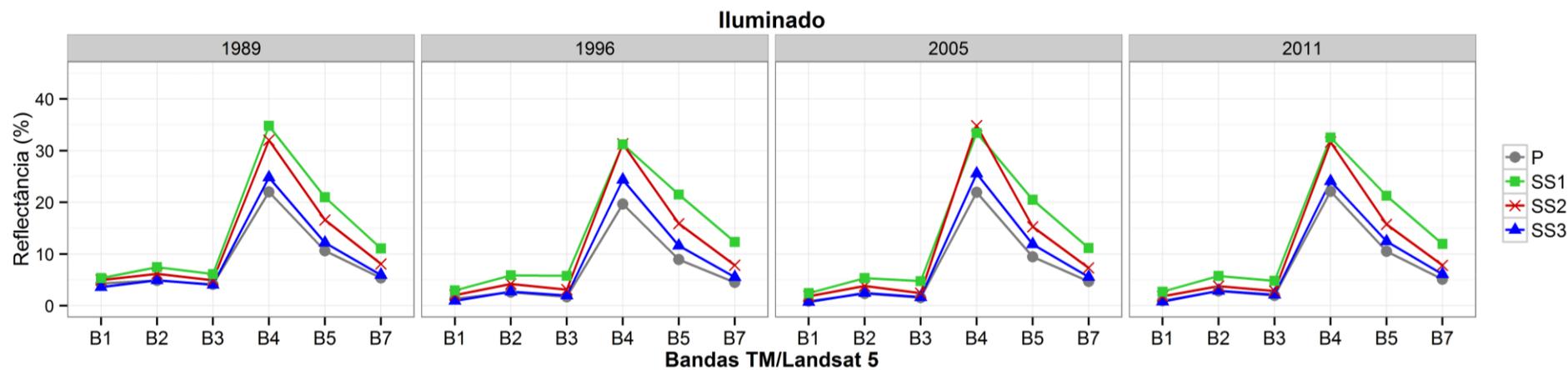
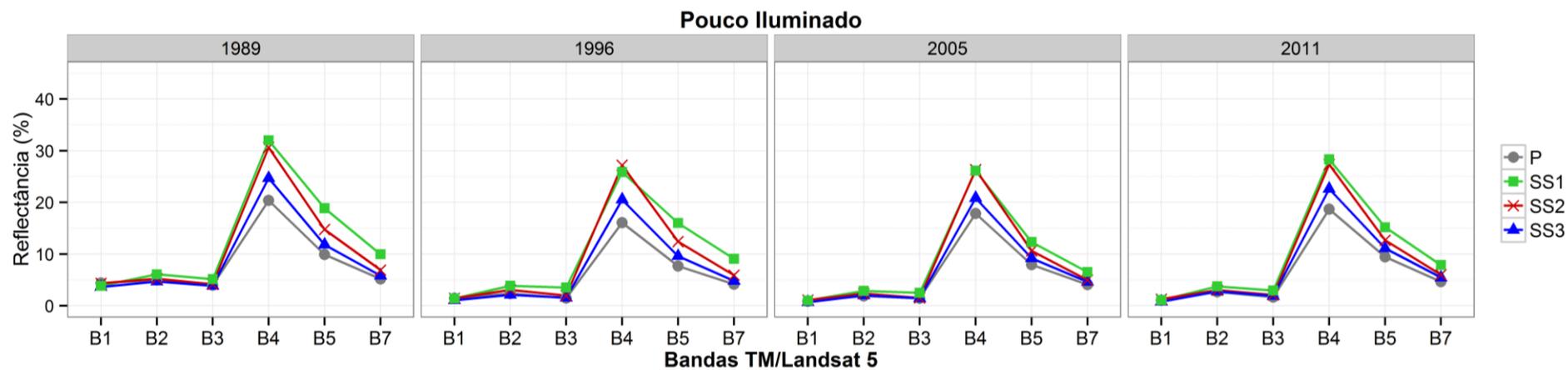


Figura 5.3 - Reflectância de superfície dada em porcentagem ao longo das seis bandas espectrais ópticas TM/Landsat 5, considerando a classe de iluminação Pouco Iluminado e data de aquisição da cena Landsat.



Dada à escala dos gráficos, os estágios sucessionais são pouco contrastantes na região do visível, especificamente nas bandas TM2 e TM3, principalmente na classe de iluminação PI. Os estágios mais avançados apresentaram reflectância de superfície relativamente mais baixa do que aquela dos demais estágios sucessionais, o que corrobora com o esperado. A maior quantidade de folhas, e conseqüentemente de pigmentos fotossintetizantes e de sombra resultaram em maior absorção de radiação eletromagnética (GOEL, 1988; PONZONI, 1993; KUMAR, 1972). Nas outras condições de iluminação, é possível notar maior reflectância na imagem da banda TM2 do estágio SS1 em relação aos outros estágios. No entanto, ainda é difícil observar distinção entre os estágios. Essa distinção fica mais aparente a partir da imagem da banda TM4, referente ao comprimento de onda do IVP. De modo geral, em todas as datas e classes de iluminação o estágio SS2 possui maior reflectância na imagem da banda TM4, seguida da reflectância dos estágios SS1, SS3 e P. Esse padrão é mais evidente na classe MI. Nas classes I e PI, os estágios SS1 e SS2 se confundiram mais nesta faixa espectral. Nas bandas TM5 e TM7 o estágio SS1 apresentou maior reflectância, seguido dos estágios SS2, SS3 e P, respectivamente. Da mesma forma, nas classes I e PI, a distinção entre os estágios foi menor.

O padrão obtido foi consistente com o observado por Ponzoni e Rezende (2004). O fato de a reflectância de superfície da banda TM4, isto é, na região do IVP, diminuir em estágios mais avançados³ de regeneração pode ser explicado pelo aumento da rugosidade do dossel. A rugosidade resulta em sombreamento mútuo de um estrato ou de copas de árvores dominantes que se projetam no topo do dossel, explicando assim o decréscimo da reflectância neste comprimento de onda em estágios mais avançados (BERNARDES, 1996; MORAN et al., 2000). O sombreamento assume papel fundamental e dominante no processo de interação da radiação com o dossel de formações arbóreas, reduzindo a reflectância na região do IVP (PONZONI;DISPERATI, 1994). Considerando essa mesma faixa espectral, Ponzoni et al. (2001) e Galvão et al. (2001) destacam o efeito da estratificação em dosséis arbóreas de formações secundárias na diminuição da reflectância de superfície. A reflectância do estágio SS2 na imagem da banda TM4 é maior que os demais estágios, pois já concentra certa quantidade de biomassa em seu dossel, porém este não é denso o bastante para agravar o efeito da sombra como acontece nos estágios SS3 e P. Em comparação com o estágio SS1, o estágio SS2, possui uma estrutura mais complexa, na qual o *background* pode não ser observado, privilegiando as

³ Entende-se por estágios avançados, os estágios SS3 e P.

porções mais superiores do dossel. Já no estágio SS1 pode haver interferência do sub-bosque ou do substrato mal iluminado nas camadas mais inferiores do dossel.

Na região do infravermelho médio (IVM) (bandas TM5 e TM7), os valores de reflectância relativamente mais baixos dos estágios mais avançados da sucessão podem ser explicados pela maior quantidade de folhas presentes, como também do maior sombreamento. Nessa faixa espectral o comportamento é consequência, sobretudo, do conteúdo de água na folha (PONZONI et al., 2012). O acréscimo de folhas no dossel, e conseqüentemente, a maior oferta de água na cena como um todo resulta em maior absorção de radiação eletromagnética na região do IVM (GOEL, 1988; PONZONI; DISPERATI, 1994). O teor de água mencionado refere-se à água existente no interior das folhas, por isso a relação direta entre quantidade de folhas e maior teor de água. Portanto, quanto maior a quantidade de folhas, maior será a absorção da radiação eletromagnética pelas bandas TM5 e TM7, o que acontece nos estágios mais avançados. A inclinação da curva observada nesta faixa retrata essa dinâmica; se o trecho da curva referente às bandas TM5 e TM7 é menos inclinado em relação ao eixo x, ou seja, formando uma acentuação entre as regiões do infravermelho próximo e médio, essa curva possivelmente representa uma vegetação saudável, com alto teor de água (grande quantidade de folhas).

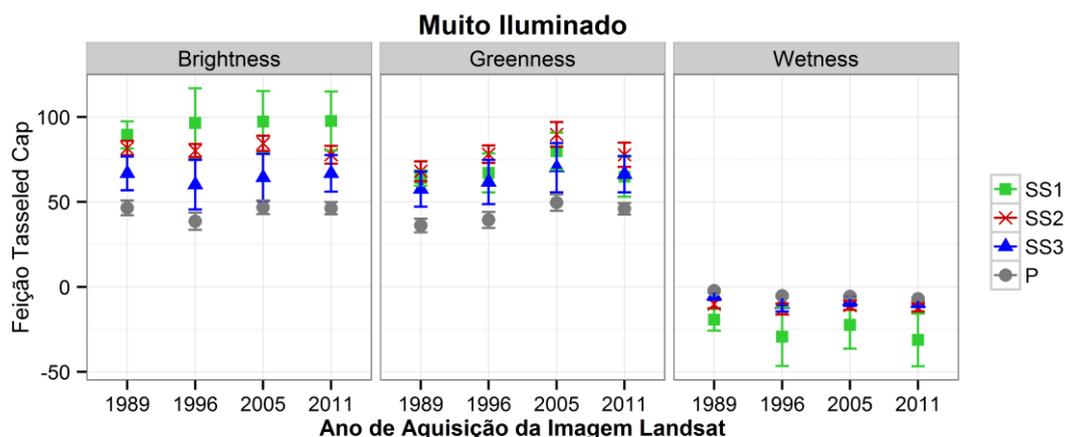
5.2.2 Caracterização espectral no espaço *Tasseled Cap* (TC)

Os resultados da caracterização espectral dos estágios sucessionais no espaço TC, em suas respectivas etapas, serão apresentados a seguir.

5.2.2.1 Etapa 1

A Figura 5.4 apresenta a dinâmica dos valores médios de *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* de cada estágio sucessional ao longo do tempo, na classe de iluminação MI. O Apêndice D contém os valores das médias para cada feição na classe MI, considerando cada estágio sucessional, bem como valores de desvio padrão e intervalos de confiança.

Figura 5.4 – Comportamento espectral dos estágios sucessionais em diferentes datas sob a condição de iluminação local Muito Iluminado.



Foi observado padrão de ordenamento dos estágios sucessionais no espaço TC, em termos gerais, o que corrobora com o descrito na literatura (STEININGER, 1996; HELMER et al., 2000). Apesar da variação na magnitude dos valores das feições TC, a classe de iluminação não parece alterar esse padrão.

Em termos gerais, é possível destacar que para a feição *Brightness* as médias do estágio SS1 foram as mais elevadas em todas as cenas, seguidas das do estágio SS2, SS3 e P, respectivamente. Já para a feição *Greenness* o estágio SS2 apresentou as médias mais elevadas, seguidas das dos estágios SS1, SS3 e P, respectivamente. Em 2011, a média do estágio SS3 superou a do SS1 para esta feição. A feição *Wetness* apresentou o padrão inverso de *Brightness*. Os estágios sucessionais se apresentaram mais aglomerados nesta última feição. Os estágios SS1 e SS3 apresentaram desvios padrões maiores que os outros estágios. Um desvio padrão maior pode seu resultado de confusão na interpretação visual, como por exemplo, a classificação de gramíneas ou algum tipo de cultura como SS1, ampliando assim, a dispersão dos dados desse estágio.

As dinâmicas descritas acima corroboram com a literatura. De acordo com Steininger (1996), os valores de *Brightness* diminuem com a maturação da floresta. Galvão et al. (2015) também observaram o mesmo padrão para esta feição. A feição *Greenness* destaca o contraste entre as bandas TM/Landsat 5 do visível com a banda do IVP. Quanto maior a reflectância na faixa espectral do IVP, maior será o contraste entre esta faixa e as bandas do visível. Sendo assim, formações florestais que possuem maior reflectância na faixa do IVP apresentarão maiores valores da feição *Greenness*, como é o caso dos estágios SS1

e SS2. Em florestas mais maduras, a reflectância na banda TM4 diminui, como foi observado na seção anterior, fazendo com que o *Greenness* também diminua (MORAN et al., 1994; STEININGER, 1996). Já a feição *Wetness* destaca o contraste entre as bandas do visível com bandas do IVM (TM5 ou TM7). Já foi mencionado que a diminuição da reflectância nas imagens das bandas TM5 e TM7 pode estar relacionada ao aumento do sombreamento causado pelo ganho de complexidade na estrutura vertical de florestas em estágios mais avançados. Com o aumento das sombras, a reflectância no visível e no IVP são relativamente maiores que nas bandas do IVM (CRIST et al., 1986). A feição *Wetness* aumenta em dosséis sombreados, pois os coeficientes para as bandas do IVM são negativos (HELMER et al., 2000). Isso explicaria o aumento nos valores desta feição com o avanço dos estágios sucessionais.

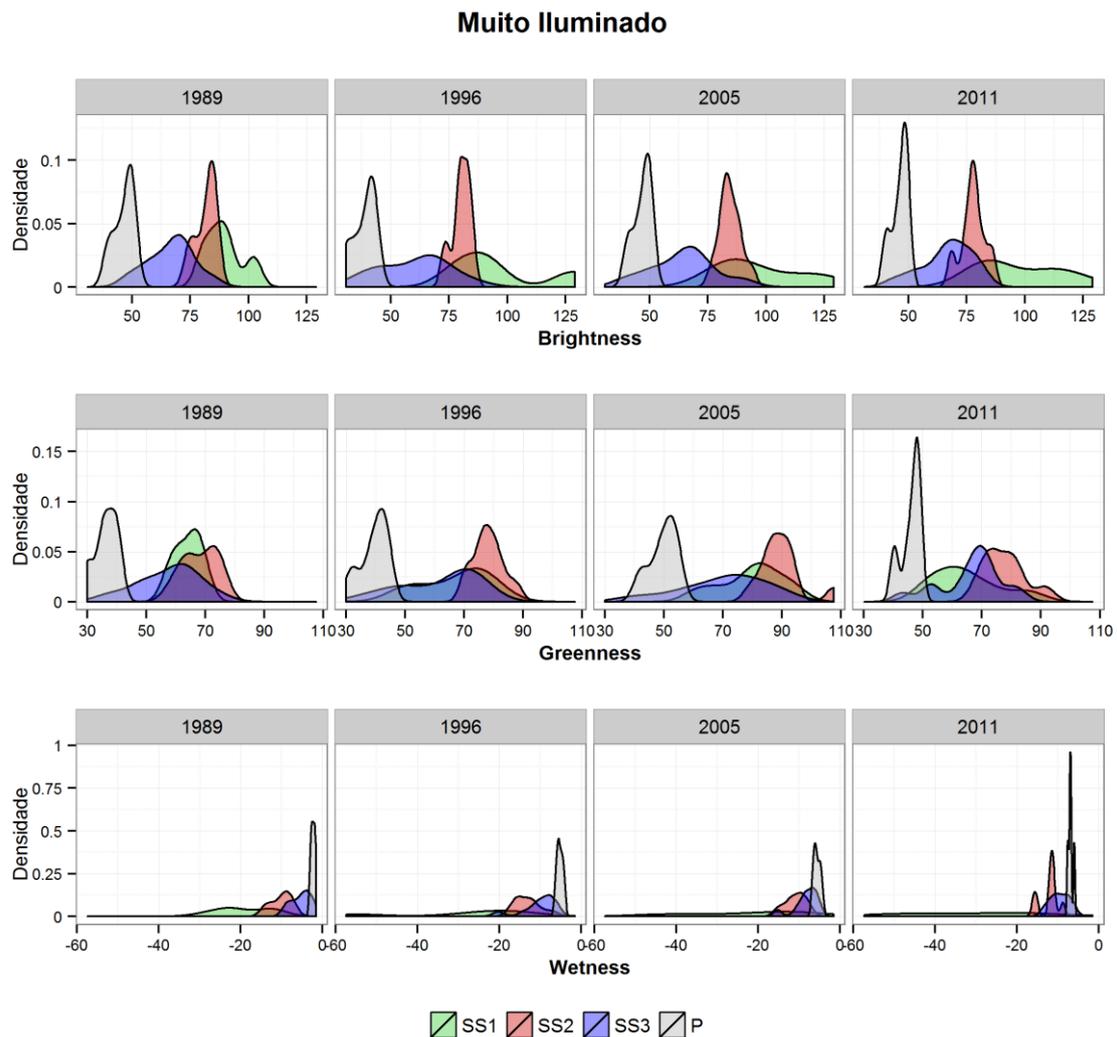
A Figura 5.4 também ilustra a diferença das médias existentes para cada estágio sucessional ao longo dos anos. Era esperado que as médias de um mesmo estágio em uma feição seguissem tendência retilínea entre os anos, porém é possível observar que nem sempre isso ocorreu. Na imagem *Greenness* de 2005, por exemplo, os valores parecem estar superestimados. Existe a possibilidade da ocorrência de erros na classificação dos polígonos, mas como esses resultados tratam-se de médias englobando diversos polígonos, o erro na classificação de um ou dois não poderia explicar as diferenças observadas.

Imagens adquiridas em datas diferentes possuem variações espectrais. Essas variações podem ser relacionadas a diversos fatores. A variação no ângulo de iluminação é um dos fatores, porém, como os polígonos foram selecionados na mesma classe de iluminação ao longo dos anos, o efeito deste fator seria minimizado. Ainda que dentro de uma mesma classe exista mais de um nível de iluminação, a influência que isso exerceria sobre a variação ao longo dos anos seria menor do que possíveis diferenças radiométricas existentes entre as cenas. Somente a correção atmosférica e o cuidado na adoção da defasagem de tempo de 2 meses na aquisição das cenas não foram suficientes para garantir uniformidade satisfatória entre as cenas. Além disso, o próprio processo de correção atmosférica é capaz de inserir incertezas, alterando o dado original de maneira indesejável. Mesmo sendo difícil determinar a causa das diferenças observadas entre as cenas, diferenças radiométricas inseridas por etapas do processamento ou até pela falta de algum procedimento de normalização parecem ser as razões mais plausíveis. Há de se considerar ainda que se tratam de diferenças radiométricas relativamente sutis entre

formações vegetais muito similares fitofisionomicamente, tornando possível mensurarmos dinâmicas espectrais explicadas por outros fatores que não somente aqueles relacionados às alterações estruturais dos dosséis espectrais aqui avaliados.

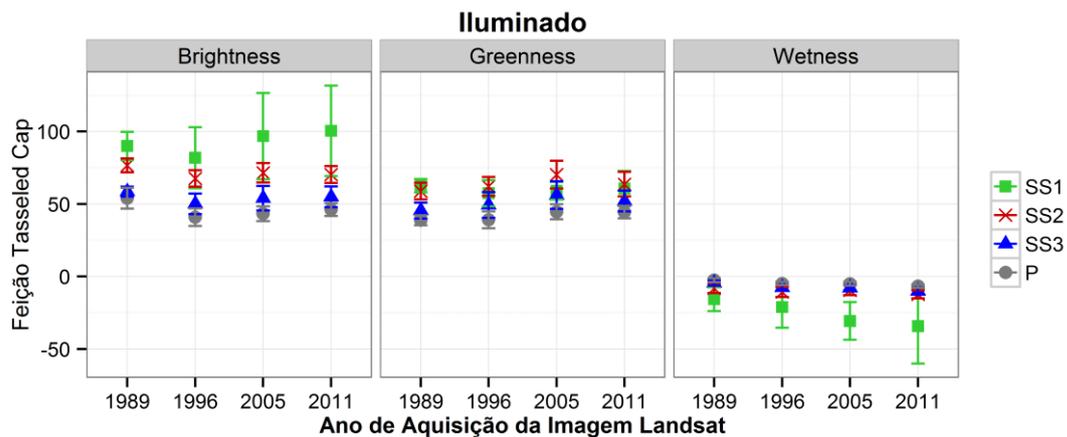
Analisando o histograma de densidades (Figura 5.5), é possível observar a sobreposição e a distribuição dos dados de cada feição na classe de iluminação MI. A sobreposição parece ocorrer com os quatro estágios sucessionais considerados, não havendo um que se destacasse quanto à sua separabilidade. A presença de *outliers* no conjunto de dados descaracteriza o aspecto uniforme do histograma, como pode ser observado com frequência nos estágios P e SS2. Esses *outliers* podem refletir pixels, ou parte dos polígonos que representam outros estágios que não aqueles no qual foram classificados, comuns nas bordas dos polígonos. O estágio SS1 mostrou grande amplitude dos dados nas três feições.

Figura 5.5 - Histograma de densidade de cada feição TC, considerando as imagens obtidas em diferentes datas, na classe de iluminação local Muito Iluminado.



A Figura 5.6 apresenta a dinâmica dos valores médios de *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* de cada estágio sucessional ao longo do tempo, na classe de iluminação I. O Apêndice D contém os valores das médias para cada feição na classe I, considerando cada estágio sucessional, bem como valores de desvio padrão e intervalos de confiança.

Figura 5.6 - Comportamento espectral dos estágios sucessionais em diferentes datas sob a condição de iluminação local Iluminado.

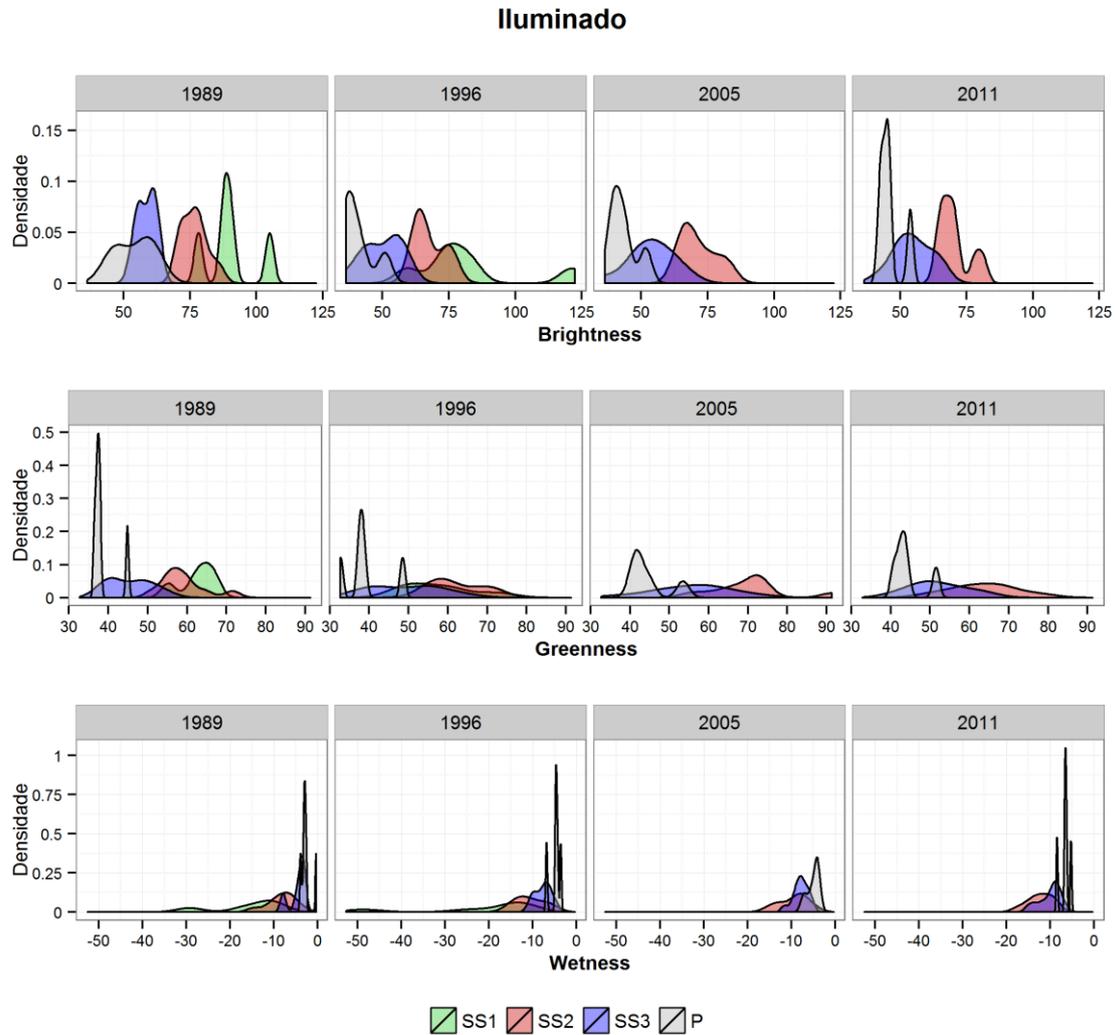


O mesmo padrão de ordenamento dos estágios sucessionais no espaço TC obtido para a classe MI pode ser observado na classe I. Uma exceção ao padrão também foi encontrada neste caso; na imagem *Greenness* de 1989, a média do estágio SS1 superou a do SS2. Os estágios se encontram ainda mais aglomerados na feição *Wetness* em comparação com a classe MI. O estágio SS1 se distinguiu facilmente, principalmente, nas feições *Brightness* e *Wetness*, e pareceu ser mais sensível às mudanças ocorridas na cena ao longo do tempo. Esse mesmo estágio apresentou desvios padrões maiores do que os outros estágios, nas três feições, reforçando que se trata de um estágio mais susceptível à incorporação de incertezas em sua definição.

Analisando o histograma de densidades (Figura 5.7), é possível observar a sobreposição e a distribuição dos dados de cada feição na classe de iluminação I. Mais uma vez, a sobreposição pareceu ocorrer com os quatro estágios sucessionais considerados, não havendo um que se destacasse quanto a sua separabilidade. A presença de picos no histograma, principalmente nos estágios SS1 e P, continuam presentes e são mais frequentes nesta classe de iluminação. Após a reclassificação dos polígonos de acordo com suas dinâmicas sucessionais ao longo dos anos, nos últimos dois anos considerados,

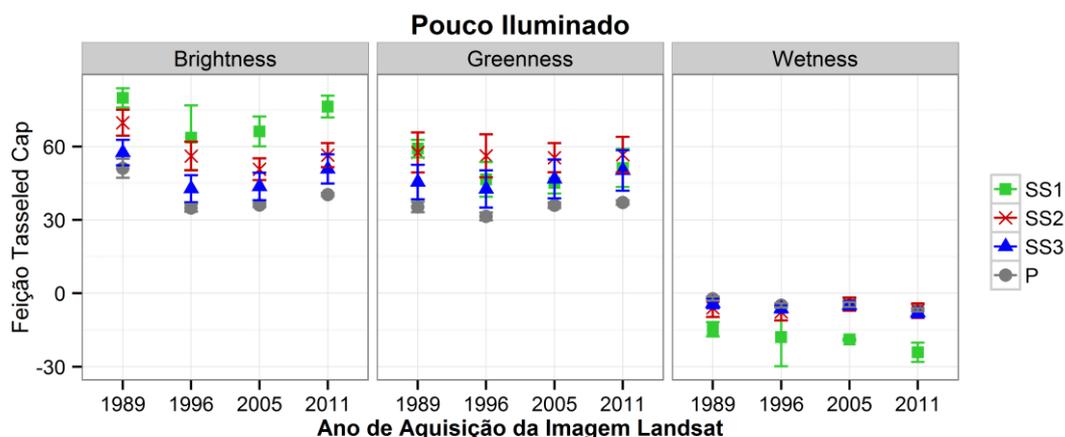
sobraram somente dois polígonos no estágio SS1 para a classe I, número insuficiente para o cálculo de densidade pelo algoritmo utilizado do aplicativo R.

Figura 5.7 - Histograma de densidade de cada feição TC, considerando as imagens obtidas em diferentes datas, na classe de iluminação local Iluminado.



A Figura 5.8 apresenta os valores médios de *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* de cada estágio sucessional ao longo do tempo, na classe de iluminação PI. O Apêndice D contém os valores das médias para cada feição na classe PI, considerando cada estágio sucessional, bem como valores de desvio padrão e intervalos de confiança.

Figura 5.8 - Comportamento espectral dos estágios sucessionais em diferentes datas sob a condição de iluminação local Pouco Iluminado.

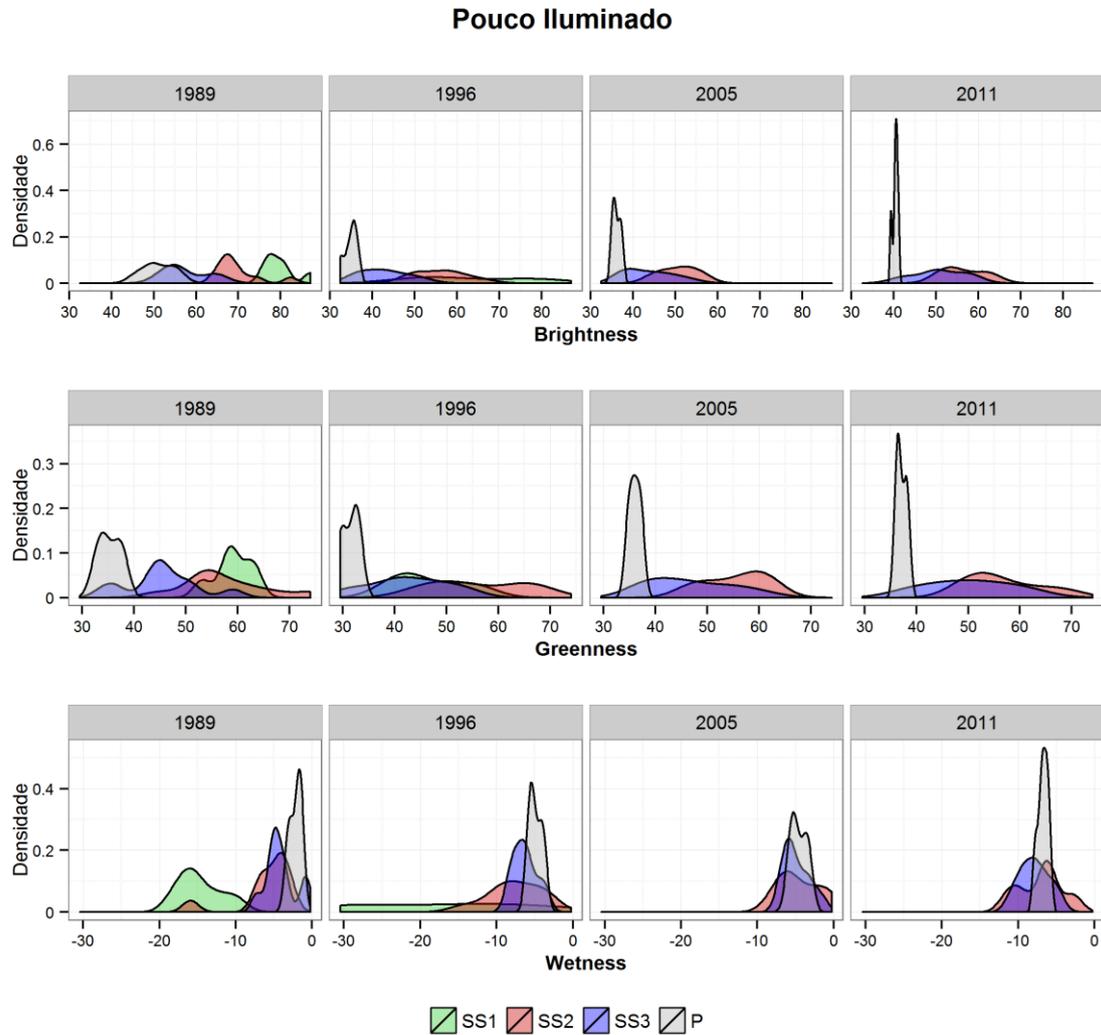


O mesmo padrão de ordenamento dos estágios sucessionais no espaço TC obtido para as classes MI e I pode ser observado na classe PI. Porém, esta apresenta maior número de exceções a esse padrão. Foi possível observar que com a diminuição da iluminação, o padrão se torna mais flexível, registrando maior número de inconsistências em classes de pouca iluminação. As exceções foram registradas nas feições *Greenness* e *Wetness*, como será apresentado mais adiante no texto (Figura 5.21, quadros laranja). Na imagem *Greenness* de 1989, a média do estágio SS1 superou a do SS2, e na de 2005 a média de SS3 foi maior que a de SS1. Na imagem *Wetness* de 2005, os valores do estágio SS2 foram maiores que os dos estágios SS3 e P. O mesmo acontece para a imagem *Wetness* de 2011. Os estágios se encontram bastante aglomerados na feição *Wetness*. O estágio SS1, como nas outras classes de iluminação, apresenta comportamento menos retilíneo e apresenta desvios padrões maiores como já explicado anteriormente. A heterogeneidade entre as cenas também parece ocorrer nesta classe de iluminação.

Analisando o histograma de densidades (Figura 5.9), é possível observar a sobreposição e distribuição dos dados de cada feição na classe de iluminação local PI. Na classe PI também foi observada intensa sobreposição dos histogramas. Nessa classe, picos presentes principalmente em P, foram maiores quando comparados às outras classes de iluminação. Os grandes picos encontrados em P traduzem estreita distribuição dos dados neste estágio, ao contrário com o que acontece no estágio SS1. Os *outliers* foram registrados somente para a cena de 1989, nas três feições. Após a reclassificação dos polígonos de acordo com suas dinâmicas sucessionais ao longo dos anos, nos últimos dois

anos considerados, sobraram somente dois polígonos no estágio SS1 para a classe PI, número insuficiente para o cálculo de densidade pelo algoritmo utilizado do aplicativo R.

Figura 5.9 - Histograma de densidade de cada feição TC, considerando as imagens obtidas em diferentes datas, na classe de iluminação local Pouco Iluminado.

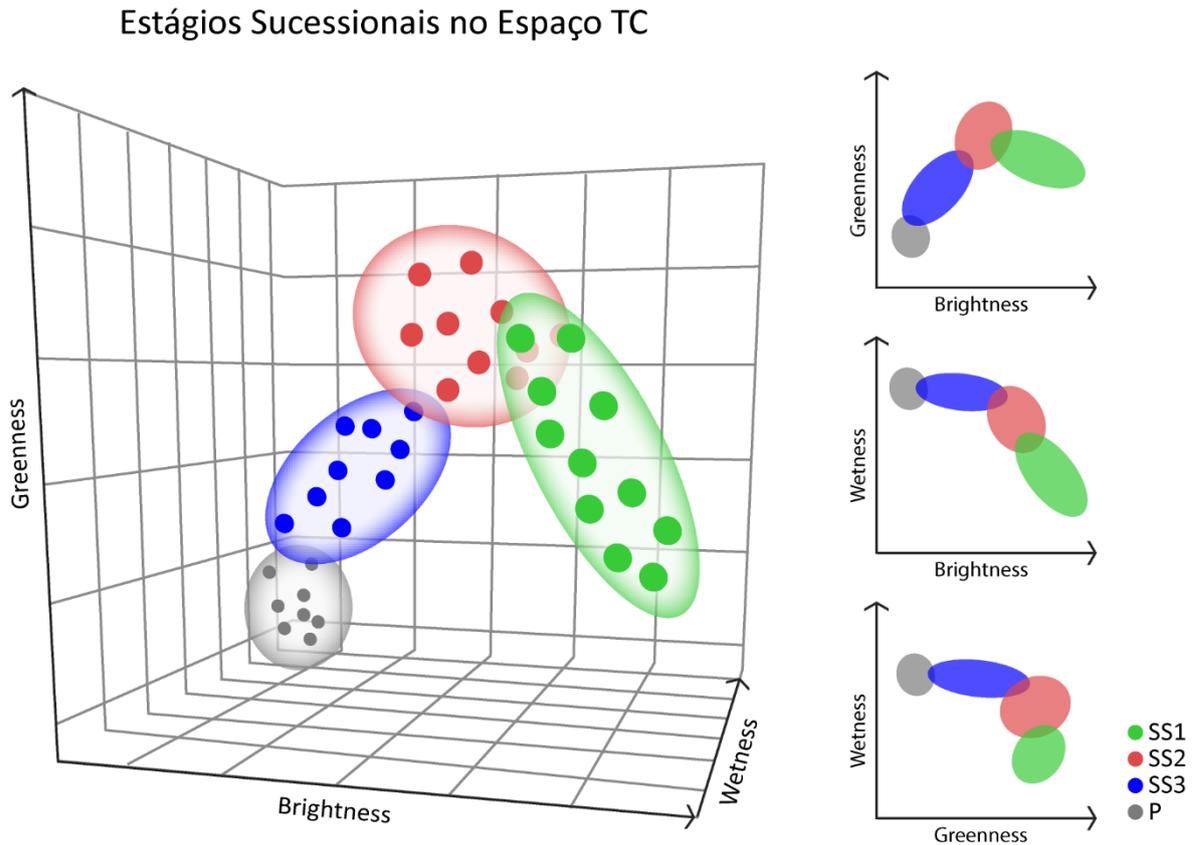


Os resultados obtidos para as três classes de iluminação corroboram com o comportamento espectral no espaço TC de florestas secundárias e primárias observado por Galvão et al. (2015). Nesse trabalho, os autores observaram maiores valores de *Brightness* comparados aos de *Greenness* em florestas primárias e secundárias; maiores valores de *Brightness* e *Greenness* para florestas secundárias comparado às florestas primárias; e decréscimos dos valores de *Brightness* e *Greenness* com o amadurecimento das florestas secundárias. Os autores utilizam a cronosequência para avaliar o comportamento espectral destas feições ao longo da sucessão florestal, porém, não distinguiram os estágios sucessionais em si.

5.2.2.2 Etapa 2

Como resultado da análise de caracterização espectral dos estágios sucessionais da Etapa 1 foi possível traçar um padrão do posicionamento dos estágios sucessionais no espaço TC, que está ilustrado na Figura 5.10.

Figura 5.10 - Figura esquemática do padrão de distribuição dos estágios sucessionais no espaço TC.



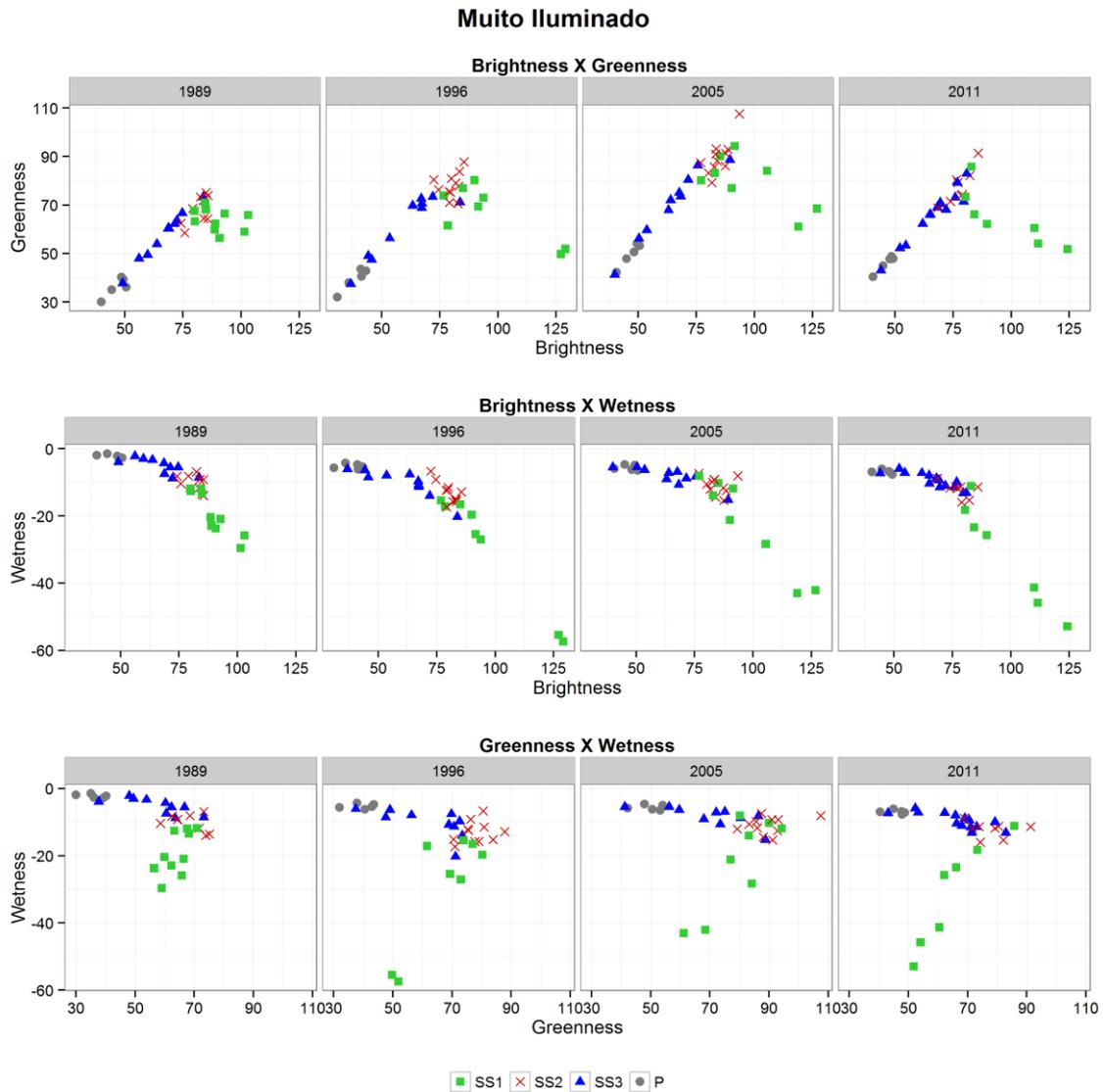
Para as três classes de iluminação, o estágio sucessionais SS1 apresentou maior amplitude na distribuição de seus dados nos eixos *Brightness* e *Wetness*. Os valores elevados de *Brightness* no estágio SS1 refletiram possível influência do substrato na reflectância espectral deste alvo. O estágio SS1 consiste em uma vegetação mais rala e esparsa, permitindo assim participação do substrato na resposta espectral do dossel. Os valores de *Greenness* foram menores para este estágio do que para o estágio SS2 possivelmente devido a menor quantidade de folhas, o que diminui o que é chamado de “verdor” da vegetação. Já a feição *Wetness*, que está ligada com a absorção de radiação nas faixas do infravermelho médio, reflete a baixa umidade que se concentra no estágio SS1.

Os estágios de regeneração seguintes ao estágio SS1 possuem valores de *Brightness* progressivamente menores devido à menor influência do substrato e ao incremento de sombra no dossel, resultado do desenvolvimento de inúmeras camadas foliares, diminuindo assim o brilho do alvo. Essa diminuição é acompanhada de aumento nos valores da feição *Wetness*, conforme o avanço sucessional, principalmente, ocasionado pela maior retenção de água nos tecidos vegetativos. A feição *Greenness* atingiu seu valor máximo no estágio intermediário, no qual já existe estrutura de dossel mais fechada, porém com pouca influência da componente sombra. Essa componente sombra aumenta progressivamente nos estágios sucessionais seguintes, fazendo com que os valores desta feição TC diminuam.

As Figura 5.11, 5.13 e 5.15 apresentam a dinâmica sucessional de polígonos, nas classes de iluminação MI, I e PI, respectivamente. Cada polígono foi representado por um ponto, sendo este o resultado da média de todos os pixels dentro do polígono. A disposição destes pontos pode ser comparada ao padrão traçado acima e analisado quanto à sua consistência em relação ao mesmo.

Em geral, para a classe MI, os polígonos se posicionaram como esperado no espaço TC (Figura 5.11). A confusão, principalmente entre os estágios SS1 e SS2, foi nítida nas três feições. A partir de 1996 alguns polígonos do estágio SS1 se distanciaram da nuvem de pontos apresentando valores de *Brightness* mais altos e de *Greenness* mais baixos. Isso acontece, por exemplo, quando a vegetação do estágio SS1 é suprimida, restando na maior parte substrato. Um dos polígonos classificados inicialmente como SS3 parece estar sendo confundido com P, e com o passar dos anos esse polígono apresenta dinâmica que sugere avanço no processo de sucessão ecológica.

Figura 5.11 - Dinâmica dos estágios sucessionais no espaço TC na condição de iluminação local Muito Iluminado.



A Figura 5.12 apresenta o espectro temporal no espaço TC de cinco polígonos da classe de iluminação MI. A cor referente ao estágio sucessionais foi designada de acordo com a trajetória de cada polígono. A dinâmica observada no espectro temporal corrobora com o padrão esperado, para esta classe de iluminação. Apesar de pequena variação de *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* ao longo dos anos, o polígono PC8, o qual representa florestas primárias, não se confunde com outros estágios sucessionais. Os polígonos OC11 e OC18, inicialmente classificados em estágio SS1, avançam para o estágio SS2 nos períodos subsequentes. Esse avanço resulta em diminuição de *Brightness*, aumento de *Greenness* e *Wetness*.

Figura 5.12 – Espectro temporal de cinco polígonos exemplos da classe de iluminação Muito Iluminado.

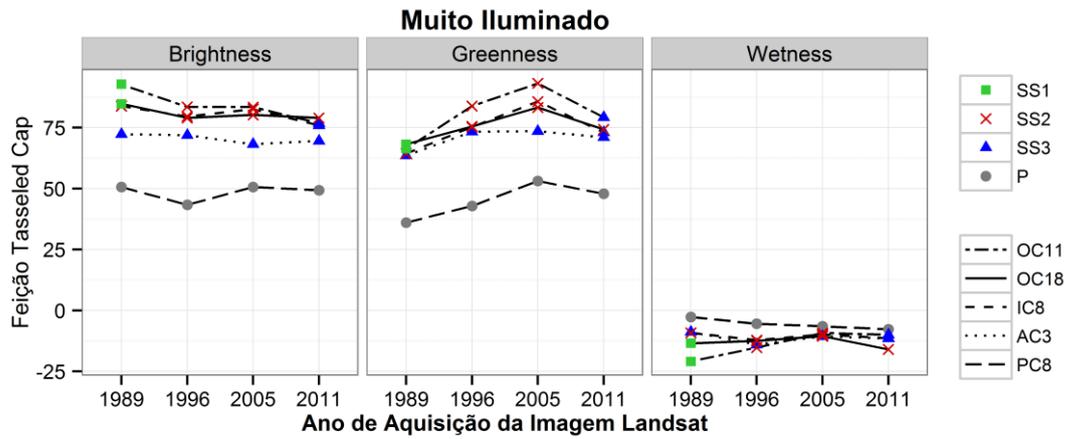
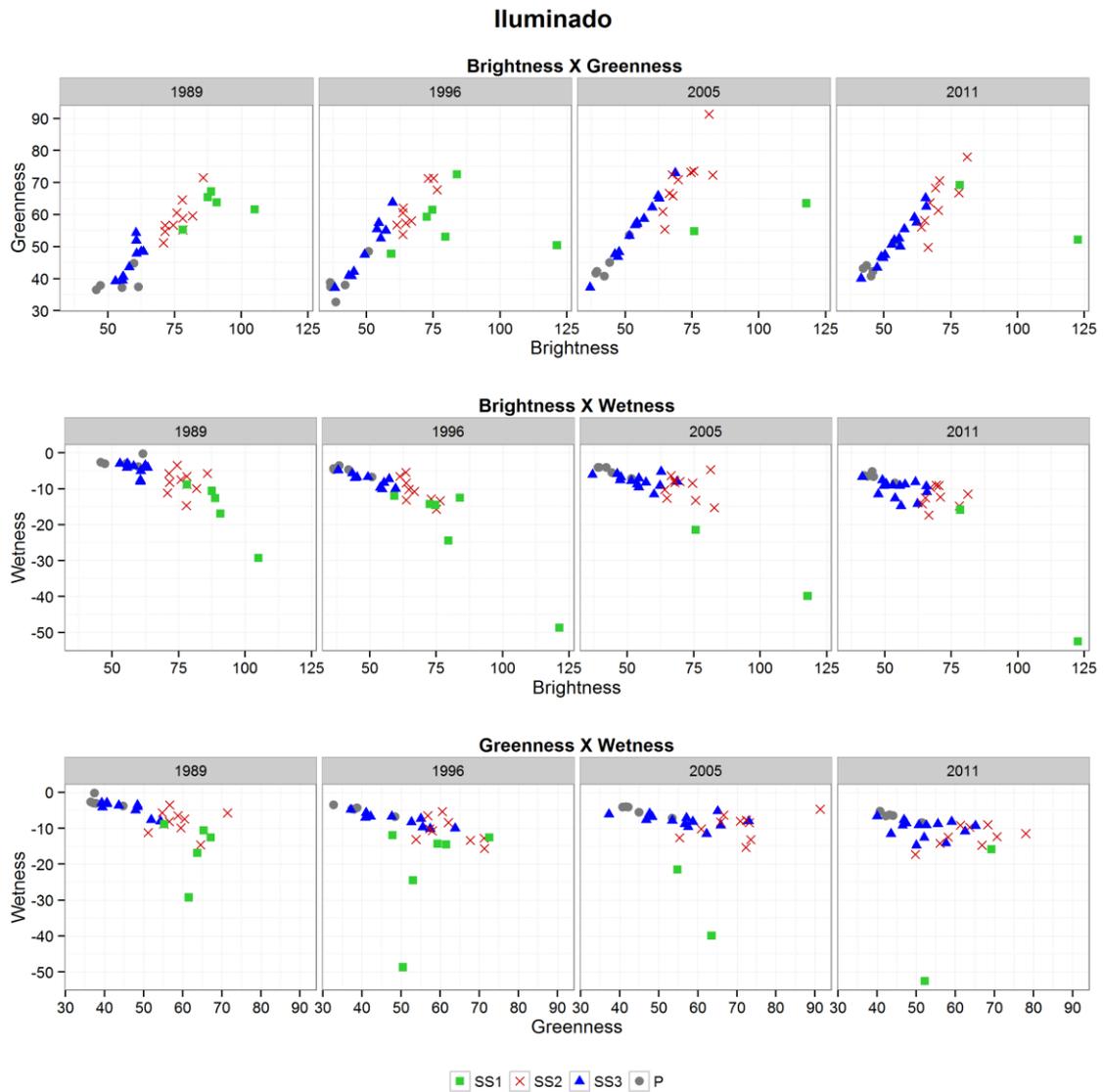


Figura 5.13 - Dinâmica dos estágios sucessionais no espaço TC na condição de iluminação local Iluminado.



O padrão esperado começa a se descaracterizar na classe de iluminação I (Figura 5.13). As nuvens de pontos de cada estágio pareceram estar mais dispersas, e as confusões intensificam entre os estágios. Os estágios SS3 e P encontraram-se bastante sobrepostos na feição *Wetness*. O estágio SS2 apresentou maior distribuição na feição *Greenness*. O estágio SS1 também se mostrou mais disperso, possuindo um polígono com dinâmica que sugere supressão da vegetação.

A descaracterização pode também ser observada no espectro temporal de cinco polígonos da classe de iluminação I (Figura 5.14). O polígono PM6, o qual representa florestas primárias em todos os anos, facilmente se confundirá com o polígono AM9, identificado em estágio SS3. Os valores de *Brightness* e *Greenness* para PM6 superam os valores de AM9, o que não é o esperado. Os valores de *Greenness* do polígono OM13, identificado em estágio SS1 nos anos 1989 e 1996, também superam os valores dos polígonos identificados em estágio SS2 para este período. Essa classe mostra-se então, mais susceptível a confusões entre estágios.

Figura 5.14 - Espectro temporal de cinco polígonos exemplos da classe de iluminação Iluminado.

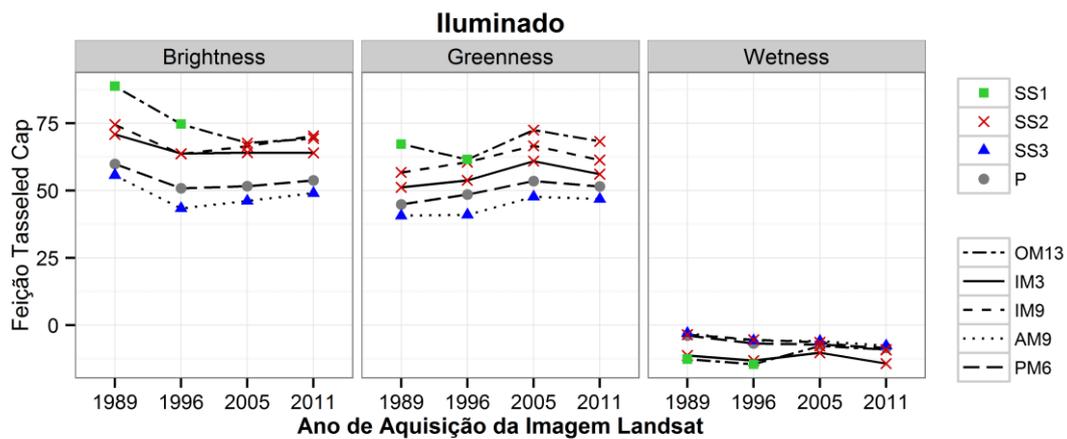
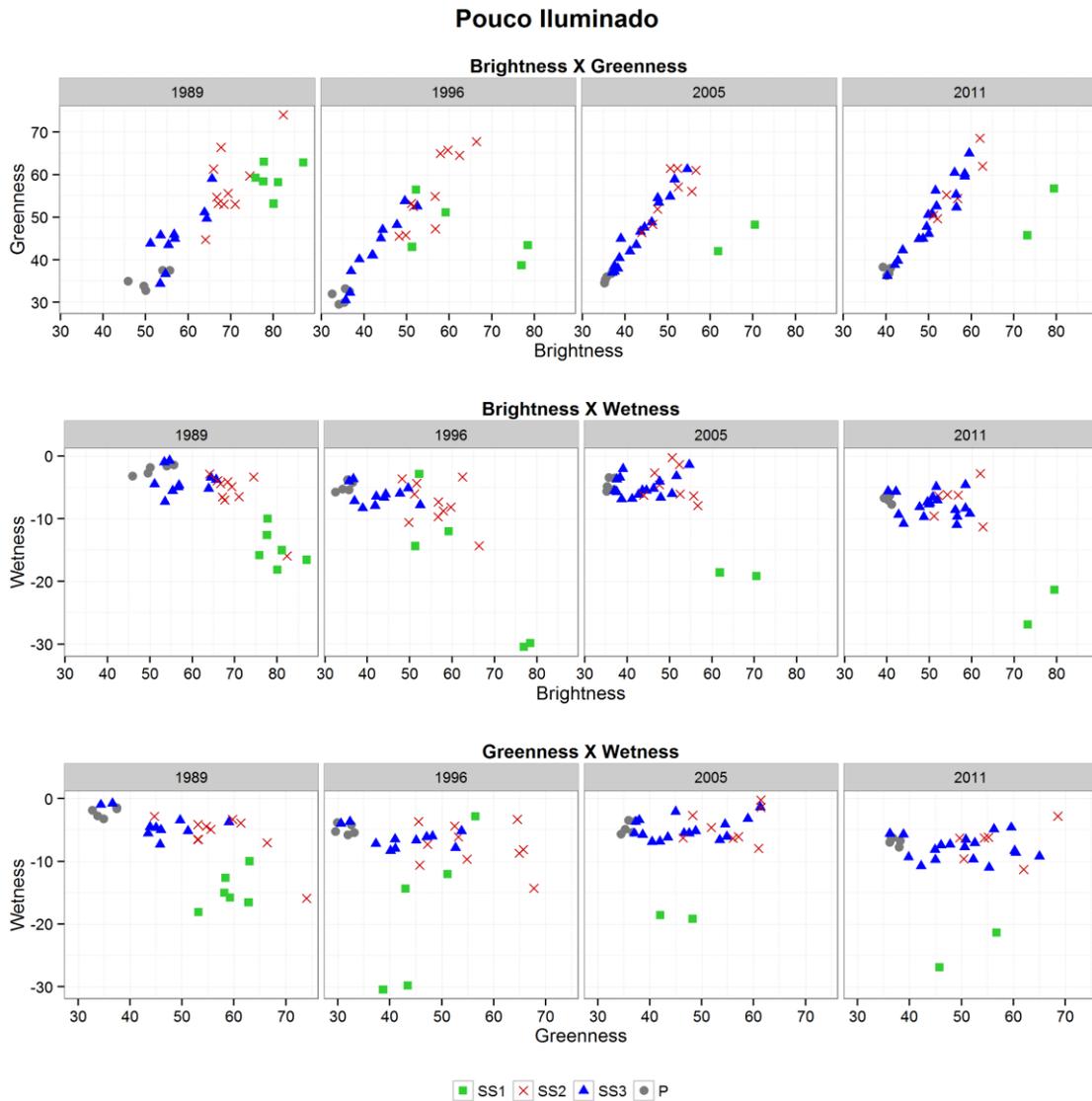
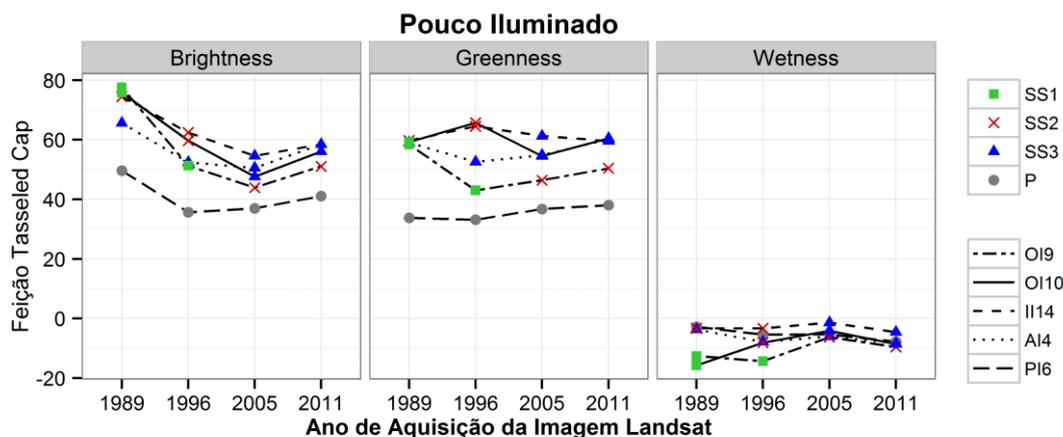


Figura 5.15 - Dinâmica dos estágios sucessionais no espaço TC na condição de iluminação local Pouco Iluminado.



A descaracterização do padrão esperado intensificou com a diminuição de iluminação para a classe PI (Figura 5.15). É possível observar que ocorreu tanto aumento da confusão entre os estágios, quanto possível maior equívoco na classificação visual dos polígonos. Por exemplo, considerando o gráfico central da Figura 5.15, na imagem de 1989, é possível que o polígono classificado como SS2, que se encontra dentre polígonos SS1, tenha sido classificado visualmente de maneira equivocada. Grande sobreposição também ocorre tanto entre SS3 e P, quanto SS2 e SS3. Para esta classe de iluminação local, a feição *Wetness* não se mostrou muito eficiente na separabilidade dos estágios, principalmente considerando os estágios mais avançados.

Figura 5.16 - Espectro temporal de cinco polígonos exemplos da classe de iluminação Pouco Iluminado.



A descaracterização pode também ser observada no espectro temporal de cinco polígonos da classe de iluminação PI (Figura 5.16). A partir do espectro temporal, é possível observar que nem sempre a dinâmica observada corrobora com a interpretação visual. Quando os polígonos são observados individualmente, o padrão esperado não parece ser generalizável. O polígono AI4, por exemplo, possui valores de *Greenness* maiores que o polígono OI9, o que foge do esperado. Essa classe de iluminação, como a classe I, mostra-se mais susceptível a erros de classificação e a confusões entre estágios.

Como também visto nas etapas anteriores, a confusão entre os estágios sucessionais, e os possíveis erros na classificação visual dos polígonos aumentam com a diminuição da iluminação. Sendo assim, o padrão esperado é melhor caracterizado na classe MI. Considerando a nuvem de pontos formada por médias de cada polígono foi possível observar uma dinâmica dos estágios sucessionais no espaço TC próxima ao que é esperado. No entanto, quando esses polígonos são analisados individualmente, o mesmo nem sempre ocorre. Quando a dinâmica sucessiona é observada focando em somente um polígono, mais inconsistências com o padrão esperado é observado.

Outros fatores que não as diferenças radiométricas entre as imagens e os erros de classificação podem aumentar a subjetividade na identificação dos estágios sucessionais. Apesar de ter sido tentado selecionar polígonos somente em áreas com vegetação que apresentavam pouca variabilidade fenológica, a fenologia ainda é um fator que pode ser considerado. Além disso, eventos atípicos, como secas ou meses muito chuvosos, também podem inserir na análise mais variáveis indesejáveis à caracterização espectral de alvos com tamanha similaridade estrutural. Assim como a seca, ou grande precipitação, a

fenologia altera o sinal refletido pela vegetação. Esses fatores influenciam diretamente o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes, a quantidade de folhas, e a estrutura interna das mesmas, fazendo com que o sinal captado pelo sensor se diferencie comparado a situação normal, de vegetação sadia. Esses fatores não foram quantificados no trabalho, no entanto, houve a preocupação de tentar minimizá-los, e é importante destacar que eles existem e que precisam ser levados em consideração.

5.3 Análises Quantitativas

Completando a abordagem qualitativa apresentada acima, o teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) foi adotado para acessar estatisticamente a separabilidade dos estágios dentro de uma mesma cena. Também foi testado se havia diferença significativa entre um mesmo estágio em cenas diferentes, considerando as feições TC.

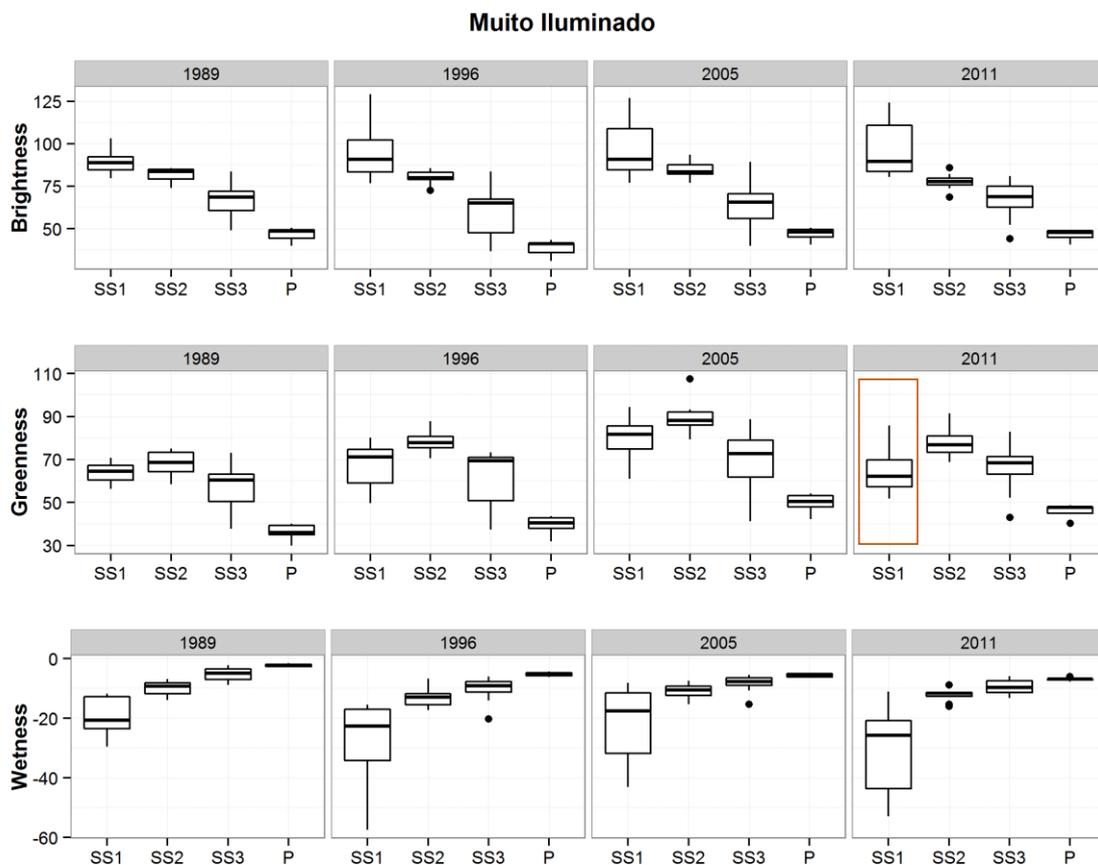
É esperado que as comparações entre os estágios em uma mesma cena resultem em valores de $p < 0,05$, isto é, diferença significativa entre as distribuições dos dados. Por outro lado, um mesmo estágio sucessional em diferentes cenas não deveria ter grandes mudanças na distribuição dos dados, sendo esperado um resultado não significativo ($p > 0,05$). Os valores de p para todas as comparações e classes de iluminação estão contidos no Apêndice E. A seguir são apresentados gráficos *boxplots* para análise visual da distribuição dos dados de cada estágio em cada classe de iluminação, seguidos de diagramas contendo os resultados do teste K-S. Nos gráficos *boxplots*, os quadros laranjas representam inconsistências possíveis de serem observadas visualmente, já mencionadas na seção 5.2.2.1.

5.3.1 Análise de Inconsistência por Kolmogorov-Smirnov

Outra forma de observar o padrão de distribuição dos dados de cada estágio sucessional nas três feições TC é através de gráficos *boxplots* (Figura 5.17, Figura 5.19 e Figura 5.21). Esses gráficos para as três classes de iluminação evidenciaram o mesmo padrão traçado nas seções anteriores. O estágio SS1 com os maiores valores de *Brightness* e maior amplitude na distribuição dos dados, seguido dos estágios SS2, SS3 e P, respectivamente; *Greenness* atinge seu máximo no estágio SS2 e decai com o avanço da sucessão ecológica; e os valores de *Wetness* crescem conforme o avanço sucessional. As exceções a esse padrão, já mencionadas na Etapa 1 da caracterização espectral no espaço TC, são evidenciadas nas figuras com quadros laranja. Os *boxplots* permitem analisar a dispersão

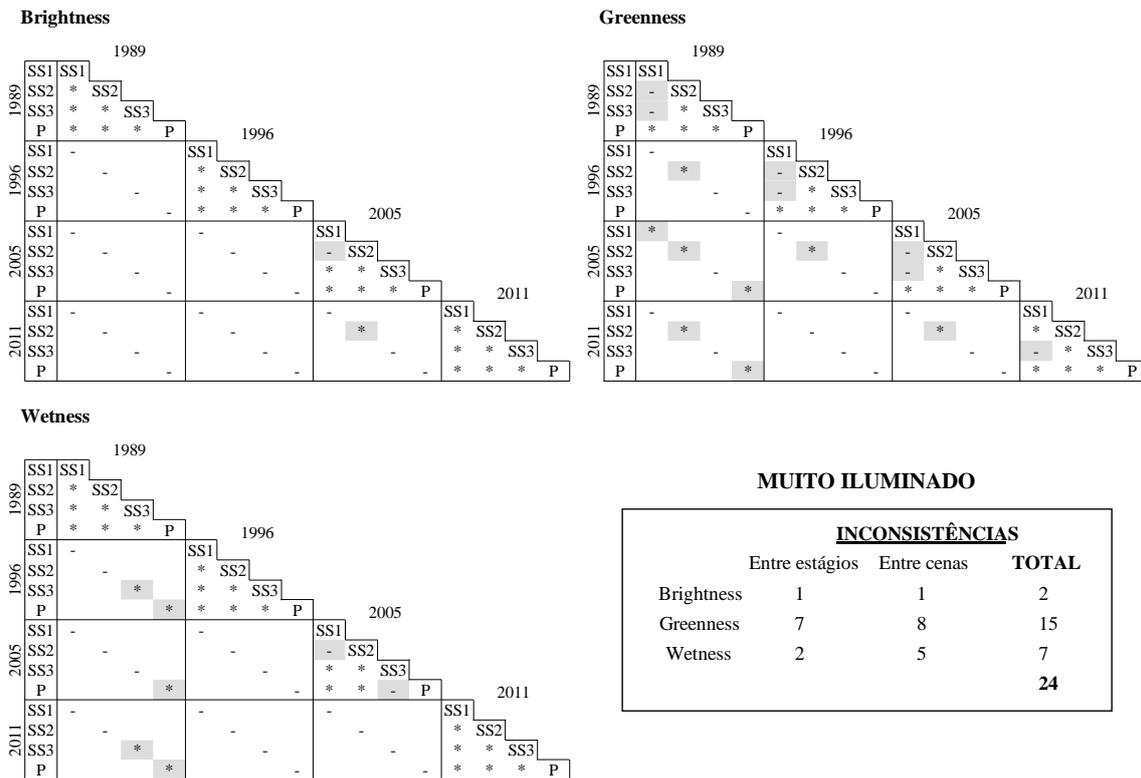
dos dados, servindo de indicativo de simetria, para a avaliação de *outliers*, e comparação de dados. Em geral, os dados se mostram bastante assimétricos, em alguns casos com presença de *outliers*. Na classe MI, é possível observar a grande amplitude da distribuição dos dados do estágio SS1, principalmente na feição *Wetness*. A presença de *outliers* ocorreu principalmente nos estágios SS2 e SS3 nesta classe.

Figura 5.17 - Boxplots considerando cada estágio em diferentes cenas na classe de iluminação Muito Iluminado. O quadro colorido destaca a inconsistência com o padrão esperado.



A Figura 5.18 apresenta um diagrama com os resultados do teste K-S para a classe de iluminação MI. Nesse diagrama, são apresentadas todas as comparações analisadas pelo teste. Nele, o símbolo (*) indica que $p < 0,05$, e (-) indica que $p > 0,05$. Um resultado perfeito para qualquer feição apresenta, então, (*) nas três diagonais superiores do diagrama, e (-) nas três inferiores. Qualquer mudança deste padrão é registrada como inconsistência.

Figura 5.18 - Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov aplicado às comparações possíveis entre estágios e entre imagens na classe de iluminação Muito Iluminado. (*) comparações nas quais o teste resultou valores de $p < 0,05$. (-) comparações nas quais o teste resultou valores de $p > 0,05$. (X) comparações não possíveis. Espaços brancos são comparações não feitas. Espaços com fundo colorido representam inconsistências entre o resultado estatístico e a interpretação visual na classificação dos estágios sucessionais. (A) *Brightness*. (B) *Greenness*. (C) *Wetness*.

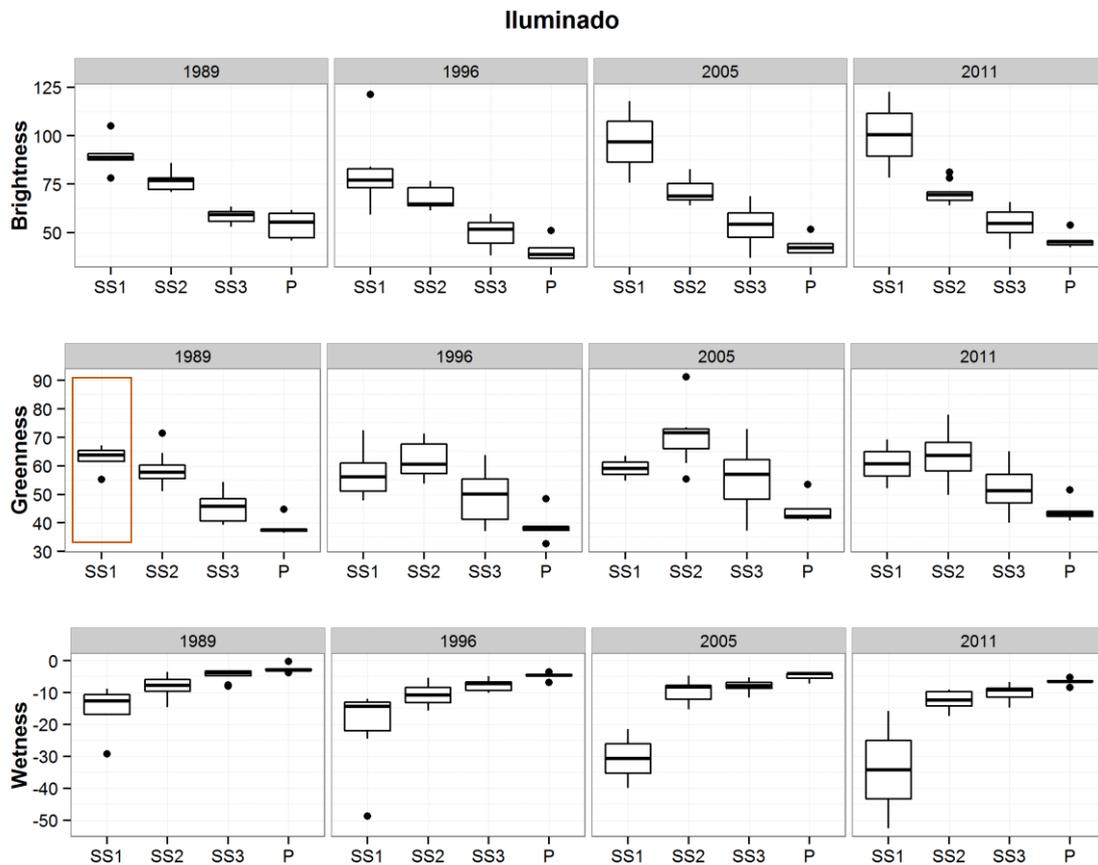


A feição *Greenness* apresentou maior número de inconsistências, sendo a maior parte registrada nas comparações entre cenas (datas). O estágio SS2 muitas vezes apresentou distribuição significativamente diferente entre as cenas. Para essa feição, o teste não foi capaz de distinguir o que foi classificado como SS1 e SS2 na maioria dos casos. Comparando a imagem *Wetness* de 1989 com as outras três, P apresentou diferenças significativas entre todas as cenas, e o estágio SS3 entre duas delas. Na classe de iluminação local MI, foram registradas, então, 24 inconsistências, sendo 10 entre estágios distintos em uma mesma cena e 14 entre o mesmo estágio sucessional em diferentes anos.

O *boxplot* referente à classe I é apresentado na Figura 5.19. Nele, é possível observar que os *outliers* ocorreram principalmente nos estágios SS1 e P. A amplitude da distribuição dos dados do estágio SS1, principalmente na feição *Wetness*, também ficou evidente. O

estágio SS3 apresentou grande distribuição na feição *Greenness*. Uma inconsistência foi registrada no padrão esperado para o estágio SS1 na feição *Greenness* na cena de 1989.

Figura 5.19 - Boxplots considerando cada estágio em diferentes cenas na classe de iluminação Iluminado. Quadros coloridos marcam inconsistência com o padrão esperado.

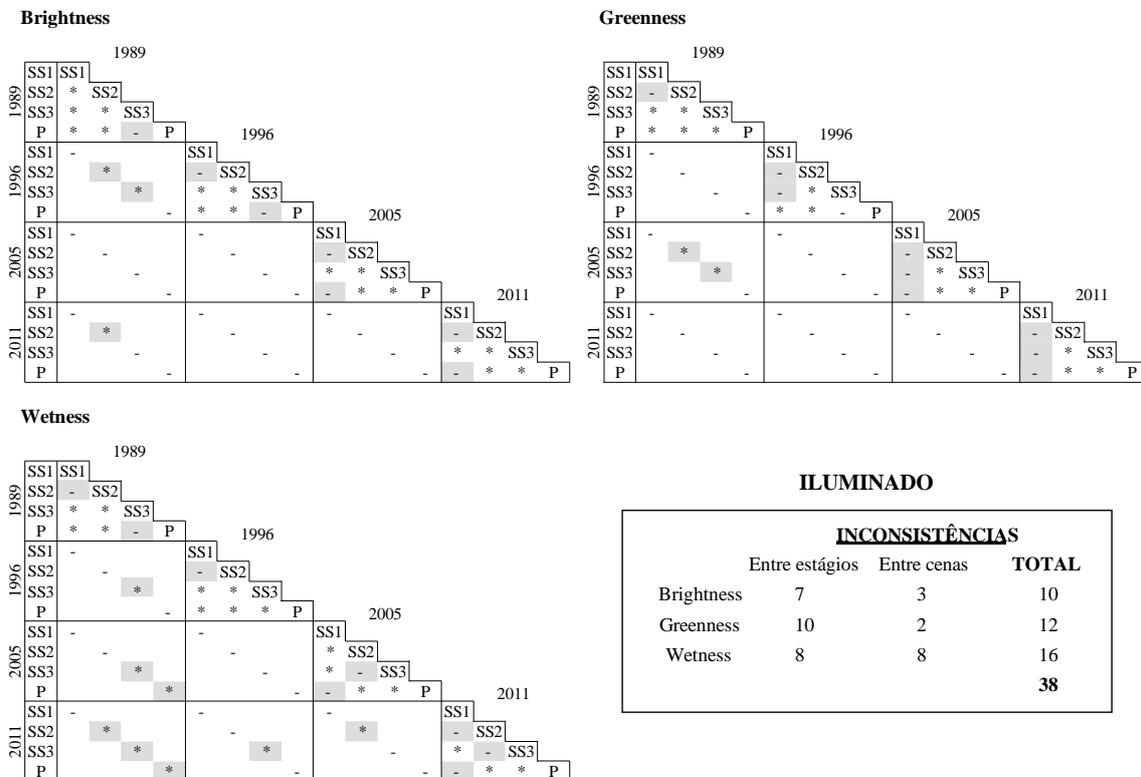


A Figura 5.20 apresenta um diagrama com os resultados do teste K-S para a classe I. A feição *Wetness* apresentou maior número de inconsistências, sendo a maior parte registrada nas comparações entre estágios. Os estágios SS2 e SS3 muitas vezes apresentaram distribuição significativamente diferente entre as cenas. Não foi possível distinguir os estágios SS3 e P na imagem *Brightness* de 1989 e 1996, e na de 1996, as distribuições dos estágios SS1 e SS2 também não apresentaram diferenças significativas. Nesta mesma feição, nos anos de 2005 e 2011 a confusão ocorreu entre os estágios SS1 e SS2, e SS1 e P. Essas confusões eram esperadas dada a subjetividade na definição de cada estágio sucessional. No entanto, a confusão entre SS1 e P não era esperada, já que consistem em dois extremos da sucessão ecológica. A confusão entre esses dois estágios também ocorre nas feições *Greenness* e *Wetness* nas cenas de 2005 e 2011.

Além destas confusões, na feição *Greenness* os estágios SS1 e SS2 também não registraram diferenças significativas entre nenhuma cena. Nos anos de 1996, 2005 e 2011 isso também ocorreu entre os estágios SS1 e SS3, e em 1996 entre SS3 e P. Apenas as imagens *Greenness* de 1989 e 2005 registraram inconsistência entre si, para os estágios SS2 e SS3. Já a feição *Wetness* apresentou inconsistências em quase todos as comparações entre cenas, sendo a maior parte delas registradas no estágio SS3. Nas comparações entre estágios, as inconsistências foram mais frequentes entre SS1 e SS2, e SS2 e SS3, além de SS1 e P.

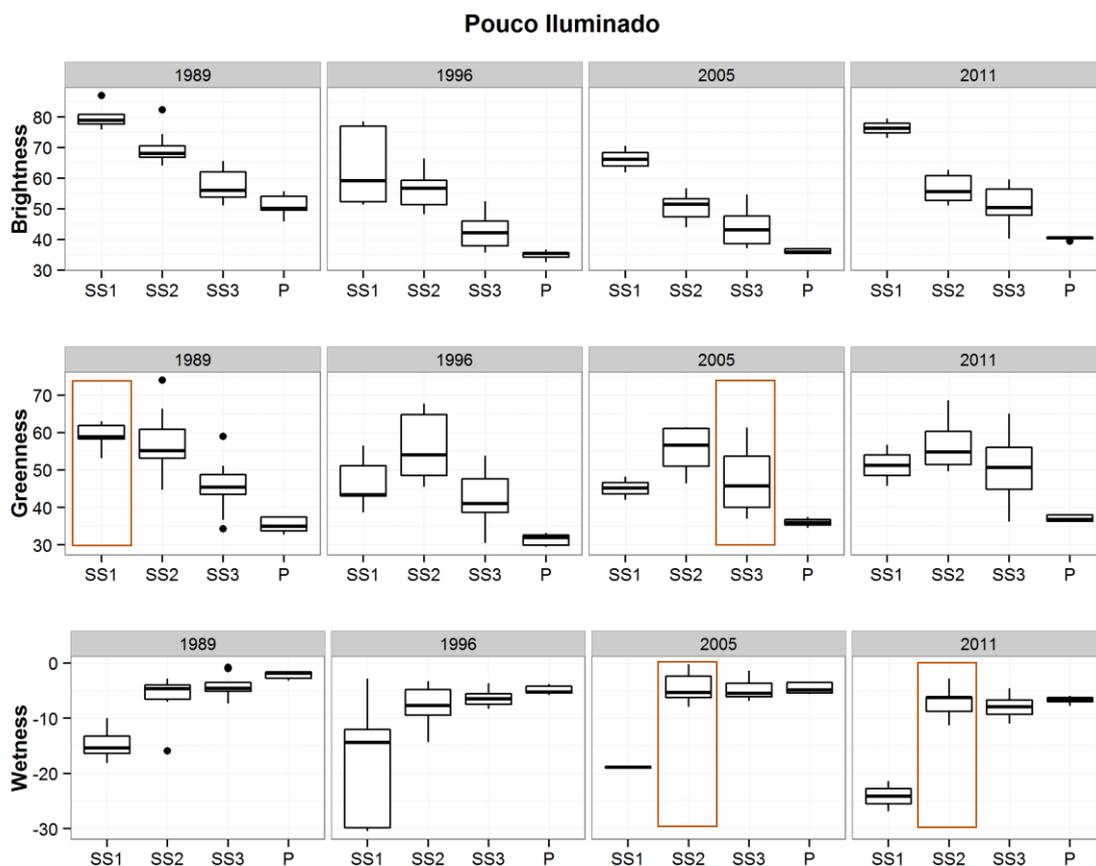
Na classe de iluminação I, foram registradas, então, 38 inconsistências, sendo 25 entre estágios distintos em uma mesma cena e 13 entre o mesmo estágio sucessional em imagens de datas diferentes.

Figura 5.20 - Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov aplicado às comparações possíveis entre estágios e entre imagens na classe de iluminação Iluminado. (*) comparações nas quais o teste resultou valores de $p < 0,05$. (-) comparações nas quais o teste resultou valores de $p > 0,05$. (X) comparações não possíveis. Espaços brancos são comparações não feitas. Espaços com fundo colorido representam inconsistências entre o resultado estatístico e a interpretação visual na classificação dos estágios sucessionais. (A) *Brightness*. (B) *Greenness*. (C) *Wetness*.



Para a classe de iluminação PI, os *outliers* ocorreram principalmente nos estágios SS2 e SS3 (Figura 5.21). A ampla distribuição dos dados observada no estágio SS1 nas classes de iluminação mais claras somente ocorre na cena de 1996. A classe de iluminação local PI apresentou mais inconsistências com o padrão do posicionamento dos estágios sucessoriais no espaço TC. Essas inconsistências foram registradas, principalmente, nas feições *Greenness* e *Wetness*. Na feição *Greenness* as inconsistências foram registradas nas imagens de 1989 e 2005, onde o estágio SS1 apresentou média mais alta que a do estágio SS2, e mais baixa que a do estágio SS3, respectivamente. Já para *Wetness*, as inconsistências foram registradas nas imagens de 2005 e 2011, ambas registrando valor médio do estágio SS2 maior que SS3.

Figura 5.21 - *Boxplots* considerando cada estágio em diferentes cenas na classe de iluminação Pouco Iluminado. Quadros coloridos marcam inconsistência com o padrão esperado.



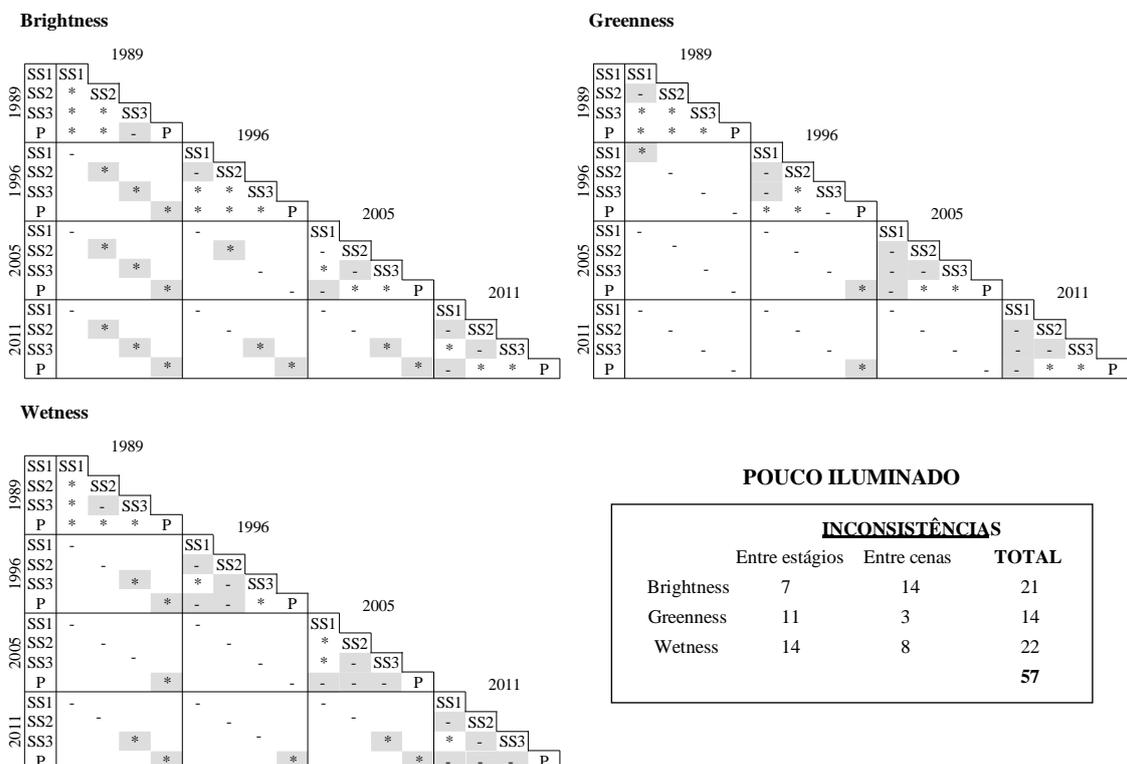
A Figura 5.22 apresenta o diagrama com os resultados do teste K-S para a classe PI. Nele, a feição *Wetness* apresentou maior número de inconsistências, sendo a maior parte registrada nas comparações entre estágios. A feição *Brightness* obteve maior número de inconsistências entre cenas. Para esta feição, os estágios SS2, SS3 e P tiveram

distribuições significativamente diferentes comparando a cena de 1989 com 1996, 2005 e 2011, e SS3 e P comparando as cenas de 1996 e 2005 com a de 2011. As inconsistências entre estágios são variáveis para esta feição, incluindo confusões entre SS1 e P, como foi observado na classe de iluminação I.

Já na feição *Greenness* a maior parte das inconsistências foi registrada entre estágios, envolvendo principalmente o estágio SS1, que é confundido com SS2, SS3 e até P. Na feição *Wetness* as inconsistências entre estágios expande também para os estágios SS2 e SS3, principalmente nas cenas de 1996, 2005 e 2011. Para esta feição, as inconsistências entre cenas ocorrem principalmente nos estágios SS3 e P.

Na classe de iluminação PI, foram registradas, então, 57 inconsistências, sendo 32 entre estágios distintos em uma mesma cena e 25 entre o mesmo estágio sucessional em cenas de datas diferentes.

Figura 5.22 - Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov aplicado às comparações possíveis entre estágios e entre imagens na classe de iluminação Pouco Iluminado. (*) comparações nas quais o teste resultou valores de $p < 0,05$. (-) comparações nas quais o teste resultou valores de $p > 0,05$. (X) comparações não possíveis. Espaços brancos são comparações não feitas. Espaços com fundo colorido representam inconsistências entre o resultado estatístico e a interpretação visual na classificação dos estágios sucessionais. (A) Brightness. (B) Greenness. (C) Wetness.



As inconsistências observadas nos *boxplots* (quadros laranja) também foram evidenciadas pelo resultado K-S. Todas as inconsistências registradas tiveram resultado não significativo na comparação entre o par de estágios em questão.

A Tabela 5.3 resume as inconsistências registradas no teste K-S por classe de iluminação. Houve um aumento de 45,8% nas inconsistências registradas na classe PI em relação a classe MI. É notável o aumento das inconsistências nas comparações das distribuições dos dados dos estágios sucessionais com a diminuição do nível de iluminação.

Tabela 5.3 – Contabilização das inconsistências geradas a partir da comparação de distribuições de dados entre estágios diferentes em uma mesma cena, e entre o mesmo estágio em imagens diferentes, considerando a classe de iluminação local.

	Muito Iluminado	Iluminado	Pouco Iluminado
Entre cenas	14	13	25
Entre estágios	10	25	32
TOTAL	24	38	57
%	33,3	52,7	79

As inconsistências registradas entre estágios foram maiores nas classes I e PI. Os resultados também sugerem que as diferenças radiométricas entre as cenas afetam mais a distinção dos estágios na classe PI. Como já esperado, a classe PI se mostra mais susceptível a erros, sendo estes causados pela diminuição da amplitude de distribuição dos dados, e conseqüentemente o aumento da subjetividade na identificação visual dos polígonos. A Tabela 5.4 detalha a quantificação das inconsistências por estágio sucessional.

Tabela 5.4 – Detalhamento da contabilização das inconsistências considerando os estágios sucessionais.

	ENTRE ESTÁGIOS			ENTRE CENAS			
	Muito Iluminado	Iluminado	Pouco Iluminado	Muito Iluminado	Iluminado	Pouco Iluminado	
TOTAL**	13,8 %	34,7 %	44,4 %	TOTAL*	19,4 %	18 %	34,6 %
SS1 X SS2	6,9 %	13,8 %	11 %	SS1	1,4 %	0 %	1,4 %
SS1 X SS3	5,5 %	4,2 %	4,2 %	SS2	8,3 %	6,9 %	5,5 %
SS1 X P	0 %	8,3 %	9,7 %	SS3	2,8 %	8,3 %	11 %
SS2 X SS3	0 %	2,7 %	11 %	P	6,9 %	2,8 %	16,7%
SS2 X P	0 %	0 %	4,2 %				
SS3 X P	1,4 %	5,5 %	4,2 %				

* Calculado a partir de um total de 72 comparações possíveis (6 combinações entre cenas x 3 feições TC x 4 estágios)

** Calculado a partir de um total de 72 comparações possíveis (6 combinações entre estágios x 3 feições TC x 4 cenas)

Outros fatores que não somente a iluminação também influencia o grau de confusão na distinção dos estágios, como similaridade de um estágio em particular com um alvo distinto, ou a ampla distribuição dos dados que aumenta a redundância. Essa redundância pode ter gerado a recorrente confusão incluindo o estágio SS1 nas comparações entre estágios. Como a identificação dos estágios sucessionais é bastante subjetiva, ampla variação nos dados, como ocorreu no estágio SS1, pode mascarar a mudança de estágio ou superestimar essa mudança. De qualquer forma, quanto maior a amplitude da distribuição dos dados de um estágio, mais este será susceptível a erros na identificação e detecção de dinâmica sucessional, devido a sutileza deste processo em termos espectrais. Os estágios SS3 e P por outro lado, não apresentaram essa redundância mencionada acima. No entanto, por serem bastante uniformes, mudanças sutis detectadas entre as cenas já são suficientes para aumentar o número de inconsistências. Esse número se torna ainda maior com a diminuição da iluminação.

Outro fator que deve ser considerado é o número de amostras. Apesar de inicialmente ter sido selecionado número mínimo de polígonos por estágio sucessional que fosse suficiente para os testes estatísticos, após a reclassificação deles ao longo do tempo de acordo com a dinâmica sucessional sofrida por cada um, o estágio SS1, principalmente, ficou com um número reduzido de amostras. Nos anos de 2005 e 2011 para as classes I e PI, por exemplo, o estágio SS1 apresentou somente duas amostras. P possuiu cinco amostras em todas as classes de iluminação e em todos os anos. Embora visualmente distintos de outros estágios nos *boxplots*, o teste K-S pode não ter sido capaz de distinguir esses estágios de outros devido ao número de amostras. Ou ainda, com número reduzido de amostras, os estágios podem possuir a mesma distribuição de dados, porém, pareceram distintos graficamente. Esse fator pode explicar confusões não esperadas como entre SS1 e P. Além disso, as inconsistências ainda podem ser explicadas pela sensibilidade do teste utilizado. Apesar de visualmente distintos nos *boxplots*, as distribuições de diferentes estágios podem não ter apresentados diferenças significativas de acordo com o teste K-S, pois a variação na estrutura do dossel pode não alterar o sinal suficientemente a ponto de ser sentido pelo teste estatístico, considerando o tipo de dado utilizado. Sendo assim, diferenças nos padrões de textura, tonalidade e cor entre os estágios sucessionais podem permitir ao intérprete a sua diferenciação visual, mesmo que a estatística se oponha a essa classificação.

Considerando as três classes de iluminação, a feição *Greenness* foi a que apresentou o maior número de inconsistências. Não houve concentração destas inconsistências em uma cena específica.

5.3.2 Análise do deslocamento no espaço TC

O deslocamento no espaço TC foi avaliado quanto à sua consistência com o que é esperado. Vale lembrar que nesta análise os polígonos foram agrupados de acordo com a dinâmica sucessional sofrida por eles. Todos os grupos de polígonos, incluindo aqueles nos quais não foi observada mudança de estágio sucessional, apresentaram deslocamento significativo no espaço TC nos respectivos períodos. Todos os grupos, portanto, apresentaram concentração de pontos em um ou mais octantes, sugerindo deslocamento no espaço TC.

A Tabela 5.5 apresenta os valores qui-quadrado para todos os intervalos considerados. As consistências aqui significam que a interpretação visual detectou dinâmica sucessional, que houve deslocamento significativo no espaço TC, e que esse deslocamento teve direção que corrobora com a respectiva dinâmica.

Tabela 5.5 - Valores de qui-quadrado do teste de deslocamento no espaço TC. Intervalos preenchidos com (-) não foram considerados. Resultados com fundo cinza apresentaram consistência entre interpretação visual, deslocamento e direção. O valor crítico tabelado de qui-quadrado é igual a 14,07.

		DINÂMICA						
INTERVALO		SS1-SS1	SS1-SS2	SS2-SS1	SS2-SS2	SS2-SS3	SS3-SS3	P-P
MUITO ILUMINADO	1989-1996	174,61	177,60	-	222,49	-	1117,69	888,22
	1989-2005	172,71	271,61	87,98	204,13	-	710,20	647,34
	1989-2011	210,02	335,77	135,79	189,06	202,13	1064,09	790,41
	1996-2005	396,72	88,67	181,40	388,44	-	495,39	691,84
	1996-2011	166,70	180,04	46,00	204,55	63,11	149,13	1170,73
	2005-2011	702,03	-	-	526,09	167,56	258,36	244,19
ILUMINADO	1989-1996	-	-	-	170,15	-	541,51	158,00
	1989-2005	-	-	-	60,66	196,92	721,19	345,59
	1989-2011	-	-	-	-	199,13	622,27	390,28
	1996-2005	-	-	-	58,71	115,41	146,81	102,28
	1996-2011	-	-	-	-	50,21	300,43	243,52
	2005-2011	-	-	-	70,00	-	253,82	87,38
POUCO ILUMINADO	1989-1996	103,98	-	-	196,10	-	1938,01	489,51
	1989-2005	-	95,49	-	45,74	124,85	802,73	263,08
	1989-2011	-	65,78	-	-	270,33	1353,27	342,77
	1996-2005	-	-	-	57,59	113,92	288,43	130,20
	1996-2011	-	-	-	35,68	98,24	1294,07	502,47
	2005-2011	-	-	-	144,41	-	919,86	266,73

Para os casos onde foi registrada dinâmica sucessional, além do teste significativo, a direção do deslocamento também foi analisada. Para estes casos, houve cinco consistências na classe MI e duas na classe PI. A classe I não registrou nenhuma consistência. As consistências na classe MI ocorreram em comparações entre as cenas de 1989 e 2011, e 1996 e 2011. Já para a classe PI, estas ocorreram entre cenas de 1989 e 2005, e 1996 e 2005. A Tabela 5.6 apresenta os valores de qui-quadrado, bem como o número de pontos em cada octante para os grupos de polígonos que registraram deslocamento e direção consistentes com a interpretação visual. Esse número de consistências representa somente 8,7% do total dos grupos de polígonos avaliados considerando as três classes de iluminação.

Tabela 5.6 – Número de pontos por octantes e valor de qui-quadrado para grupos de polígonos que registraram consistência. Quadros cinzas sinalizam octante que registrou maior número de pontos.

		OCTANTES								Qui-Quadrado	
		1	2	3	4	5	6	7	8		
MUITO ILUMINADO	1989-2011	SS1-SS2	77	7	0	9	86	34	0	0	335,77
		SS2-SS1	3	7	30	1	1	1	0	0	135,79
	1996-2011	SS1-SS2	1	1	0	3	40	2	2	32	180,04
		SS2-SS1	0	20	23	11	8	11	3	4	46
		SS2-SS3	4	4	1	9	19	8	1	26	63,11
POUCO ILUMINADO	1989-2005	SS2-SS3	6	2	0	10	28	0	0	33	124,85
	1996-2005	SS2-SS3	3	8	0	5	10	18	0	39	113,92

Para entender melhor o deslocamento significativo registrado em situações nas quais não houve dinâmica sucessional registrada pela interpretação visual, foi realizada a mesma análise utilizando um alvo que possivelmente se manteve invariante ao longo do tempo. Foi escolhida a superfície asfaltada de um aeroporto. Com exceção do intervalo de 2005 a 2011, que o deslocamento ocorreu em direção ao octante 3, todos os outros apresentaram deslocamento em direção aos octantes 1 ou 4. O deslocamento para esses octantes sugerem diminuição nos valores de *Brightness* e *Wetness*, e aumento (1) ou diminuição (4) de *Greenness*. Esses deslocamentos não são esperados, já que o alvo é supostamente invariante, e não há uma dinâmica sucessional padrão que se encaixe nesta situação. No entanto, esse deslocamento pode ser resultado da influência de fatores ambientais, como umidade e sazonalidade, ou simplesmente por diferenças radiométricas entre as cenas consideradas. Essa diferença espectral observada pode ser tratada como um *offset*, o que permite considerar a direção de deslocamento para os octantes 1 e 4, de acordo com o intervalo, igual ao de alvos invariantes, sugerindo assim que, da mesma maneira, grupos de polígonos que apresentem deslocamento para esta direção sejam tratados como invariantes.

Dos grupos de polígonos que não sofreram dinâmica sucessional, mas apresentaram deslocamento significativo, em torno de 41% também apresentaram deslocamento em direção aos mesmos octantes que o alvo invariante, de acordo com o intervalo considerado. Dos outros 59%, 27% apresentaram deslocamento em direção a octantes que sugerem que a interpretação visual pode ter sido equivocada (exemplos são dados na Tabela 5.7), e outros 32% apresentaram deslocamentos completamente inconsistentes.

Tabela 5.7 – Exemplos de grupos de polígonos sem dinâmica sucessional registrada por interpretação visual de imagens, e com deslocamento no TC que sugere o contrário. Quadros cinzas sinalizam octante que registrou maior número de pontos.

			OCTANTES								Qui-Quadrado
			1	2	3	4	5	6	7	8	
MUITO ILUMINADO	1996-2005	SS1-SS1	4	15	8	4	109	56	0	9	396,71
	1996-2011	SS2-SS2	4	38	6	48	20	22	1	86	204,54
		P-P	1	216	4	0	0	53	0	0	1170,2
ILUMINADO	1996-2005	SS3-SS3	9	55	0	9	19	41	0	15	146,81
	1996-2011	P-P	0	46	1	2	0	8	1	0	243,51
POUCO ILUMINADO	1989-2005	SS2-SS2	10	0	0	9	10	0	0	14	45,74
	1996-2011	SS3-SS3	4	292	36	9	5	84	3	1	1294,07

Três exemplos de grupos de polígonos que não registraram dinâmica através da interpretação visual, porém sofreram deslocamento no espaço TC, são apresentados para a classe MI. No primeiro exemplo, a grande maioria dos pontos é registrada no octante 5, o que sugere diminuição de *Brightness*, e aumento de *Greenness* e *Wetness* no intervalo de 1996 a 2005, situação que ocorre quando há dinâmica do estágio sucessional SS1 para o SS2. O segundo exemplo, apesar de apresentar distribuição mais homogênea dos pontos nos octantes, ainda concentra grande parte deles no octante 8, sugerindo o avanço do estágio SS2 para SS3. No último exemplo, ao invés de avanço do estágio, a concentração dos pontos no octante 2 sugere que houve retrocesso na sucessão, isto é, supressão da vegetação. Os polígonos que pertencem a esse grupo foram selecionados em área de abrangência da fitofisionomia Floresta Ombrófila Densa. Apesar de a Floresta Ombrófila Densa não apresentar muita variação fenológica, esta hipótese ainda pode ser levantada como explicação deste deslocamento.

Para a classe I são apresentados dois exemplos, o primeiro com uma distribuição mais uniforme, e o último com grande concentração dos pontos, ambos com a maioria dos pontos sendo registrado no octante 2. Esses exemplos seguem o raciocínio de retrocesso do estágio sucessional do último exemplo da classe MI. O último exemplo da classe PI também segue o mesmo raciocínio.

Para a classe PI são apresentados dois exemplos, sendo o primeiro deles com pontos concentrados, principalmente, em 3 octantes. O maior número é registrado no octante 8,

sugerindo que houve avanço de estágio sucessional, porém há também grande concentração no octante 1, o que sugere que houve pontos que podem não ter sofrido dinâmica sucessional. Uma vez que esses pontos representam pixels em diversos polígonos com a mesma trajetória sucessional, esse grupo de polígonos pode incluir pixels que não seguem a trajetória da maioria deles. Principalmente pixels que ocorrem nas bordas dos polígonos podem destoar quanto suas trajetórias.

Foram observados ainda grupos de polígonos que registraram certa dinâmica sucessional por interpretação visual, mas que a direção do deslocamento no espaço TC sugere outra dinâmica no respectivo intervalo. Poucos casos registraram consistência entre a dinâmica registrada por interpretação visual e a direção do deslocamento no espaço TC. A classe MI registrou a maioria desses casos.

Apesar da interpretação visual de imagens ser bastante subjetiva, as análises feitas mostraram que, de modo geral, os estágios classificados por este método possuem consistência com o que é esperado espectralmente deles. A caracterização espectral mostrou que é possível traçar um padrão de comportamento no espaço TC dos diferentes estágios. Esse padrão perde força com a diminuição do nível de iluminação. Quando a visão geral dos estágios é substituída por uma visão mais específica de cada polígono, o mesmo padrão nem sempre é registrado. O agrupamento de polígonos com a mesma trajetória sucessional também mostrou que nem sempre há consistência da dinâmica registrada pela interpretação e a direção do deslocamento no espaço TC. Fica evidente com os resultados que mesmo que polígonos possuam dinâmicas semelhantes, a localização, o entorno e as condições sobre as quais se encontram cada polígono pode influenciar a direção de seu deslocamento no espaço TC.

6 CONCLUSÃO

Nesta seção, são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados, além de recomendações pertinentes, de maneira a orientar trabalhos futuros sobre o tema. Mais uma vez é ressaltado que as conclusões aqui apresentadas são alinhadas somente ao produto TM/Landsat 5, e que possivelmente a troca dos dados de entrada as alterariam.

Os espectros de reflectância mostram que existe uma dinâmica espectral entre os estágios sucessionais, quando identificados por interpretação de uma série histórica de imagens, ainda que não haja dados que comprovem a relação destes estágios identificados com os parâmetros estabelecidos pelas resoluções CONAMA. Essa dinâmica é identificada considerando possíveis mudanças no teor de biomassa e aspectos texturais. Os espectros de reflectância de superfície corroboram com o esperado para uma curva espectral de vegetação. Diferenças são notáveis entre os estágios sucessionais, e também entre classes de iluminação. É possível observar padrão no comportamento espectral dos estágios, e esse padrão se torna mais flexível com a diminuição da condição de iluminação. Além disso, sob condição de iluminação MI, verificou-se que as curvas espectrais dos estágios sucessionais apresentam maior separabilidade.

A partir da caracterização espectral dos estágios no espaço TC, também foi possível observar um padrão, permitindo o delineamento de um padrão de posicionamento nesse espaço pelos estágios sucessionais. O padrão traçado se descaracteriza com a diminuição da iluminação. Apesar disto, a sobreposição ocorre entre todos os estágios e em todas as classes de iluminação local, o que mostra a grande subjetividade na classificação através da interpretação visual. As etapas de processamento das imagens também exercem influência no aumento da subjetividade conferida à identificação dos estágios sucessionais. Transformações radiométricas, como correção atmosférica, podem aumentar a variância total das cenas, levando a uma super ou subestimação na separabilidade dos estágios. Esse equívoco na estimação pode também ser causado por variação da angulação solar, de fatores climáticos, como precipitação, ou por variação fenológica no momento de aquisição da cena. As diferenças radiométricas entre as cenas podem possuir grandeza superior à tênue diferença entre os estágios, fazendo com que o comportamento espectral observado não possa ser atribuído somente a dinâmica sucessional.

A estatística foi adotada como suporte ao analisar as inconsistências entre o padrão traçado e o observado em cada classe de iluminação. Os testes estatísticos adotados sugerem um maior número de inconsistências do que as identificadas visualmente. A maioria das observações foi consistente, ou seja, estágios distintos obtiveram diferenças significativas de suas distribuições de dados. Apesar disto, o teste Kolmogorov-Smirnov muitas vezes sugere que diferentes estágios são provenientes de uma mesma distribuição amostral. Foi verificado que apesar de distinguíveis visualmente, o teste K-S não foi sensível o suficiente, ou o número de amostras grande o bastante, para separar significativamente os estágios em alguns casos, principalmente estágios com comportamentos espectrais mais próximos, como SS1 e SS2, e SS3 e P, dada a grande subjetividade na definição destes. As inconsistências observadas entre as cenas mais uma vez sugerem que estas precisam ser tratadas de forma a minimizar as diferenças que não são provenientes da dinâmica sucessional. As inconsistências aumentam com a diminuição da condição de iluminação, fazendo com que a classe PI tenha até 50% a mais inconsistências que a classe MI.

A análise de deslocamento no espaço TC sugere que existe um deslocamento dos pontos que não é proveniente da dinâmica sucessional sofrida, e sim por variações entre as cenas. A grandeza dessas variações pode ser maior do que a subjetividade da distinção entre os estágios, mascarando o que é observado nesta análise. Com isso, a dinâmica sucessional parece ter sido superestimada nesta análise, uma vez que mesmo grupos que não apresentaram dinâmica alguma registraram deslocamento significativo. Foi dada atenção, então, para a direção do deslocamento, fator que se tornou determinante para a análise de inconsistências. Analisando a direção do deslocamento foi possível observar que muitos grupos de polígonos retratados para certa dinâmica sucessional apresentaram deslocamento em direção que sugere outra dinâmica. Trabalhos mais detalhados são necessários para estabelecer qual das análises melhor retrata a verdade. Houve poucas consistências nesta análise, porém alguns ajustes são necessários para inferências melhores. A este ponto, a análise se mostrou promissora como suporte à interpretação visual, permitindo ao intérprete consulta ao cunho espectral da dinâmica sucessional concomitantemente ao processo de interpretação de imagens.

Voltando à pergunta inicial que motivou o trabalho, os resultados sugerem baseado na metodologia adotada, que é possível separar estágios sucessionais por interpretação visual de uma série histórica de imagens em fragmentos florestais do Domínio Mata Atlântica,

porém ressalvas precisam ser consideradas. A distinção entre os estágios, e consequentemente o padrão espectral esperado, depende da condição de iluminação da área a ser interpretada. Áreas mais claras permitem que a interpretação seja realizada de forma mais correta. Por outro lado, áreas mais escuras muitas vezes não fornecem informações suficientes para uma boa distinção entre os estágios, aumentando a subjetividade na definição dos mesmos. A metodologia por fatiamento em classes de iluminação local destacou a necessidade de diferentes condições de iluminação ser tratadas independentemente para minimizar a confusão causada por diferenças de orientação das vertentes existentes na área de estudo. A uniformidade entre as cenas utilizadas na definição dos estágios precisa ser avaliada, para que variáveis não provenientes da dinâmica sucessional sejam minimizadas. A distinção dos estágios, então, apesar de possível, depende da condição de iluminação e qualidade das imagens.

Portanto, empresas privadas e órgãos públicos quando solicitados para identificar estágios sucessionais no Domínio Mata Atlântica, em área com relevo acidentado e utilizando dados do sensor TM/Landsat 5, precisam incluir na metodologia diferenciação de classes de iluminação. A adoção da interpretação visual de imagens como metodologia de identificação dos estágios, requer maior atenção quando trabalhando em classes de iluminação mais escuras. Essas empresas ou órgãos precisam destacar a maior probabilidade de erros imposta por essas classes. A consulta ao comportamento espectral de cada estágio e análise do padrão apresentados por eles no espaço TC auxilia na detecção de anomalias e erros de classificação, sendo seu uso de grande valia.

Ao desenvolver o tema futuramente, algumas sugestões são apresentadas.

(a) Em relação à análise do deslocamento no espaço TC:

- Como foi observado um deslocamento padrão, que possivelmente não pode ser atribuído a dinâmica sucessional, os dados poderiam ser corrigidos em função deste *offset*, fazendo com que o deslocamento observado passasse a responder mais diretamente a dinâmica.

(b) Em relação ao produto e metodologia adotados:

- Como os resultados são diretamente ligados ao produto adotado, seria interessante testar novos produtos para avaliar se o padrão que foi observado para dados TM/Landsat 5 se repete em produtos de outra natureza. Para estudos mais detalhados, vale considerar comparações da melhoria das resoluções com a diminuição das inconsistências;
- A metodologia por fatiamento em classes de iluminação local foi adotada nesse trabalho, pois após testes (resultados não apresentados) com diferentes algoritmos de correção topográfica (Correção-C e Minnaert), esta técnica não se mostrou capaz de garantir a integridade espectral das imagens, considerando a variação topográfica extrema da área de estudo. Apesar disto, ressalva-se a importância do desenvolvimento ou aprimoramento de algoritmos deste tipo de correção para que a topografia possa ser de fato corrigida em estudos como este;
- As diferenças radiométricas entre imagens mencionadas neste trabalho podem ser tratadas por técnicas de processamento de imagens que os autores optaram por não implementar, porém seria interessante testar seus desempenhos. Uma destas técnicas, bastante utilizada é a normalização de imagens. O objetivo da normalização seria minimizar mudanças espectrais entre cenas causadas por diferenças na distância Sol-Terra, calibração do sensor, ângulo solar, condição atmosférica e geometria sol-alvo-sensor.

(c) Em relação à validação dos dados:

- Apesar de a identificação dos estágios sucessionais ser tão subjetiva quando realizada no campo quanto é utilizando interpretação visual de imagens, a relação entre campo e sensoriamento remoto é imprescindível para a validação dos resultados. Em estudos mais longos e detalhados poderia ser feito a relação entre a abordagem espectral com a biomassa e composição florística observada ao longo do tempo no campo;
- Com um nível maior de detalhamento pode-se, ainda, identificar os estágios em campo de acordo com as resoluções CONAMA, e avaliar o quanto essa identificação pode ser retratada espectralmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. P.; CHIARELLO, A. G.; MENDES, S. L.; MATOS, E. N. In: GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I. G. (Org.). **The Central and Serra do Mar corridors in the Brazilian Atlantic Forest**. Washington: Center for Applied Biodiversity Science, 2003. 118–132 p.
- ANDERSON, L. O. Biome-scale forest properties in Amazonia based on field and satellite observations. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 1245–1271, 4 maio 2012.
- ARROYO-MORA, J. P.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; KALACSKA, M. E. R.; RIVARD, B.; CALVO-ALVARADO, J. C.; JANZEN, D. H. Secondary forest detection in a neotropical dry forest landscape using Landsat 7 ETM+ and IKONOS imagery. **Biotropica**, v. 37, n. 4, p. 497–507, dez. 2005.
- BERNARDES, S. **Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta de Tapajós-Estado do Pará**. 1996. 117 p. (INPE-6890-TDI/651). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Sao Jose dos Campos, 1996. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YD6/GPfcV>>. Acesso em: 18 mar. 2016.
- BRASIL. **Decreto nº 750**, de 10 de fevereiro de 1993. Estabelece os parâmetros básicos para análise dos estágios de sucessão de Mata Atlântica. 1993. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=135>>. Acesso em: 10 jan. 2015.
- BRASIL. **Lei nº 11.428**, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. 2006. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20042006/2006/lei/11428.htm>. Acesso em: 10 jan. 2015.
- BREECE, H. T.; HOLMES, R. A. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves in vivo. **Applied Optics**, v. 10, n. 1, p. 119–127, 1971.
- BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 1, p. 34–42, 2011.
- BRONDIZIO, E.; MORAN, E.; MAUSEL, P.; WU, Y. Land cover in the Amazon estuary: Linking of the Thematic Mapper with botanical and historical data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, n. 8, p. 921–929, 1996.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. Tropical secondary forests. **Journal of Tropical Ecology**,

v. 6, n. 01, p. 1–32, 10 jul. 1990.

CASTRO, K. L.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; RIVARD, B. Monitoring secondary tropical forests using space-borne data: Implications for Central America. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 9, p. 1853–1894, jan. 2003.

CHAMBERS, J. Q.; NEGRON-JUAREZ, R. I.; MARRA, D. M.; DI VITTORIO, A.; TEWS, J.; ROBERTS, D.; RIBEIRO, G. H. P. M.; TRUMBORE, S. E.; HIGUCHI, N. The steady-state mosaic of disturbance and succession across an old-growth Central Amazon forest landscape. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. 10, p. 3949–54, 5 mar. 2013.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009.

COHEN, W. B.; SPIES, T. A.; FIORELLA, M. Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 4, p. 721–746, 1995.

COMBAL, B.; ISAKA, H. The effect of small topographic variations on reflectance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 3, p. 663–670, 2002.

CONAMA. **Resolução n° 1**, de 31 de janeiro de 1994. Estabelece os parâmetros básicos para análise dos estágios de sucessão de Mata Atlântica no Estado de São Paulo. 1994a. Disponível em: <http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/legislacao/federal/resolucoes/1994_Res_CONAMA_1.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

CONAMA. **Resolução n° 10**, de 1 de outubro de 1993. Dispõe sobre o corte, a exploração e a supressão de vegetação primária ou nos estágios avançado e médio de regeneração da Mata Atlântica, e dá outras providências. 1993. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/d750.htm>. Acesso em: 10 jan. 2015.

CONAMA. **Resolução n° 6**, de 4 de maio de 1994. Estabelece os parâmetros básicos para análise dos estágios de sucessão de Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro. 1994b. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res94/res0694.html>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta Botânica Brasilica**, v. 20, n. 1, p. 13–23, 2006.

CRIST, E. P.; CICONI, R. C. A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data---The TM Tasseled Cap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote**

Sensing, v. GE-22, n. 3, p. 256–263, 1984.

CRIST, E. P.; KAUTH, R. J. The tasseled cap de-mystified. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 81–86, 1986.

CRIST, E. P.; LAURIN, R.; CICONE, R. C. Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data. In: IGARSS' 86 SYMPOSIUM. 1986, Paris. **Anais...** Paris: European Space Agency, p. 1465–1470, 1986.

DA SILVA, R. D.; GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; DE J. SILVA, C. V.; DE MOURA, Y. M. Spectral/textural attributes from ALI/EO-1 for mapping primary and secondary tropical forests and studying the relationships with biophysical parameters. **GIScience & Remote Sensing**, v. 51, n. 6, p. 677–694, 30 out. 2014.

DE ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 135–150, 1998.

DEAN, W. **With Broadax and Firebrand**: The Destruction of the Brazilian Atlantic Forest. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1995.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.

EWEL, J. Tropical succession: Manifold routes to maturity. **Biotropica**, v. 12, n. 2, p. 2–7, 1980.

EWEL, J. J. Secondary forests: the tropical wood resource of the future. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE LAS CIENCIAS FORESTALES Y SU CONTRIBUCION AL DESARROLLO DE LA AMERICA TROPICA, 1979, San José, Costa Rica. **Anais...** San José, Costa Rica: Concit/Interciencia/SCITEC, p. 53–60, 1979.

EXELIS. **ENVI**. v. 5.0. [S.l.]: Exelis Visual Information Solutions, Inc. 2012. Disponível em: <www.exelisvis.com>.

FAHSI, A.; TSEGAYE, T.; TADESSE, W.; COLEMAN, T. Incorporation of digital elevation models with Landsat-TM data to improve land cover classification accuracy. **Forest Ecology and Management**, v. 128, p. 57–64, 2000.

FIORELLA, M.; RIPPLE, W. J. Determining successional stage of temperate coniferous forests with Landsat satellite data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 59, n. 2, p. 239–246, 1993.

FOODY, G. M.; PALUBINSKAS, G.; LUCAS, R. M.; CURRAN, P. J.; HONZAK, M. Identifying terrestrial carbon sinks : classification of successional stages in regenerating tropical forest from Landsat TM data. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, p. 205–216, 1996.

GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; AGNOL, R. D.; DA SILVA, C. V.; MOURA, Y. M.; BREUNIG, F. M. Following a site-specific secondary succession in the Amazon using the Landsat CDR product and field inventory data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 2, p. 574–596, 2015.

GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Efeitos da geometria de visada sobre a determinação de índices de vegetação. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 2001, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, Brasil: [S.N.], p. 1403–1409, 2001.

GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J.; LIESENBERG, V.; SANTOS, J. R. DOS. Possibilities of discriminating tropical secondary succession in Amazônia using hyperspectral and multiangular CHRIS/PROBA data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 11, n. 1, p. 8–14, fev. 2009.

GASCON, C.; WILLIAMSON, B.; FONSECA, G. A. B. Receding forest edges and vanishing reserves. **Science**, v. 288, n. 5470, p. 1356–1358, 26 maio 2000.

GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, n. 1, p. 1–212, 1988.

HEALEY, S.; COHEN, W.; ZHIQIANG, Y.; KRANKINA, O. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, n. 3, p. 301–310, 15 ago. 2005.

HELMER, E. H.; BROWN, S.; COHEN, W. B. Mapping montane tropical forest successional stage and land use with multi-date Landsat imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 11, p. 2163–2183, jan. 2000.

HORLER, D. N. H.; AHERN, F. J. Forestry information content of Thematic Mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 405–428, 1986.

HUANG, C.; WYLIE, B.; YANG, L.; HOMER, C.; ZYLSTRA, G. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 8, p. 1741–1748, 2002.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2012.

IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2004.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p. 359, 419, 458.

JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. Testing the assumptions of chronosequences in succession. **Ecology Letters**, v. 11, n. 5, p. 419–431, 2008.

KALACSKA, M.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; RIVARD, B.; CAELLI, T.; WHITE, H. P.; CALVO-ALVARADO, J. C. Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary tropical dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 1, p. 82–96, maio 2007.

KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. The tasseled cap- A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: PROC. THE SYMPOSIUM ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA. 1976, West Lafayette, Indiana. **Anais...** West Lafayette, Indiana: Purdue University, p. 4B–41–4B–50, 1976.

KUMAR, R. **Radiation from plants reflection and emission: a review.** West Lafayette: Purdue Research Foundation, 1994. (Research Project, 5543).

LIEBERMAN, D.; LIEBERMAN, M.; PERALTA, R.; HARTSHORN, G. S. Tropical forest structure and composition on a large-scale altitudinal gradient in Costa Rica. **Journal of Ecology**, v. 84, n. 2, p. 137–152, 1996.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin. **Forest Ecology and Management**, v. 181, n. 3, p. 301–312, ago. 2003.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, v. 198, n. 1-3, p. 149–167, ago. 2004.

LUCAS, R. M.; HONZÁK, M.; CURRAN, P. J.; FOODY, G. M.; MILNE, R.; BROWN, T.; AMARAL, S. Mapping the regional extent of tropical forest regeneration stages in the Brazilian Legal Amazon using NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 15, p. 2855–2881, jan. 2000.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 517–523, 1987.

MAUSEL, P.; WU, Y.; LI, Y.; MORAN, E. F.; BRONDIZIO, E. S. Spectral identification of successional stages following deforestation in the Amazon. **Geocarto International**, v. 8, n. 4, p. 61–71, dez. 1993.

MEDEIROS, J. D. D.; SAVI, M.; DE BRITO, B. F. A. Seleção de áreas para criação de Unidades de Conservação na Floresta Ombrófila Mista. **Biotemas**, v. 18, n. 2, p. 33–50, 2005.

MILLÁN, V. E. G.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, A.; GARCÍA, G. C. M.; RIVARD, B. Remote Sensing of Environment Quantifying tropical dry forest succession in the

Americas using CHRIS / PROBA. **Remote Sensing of Environment**, v. 144, p. 120–136, 2014.

MORAN, E.; BRONDIZIO, E. S.; MAUSEL, P. Secondary succession. **National Geographic Research & Exploration**, v. 10, n. 4, p. 458–476, 1994.

MORAN, E. F.; BRONDIZIO, E. S.; TUCKER, J. M.; SILVA-FORSBERG, M. C.; MCCRACKEN, S.; FALESI, I. Effects of soil fertility and land-use on forest succession in Amazônia. **Forest Ecology and Management**, v. 139, n. 1-3, p. 93–108, 2000.

MORELLATO, L. P. C.; HADDAD, C. F. B. The Brazilian Atlantic Forest. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 786–792, dez. 2000.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Área da mata atlântica é habitada por 70% da população brasileira**. 2013. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 11 jun. 2014.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853–8, 24 fev. 2000.

NEEFF, T.; LUCAS, R. M.; SANTOS, J. R. DOS; BRONDIZIO, E. S.; FREITAS, C. C. Area and age of secondary forests in Brazilian Amazonia 1978–2002: an empirical estimate. **Ecosystems**, v. 9, n. 4, p. 609–623, 31 maio 2006.

NELSON, R. F.; KIMES, D. S.; SALAS, W. A.; ROUTHIER, M. Secondary forest age and tropical forest biomass estimation using Thematic Mapper imagery. **BioScience**, v. 50, n. 5, p. 419, 2000.

NEPSTAD, D. C.; MOUTINHO, P. R. S.; MARKEWITZ, D. In: MCCLAIN, M.; VICTORIA, R.; RICHEY, J. (Org.). **The recovery of biomass, nutrients stocks, and deep soil functions in secondary forests**. London: Oxford University Press, 2001. 139–155 p.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 793–810, dez. 2000.

PONZONI, F. J. **Aplicação do modelo SAIL no estudo da reflectância espectral de dosséis de mudas de Eucalyptus sp. e de Aspidosperma sp.** 1993. 206 p. (INPE-6650-TAE/31). Tese de Doutorado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1993.

PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. Aplicação do Modelo SAIL no estudo da reflectancia espectral de dosséis de mudas de Eucalyptus sp. e de Aspidosperma sp. **Floresta**, v. 21, p. 45–69, 1994.

- PONZONI, F. J.; GALVÃO, L. S.; EPIPHANIO, J. C. N. Influência da resolução espacial sobre a quantificação de áreas não florestadas em ambiente amazônico. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 2001, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, Brasil: [S.N.], p. 1713–1720, 2001.
- PONZONI, F. J.; GALVÃO, L. S.; LIESENBERG, V.; SANTOS, J. R. Impact of multi-angular CHRIS/PROBA data on their empirical relationships with tropical forest biomass. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 19, p. 5257-5273, 2010.
- PONZONI, F. J.; REZENDE, A. C. P. Caracterização espectral de estágios sucessionais de vegetação secundária arbórea em Altamira (PA), através de dados orbitais. **Sociedade de Investigações Florestais**, v. 28, n. 4, p. 535–545, 2004.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- PONZONI, F.; SILVA, C.; SANTOS, S.; MONTANHER, O.; SANTOS, T. Local Illumination Influence on Vegetation Indices and Plant Area Index (PAI) Relationships. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6266–6282, 3 jul. 2014.
- QUESADA, M.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; ALVAREZ-AÑORVE, M.; STONER, K. E.; AVILA-CABADILLA, L.; CALVO-ALVARADO, J.; CASTILLO, A.; ESPÍRITO-SANTO, M. M.; FAGUNDES, M.; FERNANDES, G. W.; GAMON, J.; LOPEZARAIZA-MIKEL, M.; LAWRENCE, D.; MORELLATO, L. P. C.; POWERS, J. S.; NEVES, F. S.; ROSAS-GUERRERO, V.; SAYAGO, R.; SANCHEZ-MONTOYA, G. Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 6, p. 1014–1024, set. 2009.
- RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, jun. 2009.
- RODRIGUES, R. R.; LIMA, R. A. F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G. On the restoration of high diversity forests : 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1242–1251, 2009.
- SIEGEL, S. **Estatística não paramétrica**: para as ciências do comportamento. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1977.
- SIMINSKI, A.; MANTOVANI, M.; DOS REIS, M. S.; FANTINI, A. C. Sucessão floresta secundária no município de São Pedro de Alcântara, litoral de Santa Catarina: estrutura e diversidade. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 1, p. 21–33, 2004.
- SIMS, D. A.; RAHMAN, A. F.; VERMOTE, E. F.; JIANG, Z. Seasonal and inter-

annual variation in view angle effects on MODIS vegetation indices at three forest sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3112–3120, 2011.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, Mass: Addison-Wesley Publishing Co., 1980.

SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; LI, X. The spectral / temporal manifestation of forest succession in optical imagery The potential of multitemporal imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, p. 285–302, 2002.

STEININGER, M. K. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: Data from Brazil and Bolivia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 6-7, p. 1139–1157, 25 nov. 2000.

STEININGER, M. K. Tropical secondary forest regrowth in the Amazon: age, area and change estimation with Thematic Mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 1, p. 9–27, jan. 1996.

STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. **Physicochemical, site, and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils**: technical report. Indiana: [S.N.], 1980.

TABARELLI, M.; MANTOVANI, W. A riqueza de espécies arbóreas na floresta atlântica de encosta no estado de São Paulo (Brasil). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 22, n. 2, p. 217–223, 1999.

TUCKER, C. J. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. **Remote Sensing of Environment**, v. 10, n. 1, p. 23–32, 1980.

VALERIANO, M. DE M. Cálculo do fator topográfico de iluminação solar para modelagem ecofisiológica a partir do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE). In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 2011, Curitiba, PR, Brasil. **Anais...** Curitiba, PR, Brasil: [S.N.], p. 5933–5940, 2011.

VELOSO, H. P.; GOES-FILHO, L. **Fitogeografia brasileira, classificação fisionômica ecológica da vegetação neotropical**. Salvador: [S.N.], 1982.

VIEIRA, I. C. G.; DE ALMEIDA, A. S.; DAVIDSON, E. A.; STONE, T. A.; REIS DE CARVALHO, C. J.; GUERRERO, J. B. Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 470–481, 15 nov. 2003.

VIEIRA, I. C. G.; SALOMÃO, R. D. P.; ROSA, N.; NEPSTAD, D. C.; ROMA, J. Renascimento da floresta no rastro da agricultura (The rebirth of the forest in the wake of agriculture). **Ciência Hoje**, p. 38–45, 1996.

YOUNG, C. E. F. Deforestation and rural unemployment in the Atlantic Forest.
Floresta e Ambiente, v. 13, n. 2, p. 75–88, 2006.

ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS ESTÁGIOS SUCESSIONAIS SECUNDÁRIOS SEGUNDO AS RESOLUÇÕES CONAMA

Tabela A.1 - Especificações dos estágios sucessionais de florestas secundárias nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro segundo o CONAMA.

	São Paulo*			Rio de Janeiro**		
	Inicial	Intermediário	Avançado	Inicial	Intermediário	Avançado
Fisionomia	Savânica a florestal baixa	Florestal	Florestal fechada	Herbáceo/arbustiva	Arbustivo/arbórea	Arbórea
Cobertura (Estratos lenhosos)	Abertos ou fechados; plantas com alturas variadas	Aberta ou fechada; camadas de diferentes alturas	Grande número de estratos; número e abundância de espécies variam em função do clima e local	Aberta ou fechada	Fechada; início de diferenciação em estratos	Fechadas; dossel relativamente uniforme
DAP/Alturas médias de plantas lenhosas	Até 10 cm/ 1,5 a 8 m	Até 20 cm/4 a 12 m	>20 cm/ >10 m	5 cm/até 5 m	10 a 20 cm/5 a 12 m	20 cm/ >20 m
Diversidade	Baixa pode ocorrer 10 espécies dominantes	Significativa; podendo haver em alguns casos a dominância de poucas espécies	Muito grande	Indivíduo lenhosos pertencem a, no máximo, 20 espécies/ha	Muitas espécies do estágio inicial podem permanecer, porém mais grossas e altas	Alta
Idade	***	***	***	0 a 10 anos	11 a 25 anos	>25 anos
Área basal média	***	***	***	0 a 10 m ² /ha	10 a 28 m ² /ha	>28 m ² /ha
Sub-bosque	Podem ocorrer plantas jovens de espécies dos estágio mais maduros	Comum a ocorrência de arbustos umbrófilos	Estratos arbustivos e herbáceos aparecem com maior ou menor frequência	Ausente	Presente	Presente; pode se diferenciar em 1 ou mais estratos; menos expressivo que no estágio médio
Epífitas e trepadeiras	Epífitas e trepadeiras, quando existem, são pouco abundantes	Epífitas aparecem em maior número; trepadeiras quando presentes são predominantemente lenhosas	Presentes em grande número; trepadeiras geralmente lenhosas	Epífitas raras; pode ocorrer trepadeiras	Trepadeiras quando presentes são predominantemente lenhosas	Cipós, trepadeiras, e epífitas em abundância
Serapilheira	Quando existe, forma camada fina pouco decomposta	Pode apresentar variações de espessura de acordo com a estação do ano e de um lugar a outro	Sempre presente; intensa decomposição	Quando existe, forma camada fina pouco decomposta	Sempre presente; com muitas plântulas	Sempre presente; intensa decomposição
Espécies comuns (lenhosas)	amendoim-bravo (<i>Pterogyne nitens</i>), arranha-gato (<i>Acacia</i> spp.), camará ou candeia (<i>Gochnatia polimorpha</i>), capororoca (<i>Rapanea</i> spp.), tapiás (<i>Alchornea</i> spp.), caquera (<i>cassia</i> sp.), crindiúva (<i>Trema micrantha</i>), embaúbas (<i>Cecropia</i> spp.), falso ipê (<i>Stenolobium stans</i>),	açoita-cavalo (<i>Luehea</i> spp.), amarelinho (<i>Terminalia</i> spp.), angelim (<i>Andira</i> spp.), angicos (<i>Anadenanthera</i> spp.), aroeira (<i>Myracrodun urundeuva</i>), araribá (<i>Centrolobium robustum</i>), araucária (<i>Araucaria angustifolia</i>), burana (<i>Amburana cearensis</i>),	caviúna (<i>Machaerium</i> spp.), figueira (<i>Ficus</i> spp.), guanandi (<i>Calophyllum brasiliensis</i>), guarantã (<i>Esenbeckia leiocarpa</i>), imbúia (<i>Ocotea porosa</i>), jacarandás (<i>Dalbergia</i> spp.), jatobás (<i>Hymenaea</i> spp.), jequitibás (<i>Cariniana</i> spp.),	angico - <i>Aradenanthera colubrina</i> (Leguminosae) aracá - <i>Psidium cattleianum</i> (Myrtaceae), aroeira - <i>Schinus terebinthifolius</i> (Anacardiaceae), candeia - <i>Vanillosmopsis erythropappa</i> (Compositae),	açoita-cavalo - <i>Luehea grandiflora</i> (Tiliaceae) aleluia - <i>Senna multijuga</i> (Leguminosae), camboatá - <i>Cupania oblongifolia</i> (Sapindaceae) canudeiro - <i>Senna macranthera</i> (Leguminosae),	airi - <i>Astrocaryum aculeatissimum</i> (Palmae) araribá - <i>Centrolobium robustum</i> (Leguminosae), aricanga - <i>Geonoma</i> spp. (Palmae), bicuíba - <i>Virola oleifera</i> (Miristicaceae),

(Continua)

Tabela A.1 – Continuação.

<p>Espécies comuns (lenhosas)</p>	<p>fumo-bravo (<i>Solanum granuloso-lebrosum</i>), goiabeira (<i>Psidium guaiava</i>), guaçatonga (<i>Casearia sylvestris</i>), leiteiro (<i>Peschieria fuchsiaefolia</i>), lixinha (<i>Aloysia virgata</i>), mamona (<i>Ricinus communis</i>), manacá ou jacatirão (<i>Tibouchina</i> spp. e <i>Miconia</i> spp.), maria-mole (<i>Guapira</i> spp.), murici (<i>Byrsonima</i> spp.), mutambo (<i>Guazuma ulmifolia</i>), pimenta-de-macaco (<i>Xylopia aromatica</i>), pimenteira brava (<i>Schinus terebinthifolius</i>), sangra d'água (<i>Croton urucurana</i>), sapuva (<i>Machaerium stipitatum</i>)</p>	<p>caixeta (<i>Tabebuia cassinoides</i>), cambui (<i>Myrcia</i> spp.), canafistula (<i>Peltophorum dubium</i>), canelas (<i>Ocotea</i> spp., <i>Nectandra</i> spp., <i>Crytocaria</i> spp.), canjarana (<i>Cabralea canjerana</i>), cedro (<i>Cedrela</i> spp.), cuvatã (<i>Matayba</i> spp.), embiras-de-sapo (<i>Lonchocarpus</i> spp.), farinha-seca (<i>Pithecellobium edwallii</i>), faveiro (<i>Pterodon pubescens</i>), guaiuvira (<i>Patagonula americana</i>), guapuruvu (<i>Schizolobium parahyba</i>), ipês (<i>Tabebuia</i> spp.), jacarandá-do-campo (<i>Platypodium elegans</i>), jacarandás (<i>Machaerium</i> spp.), louro-pardo (<i>Cordia trichotoma</i>), mamica-de-porca (<i>Zanthoxylum</i> spp.), mandiocão (<i>Didimopanax</i> spp.), marinheiro (<i>Guarea</i> spp.), monjoleiro (<i>Acacia polyphylla</i>), óleo-de-copaíba (<i>Copaifera langsdorfii</i>), pau-de-espeto (<i>Casearia gossypiosperma</i>), pau-jacaré (<i>Piptadenia gonoacantha</i>), peito-de-pomba (<i>Tapirira guianensis</i>), pinheiro-bravo (<i>Podocarpus</i> spp.), taiúva (<i>Machlura tinctoria</i>), tamboril (<i>Enterolobium contorsiliquum</i>), vinhático (<i>Plathymania</i> spp.), entre outras</p>	<p>maçaranduba (<i>Manilkara</i> spp. e <i>Persea</i> spp.), paineira (<i>Chorisia speciosa</i>), pau-d'alho (<i>Gallesia integrifolia</i>), pau-marfim (<i>Balfourodendron riedelianum</i>), perobas e guatambu (<i>Aspidosperma</i> spp.), pixiricas (<i>Miconia</i> spp.), suiná ou mulungú (<i>Erythrina</i> spp.), entre outras</p>	<p>crindiúva - <i>Trema micrantha</i> (<i>Ulmaceae</i>) embaúbas - <i>Cecropia</i> spp. (<i>Moraceae</i>) esperta - <i>Peschiera laeta</i> (<i>Apocynaceae</i>) goiabeira - <i>Psidium guayava</i> (<i>Myrtaceae</i>) maricá - <i>Mimosa bimucronata</i> (<i>Leguminosae</i>) sangue-de-drago - <i>Croton urucurana</i> (<i>Euphorbiaceae</i>) tapiá - <i>Alchornea iricurana</i> (<i>Euphorbiaceae</i>)</p>	<p>caroba - <i>Cybistax antisyphilitica</i> (<i>Bignoniaceae</i>) carrapeta - <i>Guarea guidonia</i> (<i>Meliaceae</i>) cinco-folhas - <i>Sparattosperma leucanthum</i> (<i>Bignoniaceae</i>) guapuruvu - <i>Schizolobium parahyba</i> (<i>Leguminosae</i>) guaraperê - <i>Lamanonia ternata</i> (<i>Cunoniaceae</i>) ipê-amarelo - <i>Tabebuia chrysotricha</i> (<i>Bignoniaceae</i>) jacatirão - <i>Miconia fairchildiana</i> (<i>Melastomataceae</i>) maminha-de-porca - <i>Zanthoxylon rhoifolium</i> (<i>Rutaceae</i>) pindaíba - <i>Xylopia brasiliensis</i> (<i>Annonaceae</i>)</p>	<p>canela - <i>Ocotea</i>, <i>Nectandra</i>, <i>Cryptocarya</i> (<i>Lauraceae</i>) canela-santa - <i>Vochysia laurifolia</i> (<i>Vochysiaceae</i>) canjerana - <i>Cabralea canjerana</i> (<i>Meliaceae</i>) cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (<i>Meliaceae</i>) cotieira - <i>Johannesia princeps</i> (<i>Euphorbiaceae</i>) figueira - <i>Ficus</i> spp. (<i>Moraceae</i>) garapa - <i>Apuleia leiocarpa</i> (<i>Leguminosae</i>) guapeba - <i>Pouteria</i> sp. (<i>Sapotaceae</i>) jequitibá-branco - <i>Cariniana legalis</i> (<i>Lecythidaceae</i>) jequitibá-rosa - <i>Cariniana estrellensis</i> jequitibá-rosa - <i>Couratari pyramidata</i> (<i>Lecythidaceae</i>) palmito - <i>Euterpe edulis</i> (<i>Palmae</i>) pau-d'alho - <i>Gallezia integrifolia</i> (<i>Phytolaccaceae</i>) perobas - <i>Aspidosperma</i> spp. (<i>Apocynaceae</i>) pindobuçu - <i>Attalea dubia</i> (<i>Palmae</i>) sapucaia - <i>Lecythis pisonis</i> (<i>Lecythidaceae</i>) vinhático - <i>Plathymania foliolosa</i> (<i>Leguminosae</i>) xixá - <i>Sterculia chicha</i> (<i>Sterculiaceae</i>)</p>
--	--	---	--	--	--	--

* Características da vegetação secundária das Florestas Ombrófilas Estacionais segundo a Resolução nº 1, de 31 de Janeiro de 1994 do CONAMA

** Características da vegetação secundária das Florestas Ombrófilas Estacionais segundo a Resolução nº 6, de 4 de Maio de 1994 do CONAMA

*** Não explícito na respectiva resolução

APÊNDICE A – HISTÓRICO DOS POLÍGONOS FEITO ATRAVÉS DE INTERPRETAÇÃO VISUAL DE IMAGENS

Tabela A.1 - Histórico dos polígonos selecionados em cada estágio sucessional feito através de interpretação visual de imagem ao longo de 20 anos, na classe de iluminação local Muito Iluminado. A primeira coluna apresenta códigos identificadores de cada polígono. Células que contêm o caractere "x" representam a impossibilidade de classificar o polígono devido à presença de nuvens na imagem. Inicial (SS1), Intermediário (SS2), Avançado (SS3), Florestas primárias (P).

INICIAL (SS1)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
OC1	SS1															
OC3	SS1															
OC5	SS1	x	SS1													
OC6	SS2	SS1	SS1	SS1	SS1	x	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2
OC8	SS1	SS2														
OC10	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS2									
OC11	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS2	SS3	SS3	SS3							
OC13	SS1	SS2														
OC18	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS2										
OC20	SS1	SS1	SS1	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS1						

INTERMEDIÁRIO (SS2)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
IC8	SS2	SS3	SS3	SS3												
IC9	SS2	SS3	SS3	SS3												
IC11	SS2	x	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2								
IC12	SS2	x	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS3								
IC14	SS2	x	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	SS2	SS2						
IC17	SS2	x	SS2													
IC18	SS1	SS2														
IC19	SS2	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1									
IC20	SS2	SS2	SS2	SS1												

AVANÇADO (SS3)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
AC3	SS3															
AC4	SS3															
AC5	SS3															
AC12	SS3															
AC14	SS3															
AC15	SS3															
AC16	SS3															
AC17	SS3															
AC19	SS3	x	SS3													
AC20	SS3															

PRIMÁRIO (P)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
PC8	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
PC9	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
PC10	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
PC11	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
PC12	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Tabela A.2 - Histórico dos polígonos selecionados em cada estágio sucessional feito através de interpretação visual de imagem ao longo de 20 anos, na classe de iluminação local Iluminado. A primeira coluna apresenta códigos identificadores de cada polígono. Células que contêm o caractere "x" representam a impossibilidade de classificar o polígono devido à presença de nuvens na imagem. Inicial (SS1), Intermediário (SS2), Avançado (SS3), Florestas primárias (P).

INICIAL (SS1)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
OM1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	x	x	SS2	SS2	x	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2
OM3	SS1															
OM9	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	x	SS1	SS1	SS2							
OM10	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	x	SS1	SS1	SS1	SS2						
OM13	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS1	SS2									

INTERMEDIÁRIO (SS2)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
IM1	SS2	SS3														
IM3	SS2															
IM5	SS2	SS3														
IM8	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	x	SS2	SS2	SS2	SS2	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3
IM9	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	x	SS2	SS2	x	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2
IM10	SS2															
IM11	SS2															
IM12	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	SS2	SS3							
IM14	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	x	x	SS3	SS3	SS3	SS3	x	SS3	SS3
IM15	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	SS2	SS2

AVANÇADO (SS3)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
AM1	SS3															
AM2	SS3	SS3	SS3	SS3	x	SS3	SS3	SS3	SS3	x	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3
AM5	SS3	x	SS3													
AM7	SS3															
AM8	SS3															
AM9	SS3															
AM10	SS3															
AM11	SS3															
AM12	SS3															
AM13	SS3															

PRIMÁRIO (P)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
PM1	P	P	P	P	P	x	x	x	x	x	P	P	P	P	P	P
PM3	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
PM4	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
PM5	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
PM6	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Tabela A.3 - Histórico dos polígonos selecionados em cada estágio sucessional feito através de interpretação visual de imagem ao longo de 20 anos, na classe de iluminação local Pouco Iluminado. A primeira coluna apresenta códigos identificadores de cada polígono. Células que contêm o caractere "x" representam a impossibilidade de classificar o polígono devido à presença de nuvens na imagem. Inicial (SS1), Intermediário (SS2), Avançado (SS3), Florestas primárias (P).

INICIAL (SS1)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
OI1	SS1															
OI2	SS1															
OI6	SS1	SS2														
OI7	SS1	SS2														
OI9	SS1	SS2														
OI10	SS1	SS2	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3								
INTERMEDIÁRIO (SS2)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
II2	SS2															
II3	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	x	SS2	SS2	SS2	SS2	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3
II6	SS2	SS3														
II8	SS2															
II10	SS2	SS2	SS2	SS2	SS3											
II11	SS2	SS2	SS2	SS2	SS2	x	SS2	x	SS2	SS3						
II13	SS1	SS1	SS1	SS2	SS2	SS2	x	SS2								
II14	SS2	SS2	SS2	SS2	SS3	SS3	x	SS3								
II15	SS2	SS2	SS2	SS2	SS3											
II16	SS2	SS2	SS3													
AVANÇADO (SS3)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
AI1	SS3															
AI2	SS3															
AI4	SS3															
AI5	SS3															
AI6	SS3															
AI7	SS3															
AI8	SS3	x	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3								
AI9	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3	x	x	SS3								
AI10	SS3	SS3	SS3	SS3	SS3	x	x	SS3								
AI12	SS3															
PRIMÁRIO (P)																
ID	1989	1992	1994	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
PI1	P	P	P	P	P	x	x	P	P	P	P	P	P	P	P	P
PI2	P	P	P	P	P	x	x	P	P	x	P	P	P	P	P	P
PI3	P	P	P	P	P	x	x	x	P	P	P	P	P	P	P	P
PI5	P	P	P	P	P	P	P	x	x	P	P	P	P	P	P	P
PI6	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

APÊNDICE B – AGRUPAMENTO DOS POLÍGONOS SEGUNDO SUAS DINÂMICAS SUCESSIONAIS

Tabela B.1 – Agrupamento dos polígonos segundo suas dinâmicas sucessionais da classe de iluminação Muito Iluminado. Dinâmicas com (-) não obtiveram número suficiente de pixels para análise (≥ 40), e, portanto, não foram utilizadas.

	Dinâmica	Polígonos	Nº total de pixels (soma de 60% do número total de pixels de todos os polígonos envolvidos)
1989-1996	SS1-SS1	OC1; OC3; OC5; OC8; OC10; OC13	219
	SS1-SS2	OC11; OC18; OC20; IC18	216
	SS2-SS2	IC8; IC9; IC11; IC12; IC14; IC17; IC19	163
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	-	-
	SS3-SS3	AC3; AC4; AC5; AC12; AC14; AC15; AC16; AC17; AC19; AC20	329
	P-P	PC8; PC9; PC10; PC11; PC12	275
1989-2005	SS1-SS1	OC1; OC3; OC5; OC8; OC20	230
	SS1-SS2	OC20; OC11; OC13; OC18; IC18	205
	SS2-SS2	IC8; IC9; IC11; IC12; IC14; IC17	142
	SS2-SS1	OC6; IC19; IC20	55
	SS2-SS3	-	-
	SS3-SS3	AC3; AC4; AC5; AC12; AC14; AC15; AC16; AC17; AC19; AC20	329
	P-P	PC8; PC9; PC10; PC11; PC12	275
1989-2011	SS1-SS1	OC1; OC3; OC5; OC20	209
	SS1-SS2	OC8; OC10; OC13; OC18; IC18	214
	SS2-SS2	OC6; IC11; IC14; IC17	92
	SS2-SS1	IC19; IC20	43
	SS2-SS3	IC8; IC9; IC12	61
	SS3-SS3	AC3; AC4; AC5; AC12; AC14; AC15; AC16; AC17; AC19; AC20	329
	P-P	PC8; PC9; PC10; PC11; PC12	275
1996-2005	SS1-SS1	OC1; OC3; OC5; OC6; OC8; IC20	204
	SS1-SS2	OC10; OC13	49
	SS2-SS2	OC11; OC18; IC8; IC9; IC11; IC12; IC14; IC17; IC18	298
	SS2-SS1	OC20; IC19	80
	SS2-SS3	-	-
	SS3-SS3	AC3; AC4; AC5; AC12; AC14; AC15; AC16; AC17; AC19; AC20	329
	P-P	PC8; PC9; PC10; PC11; PC12	275
1996-2011	SS1-SS1	OC1; OC3; OC5; IC20	171
	SS1-SS2	OC6; OC8; OC10; OC13	82
	SS2-SS2	OC18; IC11; IC14; IC17; IC18	225
	SS2-SS1	OC20; IC19	80
	SS2-SS3	OC11; IC8; IC9; IC12	73
	SS3-SS3	AC3; AC4; AC5; AC12; AC14; AC15; AC16; AC17; AC19; AC20	329
	P-P	PC8; PC9; PC10; PC11; PC12	275

(Continua)

Tabela B.1 – Continuação.

	SS1-SS1	OC1; OC3; OC5; OC20; IC19; IC20	73
2005-2011	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	OC10; OC13; OC18; IC11; IC14; IC17; IC18	274
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	OC11; IC8; IC9; IC12	73
	SS3-SS3	AC3; AC4; AC5; AC12; AC14; AC15; AC16; AC17; AC19; AC20	329
	P-P	PC8; PC9; PC10; PC11; PC12	275

Tabela B.2 - Agrupamento dos polígonos segundo suas dinâmicas sucessionais da classe de iluminação Iluminado. Dinâmicas com (-) não obtiveram número suficiente de pixels para análise (≥ 40), e, portanto, não foram utilizadas.

	Dinâmica	Polígonos	Nº total de pixels (soma de 60% do número total de pixels de todos os polígonos envolvidos)
1989-1996	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	IM1; IM3; IM5; IM8; IM9; IM10; IM11; IM12; IM14; IM15	115
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	-	-
	SS3-SS3	AM1; AM2; AM5; AM7; AM8; AM9; AM10; AM11; AM12; AM13	148
	P-P	PM1; PM3; PM4; PM5; PM6	58
1989-2005	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	IM3; IM8; IM9; IM10; IM11; IM15	41
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	IM1; IM5; IM12; IM14	74
	SS3-SS3	AM1; AM2; AM5; AM7; AM8; AM9; AM10; AM11; AM12; AM13	148
	P-P	PM1; PM3; PM4; PM5; PM6	58
1989-2011	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	-	-
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	IM1; IM5; IM8; IM12; IM14	77
	SS3-SS3	AM1; AM2; AM5; AM7; AM8; AM9; AM10; AM11; AM12; AM13	148
	P-P	PM1; PM3; PM4; PM5; PM6	58
1996-2005	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	IM3; IM8; IM9; IM10; IM11; IM15	41
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	IM1; IM5; IM12; IM14	74
	SS3-SS3	AM1; AM2; AM5; AM7; AM8; AM9; AM10; AM11; AM12; AM13	148
	P-P	PM1; PM3; PM4; PM5; PM6	58
1996-2011	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	-	-
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	IM1; IM5; IM8; IM12; IM14	77
	SS3-SS3	AM1; AM2; AM5; AM7; AM8; AM9; AM10; AM11; AM12; AM13	148
	P-P	PM1; PM3; PM4; PM5; PM6	58

(Continua)

Tabela B.2 – Continuação.

	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
2005-2011	SS2-SS2	OM1; OM9; OM10; OM13; IM3; IM9; IM10; IM11; IM15	57
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	-	-
	SS3-SS3	AM1; AM2; AM5; AM7; AM8; AM9; AM10; AM11; AM12; AM13	148
	P-P	PM1; PM3; PM4; PM5; PM6	58

Tabela B.3 - Agrupamento dos polígonos segundo suas dinâmicas sucessionais da classe de iluminação Pouco Iluminado. Dinâmicas com (-) não obtiveram número suficiente de pixels para análise (≥ 40), e, portanto, não foram utilizadas.

	Dinâmica	Polígonos	Nº total de pixels (soma de 60% do número total de pixels de todos os polígonos envolvidos)
1989-1996	SS1-SS1	OI1; OI2; OI6; OI7; OI9	55
	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	II2; II3; II6; II8; III10; III11; III14; III15	109
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	-	-
	SS3-SS3	AI1; AI2; AI4; AI5; AI6; AI7; AI8; AI9; AI10; AI12	421
	P-P	PI1; PI2; PI3; PI5; PI6	104
1989-2005	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	OI6; OI7; OI9; III13	49
	SS2-SS2	II2; II3; II8; III11	43
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	II6; III10; III14; III15; III16	79
	SS3-SS3	AI1; AI2; AI4; AI5; AI6; AI7; AI8; AI9; AI10; AI12	421
	P-P	PI1; PI2; PI3; PI5; PI6	104
1989-2011	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	OI6; OI7; OI9; III13	49
	SS2-SS2	-	-
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	II3; II6; III10; III11; III14; III15; III16	96
	SS3-SS3	AI1; AI2; AI4; AI5; AI6; AI7; AI8; AI9; AI10; AI12	421
	P-P	PI1; PI2; PI3; PI5; PI6	104
1996-2005	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	II2; II3; II8; III11; III13	58
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	OIII10; II6; III10; III14; III15	83
	SS3-SS3	II16; AI1; AI2; AI4; AI5; AI6; AI7; AI8; AI9; AI10; AI12	434
	P-P	PI1; PI2; PI3; PI5; PI6	104
1996-2011	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
	SS2-SS2	II2; II8; III13	41
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	OIII10; II3; II6; III10; III11; III14; III15	100
	SS3-SS3	II16; AI1; AI2; AI4; AI5; AI6; AI7; AI8; AI9; AI10; AI12	434
	P-P	PI1; PI2; PI3; PI5; PI6	104

(Continua)

Tabela B.3 – Continuação.

	SS1-SS1	-	-
	SS1-SS2	-	-
2005-2011	SS2-SS2	OI6; OI7; OI9; II2; II8; II13	75
	SS2-SS1	-	-
	SS2-SS3	-	-
	SS3-SS3	OII10; II6; II10; II14; II15; II16; AI1; AI2; AI4; AI5; AI6; AI7; AI8; AI9; AI10; AI12	517
	P-P	PI1; PI2; PI3; PI5; PI6	104

APÊNDICE C – ROTINA EM LINGUAGEM PYTHON UTILIZADA NA ANÁLISE DE DESLOCAMENTO NO ESPAÇO TC

```
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from matplotlib import cm
from collections import defaultdict
from mpl_toolkits.mplot3d import proj3d
from matplotlib.patches import FancyArrowPatch
from openpyxl import load_workbook
from openpyxl import Workbook
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import csv
import argparse
import textwrap
import os
import random
import sys
import ast

# Parser para arquivo de entrada
parser = argparse.ArgumentParser(
    formatter_class=argparse.RawDescriptionHelpFormatter,
    description=textwrap.dedent("""
        Script que processa um arquivo csv ou xlsx contendo coordenadas de
        pixels de diferentes polígonos extraídas de imagens de 4 datas (1989;1996;
        2005;2011). As coordenadas referen-se à diferenças de valores de Brightness,
        Greenness e Wetness obtidos no intervalo entre duas destas datas para cada
        pixel. O script sorteia um número determinado de pixels considerando o
        número total de cada polígono. Esses pixels sorteados são plotados em um
        espaço 3D dividido em octantes pelo cruzamento dos eixos na origem. A partir
        da contagem de pontos em cada octante, o script calcula a estatística
        qui-quadrado, sendo a frequência esperada a divisão do total de pontos por
        8. Por fim, é desenhado um vetor em direção ao octante com maior número de
        pontos. Esse vetor sempre sai da origem e vai até a coordenada determinada
```

pela média dos valores de x, y e z dos pontos do octante em questão.

O objetivo da análise é inferir sobre a significância do deslocamento dos pixels no espaço Tasseled Cap nos intervalos considerados. E se o deslocamento for significativo, analisar a consistência da direção do deslocamento com a dinâmica sucessional sofrida pelo polígono.

O produto final é armazenado em dois arquivos; um .png contendo o gráfico 3D e um .xlsx ou .csv (de acordo com o arquivo de entrada) contendo o valor de qui-quadrado e a identidade dos pontos que caíram em cada octante.

```
-----  
"),  
epilog=textwrap.dedent("""  
-----  
  
                Desenvolvido por Ricardo Breder <kdinluks@gmail.com>  
  
""))  
parser.add_argument("amostras", help="arquivo csv com dados das amostras")  
parser.add_argument("sorteados", nargs="?", default="pixelsSorteados.csv", help="arquivo csv com os  
pixels sorteados")  
parser.add_argument("-c", "--colorido", dest='showColor', action='store_true', help="plota os pontos  
coloridos por quadrante")  
parser.add_argument("-d", "--delimiter", dest='delimiter', default=',', help="especifica o caractere  
delimitador do arquivo csv")  
parser.add_argument("-g", "--graph", dest='showGraph', action='store_true', help="mostra gráfico  
interativo")  
parser.add_argument("-l", "--legendas", dest='legendas', action='store_true', help="imprime legendas nos  
gráficos")  
parser.add_argument("-o", "--output", dest='output', default="", help="nome do arquivo de saída para os  
resultados")  
parser.add_argument("-s", "--sorteio", dest='sorteio', default="", help="nome do arquivo utilizado para  
realizar o sorteio dos pixels")  
parser.add_argument('-v', '--version', action='version', version='%(prog)s 3.2', help="versão do script")  
args = parser.parse_args()  
  
arquivoSorteados = args.sorteados  
arquivoAmostras = args.amostras  
delimiter = args.delimiter  
sorteio = args.sorteio  
output = args.output
```

```

legendas = args.legendas

arquivoSaida = arquivoAmostras.rsplit('.',1)[0] + '_resultados.' + arquivoAmostras.rsplit('.',1)[1] if output
== " else output

oImagem = arquivoAmostras.rsplit('.',1)[0] + '_graficos.png'

showGraph = args.showGraph

showColor = args.showColor

sorteadosExt = arquivoSorteados.rsplit('.',1)[1].lower() if arquivoSorteados else 'csv'

sorteioExt = sorteio.rsplit('.',1)[1].lower() if sorteio else 'csv'

amostrasExt = arquivoAmostras.rsplit('.',1)[1].lower() if arquivoAmostras else 'csv'

outputExt = arquivoSaida.rsplit('.',1)[1].lower() if arquivoSaida else 'csv'

if showColor:

    colors = ["yellow", "green", "blue", "purple", "violet", "brown", "black", "orange"]

else:

    colors = ["blue", "blue", "blue", "blue", "blue", "blue", "blue", "blue"]

class Arrow3D(FancyArrowPatch):

    def __init__(self, xs, ys, zs, *args, **kwargs):

        FancyArrowPatch.__init__(self, (0,0), (0,0), *args, **kwargs)

        self._verts3d = xs, ys, zs

    def draw(self, renderer):

        xs3d, ys3d, zs3d = self._verts3d

        xs, ys, zs = proj3d.proj_transform(xs3d, ys3d, zs3d, renderer.M)

        self.set_positions((xs[0],ys[0]),(xs[1],ys[1]))

        FancyArrowPatch.draw(self, renderer)

if sorteio != "":

    print("Lendo arquivo para realizar sorteio dos pixels...")

if sorteioExt == 'csv':

    with open(sorteio, 'rb') as sorteioFile:

        reader = csv.DictReader(sorteioFile, delimiter=delimiter)

        amostras = defaultdict(list)

```

```

i = reader.fieldnames[0]
p = reader.fieldnames[1]
s = reader.fieldnames[2]

for row in reader:
    amostras[row[i]].append(round(float(row[p])))
    amostras[row[i]].append(round(float(row[s])))
    amostras[row[i]].append([])

elif sorteioExt == 'xlsx' or extension == 'xls':
    excelSheet = raw_input('Digite o nome da planilha (Sheet1): ')
    if excelSheet == "":
        excelSheet = 'Sheet1'
    wb = load_workbook(filename=sorteio, read_only=True, data_only=True)
    ws = wb[excelSheet]
    amostras = defaultdict(list)
    for row in ws.rows:
        if row[0].value == "ID":
            i = row[0].value
            p = row[1].value
            s = row[2].value
        elif row[0].value == None:
            break
        else:
            amostras[row[0].value].append(round(float(row[1].internal_value)))
            amostras[row[0].value].append(round(float(row[2].internal_value)))
            amostras[row[0].value].append([])

    else:
        print("Arquivo de Sorteio com extensão não suportada")
        print("Por favor utilize somente arquivos CSV ou XLSX")
        sys.exit(1)

```

```

for a in amostras:
    while amostras[a][1] > len(amostras[a][2]):
        r = random.randint(1, amostras[a][0])
        if r not in amostras[a][2]:
            amostras[a][2].append(r)
    amostras[a][2].sort()

try:
    print("Removendo arquivo com Pixels Sorteados anterior...")
    os.remove(arquivoSorteados)
except OSError as e:
    if e.errno == 2:
        print("Arquivo com Pixels Sorteados inexistente, criando...")
    else:
        print("Não foi possível remover/criar arquivo")
        print("Verifique se tem permissão para criar arquivos nessa pasta")
        print("Ou se o arquivo de saída esta em uso por outro aplicativo")

if sorteadosExt == 'csv':
    with open(arquivoSorteados, 'ab') as csvfile:
        write = csv.writer(csvfile, delimiter=delimiter)
        write.writerow(['ID', 'pixels', 'sorteios', 'sorteados', 'total'])
        for a in amostras:
            write.writerow([a, amostras[a][0], amostras[a][1], amostras[a][2], len(amostras[a][2])])

elif sorteadosExt == 'xlsx' or sorteadosExt == 'xls':
    wb = Workbook(write_only=True)
    ws = wb.create_sheet('Sheet1')
    ws.append(['ID', 'pixels', 'sorteios', 'sorteados', 'total'])
    for a in amostras:
        ws.append([a, str(amostras[a][0]), str(amostras[a][1]), str(amostras[a][2]), len(amostras[a][2])])
    wb.save(arquivoSorteados.rsplit('.',1)[0]+'.xlsx')

else:

```

```

print("Lendo arquivo com Pixels Sorteados...")
if os.path.isfile(arquivoSorteados):
    if sorteadosExt == 'csv':
        with open(arquivoSorteados, 'rb') as csvfile:
            reader = csv.DictReader(csvfile, delimiter=delimiter)
            amostras = defaultdict(list)

            i = reader.fieldnames[0]
            p = reader.fieldnames[1]
            s = reader.fieldnames[2]
            sd = reader.fieldnames[3]

            for row in reader:
                amostras[row[i]].append(int(row[p]))
                amostras[row[i]].append(int(row[s]))
                amostras[row[i]].append(ast.literal_eval(row[sd]))

    elif sorteadosExt == 'xlsx' or sorteadosExt == 'xls':
        excelSheet = raw_input('Digite o nome da planilha (Sheet1): ')
        if excelSheet == "":
            excelSheet = 'Sheet1'
        wb = load_workbook(filename=arquivoSorteados, read_only=True, data_only=True)
        ws = wb[excelSheet]
        amostras = defaultdict(list)
        for row in ws.rows:
            if row[0].value == "ID":
                i = row[0].value
                p = row[1].value
                s = row[2].value
                sd = row[3].value
            else:
                amostras[row[0].value].append(int(row[1].value))
                amostras[row[0].value].append(int(row[2].value))
                amostras[row[0].value].append(ast.literal_eval(row[3].value))

```

```
else:
    print("Arquivo de Sorteio com extensão não suportada")
    print("Por favor utilize somente arquivos CSV ou XLSX")
    sys.exit(1)
```

```
else:
    print("Arquivo inexistente")
    print("Execute o Script novamente com a opcao -s")
    print("Encerrando...")
    sys.exit(1)
```

```
# Begin of - Cria matriz de dados baseado no arquivo csv
```

```
print("Lendo arquivo com Amostras...")
if os.path.isfile(arquivoAmostras):
    if amostrasExt == 'csv':
        with open(arquivoAmostras, 'rb') as csvfile:
            reader = csv.DictReader(csvfile, delimiter=delimiter)
            pontos = defaultdict(list)
            pTemp = defaultdict(list)
            pnames = []

            i = reader.fieldnames[0]
            x = reader.fieldnames[1]
            y = reader.fieldnames[2]
            z = reader.fieldnames[3]

            for row in reader:
                pTemp[reader.fieldnames[0]].append([float(row[x]), float(row[y]), float(row[z])])

    elif amostrasExt == 'xlsx' or amostrasExt == 'xls':
        excelSheet = raw_input('Digite o nome da planilha (Sheet1): ')
```

```

if excelSheet == "":
    excelSheet = 'Sheet1'
wb = load_workbook(filename=arquivoAmostras, read_only=True, data_only=True)
ws = wb[excelSheet]
pontos = defaultdict(list)
pTemp = defaultdict(list)
pnames = []

for row in ws.rows:
    if row[0].value == "ID":
        i = row[0].value
        x = row[1].value
        y = row[2].value
        z = row[3].value
    else:
        pTemp[row[0].value].append([float(row[1].value), float(row[2].value), float(row[3].value)])
else:
    print("Arquivo de Sorteio com extensão nao suportada")
    print("Por favor utilize somente arquivos CSV ou XLSX")
    sys.exit(1)

keys = pTemp.keys()

for k in keys:
    for i in amostras[k][2]:
        pontos[x].append(pTemp[k][i-1][0])
        pontos[y].append(pTemp[k][i-1][1])
        pontos[z].append(pTemp[k][i-1][2])
        pnames.append(k)

else:
    print("Arquivo inexistente")
    print("Verifique o nome do arquivo e tente novamente")
    print("Encerrando...")

```

```

sys.exit(1)

# End of - Cria matriz de dados baseado no arquivo csv

# Guarda os nomes da series
snames = [x, y, z]

# Determina a quantiade de graficos 3D
slen = 1

# Determina a quantidade de linhas de graficos (max 3 por linha)
nlines = 1

# Inicia a area de plotagem dos graficos
fig = plt.figure(figsize=(10 * slen if slen < 3 else 30, 6.6*nlines), dpi=200)

# Apaga arquivo CSV de saida (Se um arquivo existir com o mesmo nome ele sera apagado)
try:
    os.remove(arquivoSaida)
except OSError as e:
    if e.errno == 2:
        print("Arquivo de Saída inexistente, criando...")
    else:
        print("Não foi possível remover/criar arquivo de Saída")
        print("Verifique se tem permissão para criar arquivos nessa pasta")
        print("Ou se o arquivo de saída esta em uso por outro aplicativo")

# Begin of - Itera sobre matriz de dados para criar os graficos 3D de todas as series

for i in range(0, slen):
    # Cria sub grafico
    ax = fig.add_subplot(nlines, 3 if slen >= 3 else slen, 1+i, projection='3d')

```

```

# Calcula media e desvio padrao dos pontos em cada eixo
mediaX = np.mean(pontos[snames[i]])
desvioX = np.std(pontos[snames[i]])
mediaY = np.mean(pontos[snames[i+slen]])
desvioY = np.std(pontos[snames[i+slen]])
mediaZ = np.mean(pontos[snames[i+2*slen]])
desvioZ = np.std(pontos[snames[i+2*slen]])

pontoMedioX = 0
pontoMedioY = 0
pontoMedioZ = 0

# pontoMedioX = (max(pontos[snames[i]]) + min(pontos[snames[i]]))/2
# pontoMedioY = (max(pontos[snames[i+slen]]) + min(pontos[snames[i+slen]]))/2
# pontoMedioZ = (max(pontos[snames[i+2*slen]]) + min(pontos[snames[i+2*slen]]))/2

pontosQdr = defaultdict(list)
vetorQdr = defaultdict(list)

print len(pontos[snames[0]])

# Plota Legendas para pontos fora da curva (Precisa de um metodo melhor para determinar outliers)
for l, x, y, z in zip(pnames, pontos[snames[i]], pontos[snames[i+slen]], pontos[snames[i+2*slen]]):
    if legendas:
        x2, y2, _ = proj3d.proj_transform(x,y,z, ax.get_proj())
        plt.annotate( l, xy = (x2, y2))
    if x <= pontoMedioX and z >= pontoMedioZ and y <= pontoMedioY:
        pontosQdr[1].append(l)
        vetorQdr[1].append([x, y, z])
    elif x >= pontoMedioX and z >= pontoMedioZ and y <= pontoMedioY:
        pontosQdr[2].append(l)
        vetorQdr[2].append([x, y, z])
    elif x >= pontoMedioX and z <= pontoMedioZ and y <= pontoMedioY:
        pontosQdr[3].append(l)
        vetorQdr[3].append([x, y, z])
    elif x <= pontoMedioX and z <= pontoMedioZ and y <= pontoMedioY:

```

```

pontosQdr[4].append(1)
vetorQdr[4].append([x, y, z])
elif x <= pontoMedioX and z >= pontoMedioZ and y >= pontoMedioY:
pontosQdr[5].append(1)
vetorQdr[5].append([x, y, z])
elif x >= pontoMedioX and z >= pontoMedioZ and y >= pontoMedioY:
pontosQdr[6].append(1)
vetorQdr[6].append([x, y, z])
elif x >= pontoMedioX and z <= pontoMedioZ and y >= pontoMedioY:
pontosQdr[7].append(1)
vetorQdr[7].append([x, y, z])
elif x <= pontoMedioX and z <= pontoMedioZ and y >= pontoMedioY:
pontosQdr[8].append(1)
vetorQdr[8].append([x, y, z])

# Gera as coordenadas para o vetor no octante com maior numero de pontos
vetor =
np.mean(max(vetorQdr[1],vetorQdr[2],vetorQdr[3],vetorQdr[4],vetorQdr[5],vetorQdr[6],vetorQdr[7],vet
orQdr[8], key = lambda x: len(x)), axis=0)

# Plota o vetor
arr = Arrow3D([0, vetor[0]], [0, vetor[1]], [0, vetor[2]], mutation_scale=20, lw=2, arrowstyle="->",
color="r")
ax.add_artist(arr)

# Plota pontos no grafico
for ptq in vetorQdr:
if len(vetorQdr[ptq]):
x,y,z = zip(*vetorQdr[ptq])
l = ax.scatter(x,y,z, cmap=cm.jet, color=colors[ptq-1])
if showColor:
l.set_label("Quadrante "+str(ptq))
ax.legend(scatterpoints=1, loc=('upper left'), fontsize="x-small")

# Calcula Chi-Quadrado X2

```

```
nPontos = len(pontosQdr[1]) + len(pontosQdr[2]) + len(pontosQdr[3]) + len(pontosQdr[4]) +
len(pontosQdr[5]) + len(pontosQdr[6]) + len(pontosQdr[7]) + len(pontosQdr[8])
```

```
fEsperada = nPontos / 8.0
```

```
chi = (((pow((len(pontosQdr[1]) - fEsperada),2)) / float(fEsperada)) +
        ((pow((len(pontosQdr[2]) - fEsperada),2)) / float(fEsperada)) +
        ((pow((len(pontosQdr[3]) - fEsperada),2)) / float(fEsperada)) +
        ((pow((len(pontosQdr[4]) - fEsperada),2)) / float(fEsperada)) +
        ((pow((len(pontosQdr[5]) - fEsperada),2)) / float(fEsperada)) +
        ((pow((len(pontosQdr[6]) - fEsperada),2)) / float(fEsperada)) +
        ((pow((len(pontosQdr[7]) - fEsperada),2)) / float(fEsperada)) +
        ((pow((len(pontosQdr[8]) - fEsperada),2)) / float(fEsperada))))
```

```
# Salva no arquivo CSV os resultados para a amostra analisada
```

```
if outputExt == 'csv':
```

```
    with open(arquivoSaida, 'ab') as csvfile:
```

```
        write = csv.writer(csvfile, delimiter=delimiter)
```

```
        write.writerow(['Resultados para amostra ' + snames[i] + ' x ' + snames[i+slen] + ' x ' +
snames[i+2*slen]])
```

```
        write.writerow(['Quadrante', '# Amostras', 'Amostras'])
```

```
        write.writerow(['1', len(pontosQdr[1]) + pontosQdr[1])
```

```
        write.writerow(['2', len(pontosQdr[2]) + pontosQdr[2])
```

```
        write.writerow(['3', len(pontosQdr[3]) + pontosQdr[3])
```

```
        write.writerow(['4', len(pontosQdr[4]) + pontosQdr[4])
```

```
        write.writerow(['5', len(pontosQdr[5]) + pontosQdr[5])
```

```
        write.writerow(['6', len(pontosQdr[6]) + pontosQdr[6])
```

```
        write.writerow(['7', len(pontosQdr[7]) + pontosQdr[7])
```

```
        write.writerow(['8', len(pontosQdr[8]) + pontosQdr[8])
```

```
        write.writerow(['Chi-Quadrado', chi])
```

```
        write.writerow([])
```

```
elif outputExt == 'xlsx' or outputExt == 'xls':
```

```
    wb = Workbook(write_only=True)
```

```
    ws = wb.create_sheet()
```

```
    ws.append(['Resultados para amostra ' + snames[i] + ' x ' + snames[i+slen] + ' x ' + snames[i+2*slen]])
```

```
    ws.append(['Quadrante', '# Amostras', 'Amostras'])
```

```

ws.append(['1', len(pontosQdr[1]) + pontosQdr[1])
ws.append(['2', len(pontosQdr[2]) + pontosQdr[2])
ws.append(['3', len(pontosQdr[3]) + pontosQdr[3])
ws.append(['4', len(pontosQdr[4]) + pontosQdr[4])
ws.append(['5', len(pontosQdr[5]) + pontosQdr[5])
ws.append(['6', len(pontosQdr[6]) + pontosQdr[6])
ws.append(['7', len(pontosQdr[7]) + pontosQdr[7])
ws.append(['8', len(pontosQdr[8]) + pontosQdr[8])
ws.append(['Chi-Quadrado', chi])
wb.save(arquivoSaida.rsplit('.',1)[0]+'xlsx')

```

```
# Grid na direcao Z
```

```

qdrx1 = np.linspace(min(pontos[snames[i]]), max(pontos[snames[i]]), 10)
qdry1 = np.linspace(min(pontos[snames[i+slen]]), max(pontos[snames[i+slen]]), 10)
qdrz1 = np.tile(pontoMedioZ, 10)
qdrx1, qdry1 = np.meshgrid(qdrx1, qdry1)
ax.plot_wireframe(qdrx1, qdry1, qdrz1, color='gray')

```

```
# Grid na direcao X
```

```

qdrx2 = np.tile(pontoMedioX, 10)
qdry2 = np.linspace(min(pontos[snames[i+slen]]), max(pontos[snames[i+slen]]), 10)
qdrz2 = np.linspace(min(pontos[snames[i+2*slen]]), max(pontos[snames[i+2*slen]]), 10)
qdry2, qdrz2 = np.meshgrid(qdry2, qdrz2)
ax.plot_wireframe(qdrx2, qdry2, qdrz2, color='gray')

```

```
# Grid na direcao Y
```

```

qdrx3 = np.linspace(min(pontos[snames[i]]), max(pontos[snames[i]]), 10)
qdry3 = np.tile(pontoMedioY, 10)
qdrz3 = np.linspace(min(pontos[snames[i+2*slen]]), max(pontos[snames[i+2*slen]]), 10)
qdrx3, qdrz3 = np.meshgrid(qdrx3, qdrz3)
ax.plot_wireframe(qdrx3, qdry3, qdrz3, color='gray')

```

```
# Nome dos eixos
```

```
ax.set_xlabel('\n' + snames[i], labelpad=10, linespacing=3)
```

```
ax.set_ylabel('\n' + snames[i+slen], labelpad=10, linespacing=3)
ax.set_zlabel('\n' + snames[i+2*slen], labelpad=10, linespacing=3)

# Define os extremos dos eixos
ax.set_xlim3d(min(pontos[snames[i]]), max(pontos[snames[i]]))
ax.set_ylim3d(min(pontos[snames[i+1]]), max(pontos[snames[i+1]]))
ax.set_zlim3d(min(pontos[snames[i+2]]), max(pontos[snames[i+2]]))

# End of - Itera sobre matriz de dados para criar os graficos 3D de todas as series

print('Plotando gráficos...')

# Salva todos os graficos em um arquivo de imagem
plt.savefig(oImagem, dpi=400)

# Exibe os graficos na tela
if showGraph:
    plt.show()

# Remove os graficos da memoria
plt.close()
```

APÊNDICE D – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS ESTÁGIOS SUCESSIONAIS

Tabela D.1 – Estatística descritiva dos estágios sucessionais por cena e considerando a classe de iluminação local Muito Iluminado.

MUITO ILUMINADO						
		Estágio Sucessional	Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (inferior)	Intervalo de Confiança (superior)
1989	Brightness	SS1	89,459	7,942	73,892	105,026
	Brightness	SS2	81,639	4,304	73,203	90,075
	Brightness	SS3	66,753	9,950	47,251	86,255
	Brightness	P	46,502	4,420	37,839	55,165
	Greenness	SS1	63,964	4,590	54,967	72,961
	Greenness	SS2	68,054	5,850	56,588	79,519
	Greenness	SS3	57,545	10,361	37,236	77,853
	Greenness	P	36,141	4,021	28,261	44,022
	Wetness	SS1	-19,309	6,462	-31,975	-6,644
	Wetness	SS2	-10,127	2,496	-15,019	-5,235
	Wetness	SS3	-5,253	2,344	-9,847	-0,659
	Wetness	P	-2,205	0,548	-3,279	-1,130
1996	Brightness	SS1	96,478	20,422	56,452	136,505
	Brightness	SS2	80,171	3,906	72,515	87,827
	Brightness	SS3	60,073	14,566	31,523	88,623
	Brightness	P	38,564	5,050	28,666	48,463
	Greenness	SS1	67,075	11,455	44,623	89,527
	Greenness	SS2	78,051	5,163	67,932	88,171
	Greenness	SS3	61,679	13,000	36,198	87,160
	Greenness	P	39,379	4,696	30,175	48,583
	Wetness	SS1	-29,269	17,284	-63,146	4,607
	Wetness	SS2	-13,074	3,177	-19,302	-6,847
	Wetness	SS3	-10,244	4,267	-18,608	-1,881
	Wetness	P	-5,240	0,729	-6,669	-3,810
2005	Brightness	SS1	97,261	17,964	62,052	132,470
	Brightness	SS2	84,478	4,533	75,593	93,363
	Brightness	SS3	64,289	13,893	37,059	91,520
	Brightness	P	46,800	4,007	38,946	54,654
	Greenness	SS1	79,806	10,897	58,448	101,165
	Greenness	SS2	89,651	7,292	75,359	103,942
	Greenness	SS3	70,123	14,528	41,649	98,597
	Greenness	P	49,576	4,779	40,210	58,943
	Wetness	SS1	-22,339	14,063	-49,902	5,224
	Wetness	SS2	-10,933	2,535	-15,902	-5,965
	Wetness	SS3	-8,319	2,938	-14,078	-2,559
	Wetness	P	-5,634	0,789	-7,179	-4,088
2011	Brightness	SS1	97,589	17,364	63,555	131,623
	Brightness	SS2	77,714	5,217	67,488	87,939
	Brightness	SS3	66,795	10,748	45,730	87,861
	Brightness	P	46,275	3,627	39,167	53,384
	Greenness	SS1	64,818	11,730	41,826	87,809
	Greenness	SS2	77,725	7,160	63,691	91,760
	Greenness	SS3	66,296	10,705	45,313	87,278
	Greenness	P	45,918	3,421	39,214	52,623
	Wetness	SS1	-31,234	15,541	-61,694	-0,774
	Wetness	SS2	-12,197	2,323	-16,749	-7,645
	Wetness	SS3	-9,591	2,305	-14,109	-5,072
	Wetness	P	-6,925	0,596	-8,094	-5,756

Tabela D.2 - Estatística descritiva dos estágios sucessionais por cena e considerando a classe de iluminação local Iluminado.

ILUMINADO						
		Estágio Sucessional	Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (inferior)	Intervalo de Confiança (superior)
1989	Brightness	SS1	90,002	9,667	71,054	108,950
	Brightness	SS2	76,588	4,807	67,165	86,010
	Brightness	SS3	58,547	3,481	51,725	65,369
	Brightness	P	53,965	7,185	39,881	68,048
	Greenness	SS1	62,648	4,610	53,613	71,683
	Greenness	SS2	58,954	5,721	47,742	70,167
	Greenness	SS3	45,471	5,470	34,749	56,192
	Greenness	P	38,766	3,416	32,070	45,462
	Wetness	SS1	-15,635	8,194	-31,695	0,425
	Wetness	SS2	-8,159	3,195	-14,422	-1,896
	Wetness	SS3	-4,528	1,856	-8,166	-0,890
	Wetness	P	-2,561	1,364	-5,234	0,111
	1996	Brightness	SS1	81,871	21,048	40,618
Brightness		SS2	67,619	5,702	56,443	78,796
Brightness		SS3	50,113	7,093	36,210	64,016
Brightness		P	40,888	6,027	29,075	52,701
Greenness		SS1	57,448	9,041	39,727	75,169
Greenness		SS2	62,106	6,514	49,338	74,874
Greenness		SS3	49,317	8,822	32,025	66,608
Greenness		P	39,090	5,774	27,773	50,406
Wetness		SS1	-21,077	14,279	-49,064	6,910
Wetness		SS2	-10,681	3,413	-17,370	-3,991
Wetness		SS3	-7,649	1,831	-11,238	-4,060
Wetness		P	-4,804	1,200	-7,157	-2,452
2005		Brightness	SS1	96,798	29,734	38,520
	Brightness	SS2	71,501	6,713	58,343	84,660
	Brightness	SS3	54,041	8,444	37,492	70,591
	Brightness	P	43,267	5,115	33,243	53,292
	Greenness	SS1	59,147	6,184	47,027	71,267
	Greenness	SS2	70,253	9,503	51,627	88,879
	Greenness	SS3	56,113	9,521	37,453	74,774
	Greenness	P	44,634	5,200	34,442	54,826
	Wetness	SS1	-30,663	13,014	-56,170	-5,155
	Wetness	SS2	-9,481	3,316	-15,981	-2,982
	Wetness	SS3	-7,837	1,705	-11,179	-4,495
	Wetness	P	-5,002	1,378	-7,702	-2,302
	2011	Brightness	SS1	100,457	31,242	39,224
Brightness		SS2	70,303	5,797	58,940	81,666
Brightness		SS3	54,925	7,129	40,952	68,898
Brightness		P	46,141	4,491	37,340	54,943
Greenness		SS1	60,706	12,039	37,110	84,301
Greenness		SS2	63,636	8,447	47,079	80,192
Greenness		SS3	52,090	7,208	37,963	66,217
Greenness		P	44,356	4,180	36,164	52,548
Wetness		SS1	-34,190	25,939	-85,030	16,650
Wetness		SS2	-12,268	2,812	-17,779	-6,757
Wetness		SS3	-10,041	2,425	-14,794	-5,287
Wetness		P	-6,613	1,152	-8,872	-4,354

Tabela D.3 - Estatística descritiva dos estágios sucessionais por cena e considerando a classe de iluminação local Pouco Iluminado.

POUCO ILUMINADO						
	Estágio Sucessional	Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (inferior)	Intervalo de Confiança (superior)	
1989	Brightness	SS1	79,883	3,957	72,128	87,638
	Brightness	SS2	69,700	5,293	59,327	80,074
	Brightness	SS3	57,527	5,168	47,399	67,655
	Brightness	P	51,071	3,879	43,468	58,673
	Greenness	SS1	59,141	3,628	52,030	66,252
	Greenness	SS2	57,571	8,202	41,494	73,647
	Greenness	SS3	45,475	7,011	31,734	59,216
	Greenness	P	35,285	2,140	31,092	39,479
	Wetness	SS1	-14,684	2,934	-20,434	-8,934
	Wetness	SS2	-5,951	3,778	-13,356	1,455
	Wetness	SS3	-4,108	2,006	-8,040	-0,176
	Wetness	P	-2,181	0,774	-3,698	-0,664
	1996	Brightness	SS1	63,620	13,221	37,708
Brightness		SS2	56,082	5,859	44,599	67,566
Brightness		SS3	42,742	5,536	31,891	53,593
Brightness		P	34,860	1,577	31,768	37,952
Greenness		SS1	46,548	7,124	32,584	60,512
Greenness		SS2	56,209	8,793	38,975	73,443
Greenness		SS3	42,639	7,571	27,800	57,478
Greenness		P	31,439	1,623	28,258	34,619
Wetness		SS1	-17,901	11,973	-41,368	5,567
Wetness		SS2	-7,620	3,446	-14,375	-0,865
Wetness		SS3	-6,299	1,539	-9,315	-3,282
Wetness		P	-4,908	0,834	-6,543	-3,273
2005		Brightness	SS1	66,174	6,107	54,204
	Brightness	SS2	50,741	4,466	41,989	59,494
	Brightness	SS3	43,658	5,623	32,636	54,680
	Brightness	P	36,094	0,923	34,284	37,903
	Greenness	SS1	45,133	4,370	36,568	53,697
	Greenness	SS2	55,452	5,986	43,720	67,185
	Greenness	SS3	46,735	7,911	31,228	62,241
	Greenness	P	35,978	1,148	33,728	38,228
	Wetness	SS1	-18,876	0,413	-19,686	-18,066
	Wetness	SS2	-4,440	2,725	-9,782	0,901
	Wetness	SS3	-4,869	1,691	-8,184	-1,554
	Wetness	P	-4,585	1,034	-6,612	-2,559
	2011	Brightness	SS1	76,327	4,446	67,613
Brightness		SS2	56,497	4,947	46,801	66,193
Brightness		SS3	50,807	5,967	39,112	62,502
Brightness		P	40,362	0,656	39,077	41,647
Greenness		SS1	51,243	7,778	35,998	66,488
Greenness		SS2	56,700	7,276	42,439	70,960
Greenness		SS3	50,209	8,270	34,000	66,418
Greenness		P	37,118	0,943	35,270	38,966
Wetness		SS1	-24,125	3,899	-31,766	-16,483
Wetness		SS2	-7,069	2,985	-12,918	-1,219
Wetness		SS3	-7,870	1,911	-11,615	-4,125
Wetness		P	-6,749	0,679	-8,081	-5,417

APÊNDICE E – ESTATÍSTICA DO TESTE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Tabela E.1 – Valor p do teste Kolmogorov-Smirnov na comparação entre imagens. O mesmo estágio sucessional é comparado em cenas diferentes. Valores com fundo cinza representam resultados significativos adotando $\alpha = 0,05$.

Comparação	Feição TC	Estágio	Valor-p do teste Kolmogorov-Smirnov		
			MUITO ILUMINADO	ILUMINADO	POUCO ILUMINADO
89x96	Brightness	SS1	0,89824	0,17749	0,17749
89x05	Brightness	SS1	0,48531	0,80952	0,07143
89x11	Brightness	SS1	0,32065	0,80952	0,85714
96x05	Brightness	SS1	0,98011	0,85714	0,57143
96x11	Brightness	SS1	0,91049	0,85714	0,57143
05x11	Brightness	SS1	0,99005	1,00000	0,33333
89x96	Greenness	SS1	0,12025	0,17749	0,02597
89x05	Greenness	SS1	0,00498	0,57143	0,07143
89x11	Greenness	SS1	0,80384	0,80952	0,21429
96x05	Greenness	SS1	0,08702	0,85714	0,95238
96x11	Greenness	SS1	0,66014	1,00000	0,57143
05x11	Greenness	SS1	0,08702	1,00000	1,00000
89x96	Wetness	SS1	0,39175	0,68831	0,68831
89x05	Wetness	SS1	0,82271	0,28571	0,07143
89x11	Wetness	SS1	0,32065	0,57143	0,07143
96x05	Wetness	SS1	0,28267	0,42857	0,57143
96x11	Wetness	SS1	0,91049	0,42857	0,57143
05x11	Wetness	SS1	0,58462	1,00000	0,33333
89x96	Brightness	SS2	0,16511	0,02098	0,00022
89x05	Brightness	SS2	0,41272	0,05245	0,00005
89x11	Brightness	SS2	0,10942	0,01764	0,00025
96x05	Brightness	SS2	0,21148	0,23007	0,04987
96x11	Brightness	SS2	0,17818	0,35171	0,95954
05x11	Brightness	SS2	0,02014	0,95726	0,30170
89x96	Greenness	SS2	0,00076	0,34287	0,78693
89x05	Greenness	SS2	0,00001	0,01234	0,82271
89x11	Greenness	SS2	0,04689	0,20030	0,95954
96x05	Greenness	SS2	0,00437	0,10558	0,39175
96x11	Greenness	SS2	0,62659	0,98947	0,83541
05x11	Greenness	SS2	0,00310	0,13535	0,78388
89x96	Wetness	SS2	0,11337	0,20030	0,16782
89x05	Wetness	SS2	0,37011	0,78693	0,48531
89x11	Wetness	SS2	0,10942	0,00704	0,37113
96x05	Wetness	SS2	0,21148	0,73958	0,16596
96x11	Wetness	SS2	0,17818	0,73011	0,88761
05x11	Wetness	SS2	0,29155	0,03027	0,37629
89x96	Brightness	SS3	0,41752	0,01234	0,00006
89x05	Brightness	SS3	0,78693	0,07102	0,00003
89x11	Brightness	SS3	0,96755	0,24476	0,02051
96x05	Brightness	SS3	0,78693	0,47258	0,59684
96x11	Brightness	SS3	0,30590	0,46748	0,02401
05x11	Brightness	SS3	0,67964	0,97268	0,00923
89x96	Greenness	SS3	0,16782	0,41752	0,43451
89x05	Greenness	SS3	0,05245	0,01617	0,88494
89x11	Greenness	SS3	0,06233	0,14649	0,27476
96x05	Greenness	SS3	0,16782	0,22064	0,71918
96x11	Greenness	SS3	0,84866	0,46748	0,21277

(Continua)

Tabela E.1 – Continuação.

05x11	Greenness	SS3	0,27374	0,34332	0,60486
89x96	Wetness	SS3	0,01234	0,01234	0,01727
89x05	Wetness	SS3	0,16782	0,00044	0,31314
89x11	Wetness	SS3	0,00271	0,00008	0,00019
96x05	Wetness	SS3	0,78693	0,87161	0,15869
96x11	Wetness	SS3	0,93876	0,04976	0,09746
05x11	Wetness	SS3	0,17974	0,05903	0,00006
89x96	Brightness	P	0,07937	0,07937	0,00794
89x05	Brightness	P	1,00000	0,07937	0,00794
89x11	Brightness	P	1,00000	0,35714	0,00794
96x05	Brightness	P	0,07937	0,35714	0,87302
96x11	Brightness	P	0,07937	0,07937	0,00794
05x11	Brightness	P	0,87302	0,35714	0,00794
89x96	Greenness	P	0,35714	0,87302	0,07937
89x05	Greenness	P	0,00794	0,07937	0,87302
89x11	Greenness	P	0,00794	0,07937	0,35714
96x05	Greenness	P	0,07937	0,07937	0,00794
96x11	Greenness	P	0,07937	0,07937	0,00794
05x11	Greenness	P	0,35714	0,87302	0,35714
89x96	Wetness	P	0,00794	0,07937	0,00794
89x05	Wetness	P	0,00794	0,00794	0,00794
89x11	Wetness	P	0,00794	0,00794	0,00794
96x05	Wetness	P	0,87302	0,87302	0,87302
96x11	Wetness	P	0,07937	0,07937	0,00794
05x11	Wetness	P	0,07937	0,35714	0,00794

Tabela E.2 - Valor p do teste Kolmogorov-Smirnov na comparação entre estágios. Considerando uma mesma cena, foi comparado os diferentes estágios presentes nela. Valores com fundo cinza representam resultados significativos adotando $\alpha = 0,05$.

Comparação	Feição TC	Imagem	Valor p do teste Kolmogorov-Smirnov		
			MUITO ILUMINADO	ILUMINADO	POUCO ILUMINADO
SS1xSS2	Brightness	1989	0,03027	0,01931	0,00175
SS1xSS3	Brightness	1989	0,00022	0,00067	0,00025
SS1xP	Brightness	1989	0,00067	0,00794	0,00433
SS2xSS3	Brightness	1989	0,00136	0,00001	0,00022
SS2xP	Brightness	1989	0,00100	0,00067	0,00067
SS3xP	Brightness	1989	0,00400	0,35065	0,16583
SS1xSS2	Greenness	1989	0,23007	0,16583	0,37113
SS1xSS3	Greenness	1989	0,41752	0,00067	0,00175
SS1xP	Greenness	1989	0,00067	0,00794	0,00433
SS2xSS3	Greenness	1989	0,04456	0,00022	0,00206
SS2xP	Greenness	1989	0,00100	0,00067	0,00067
SS3xP	Greenness	1989	0,00400	0,01931	0,01931
SS1xSS2	Wetness	1989	0,00370	0,06061	0,00175
SS1xSS3	Wetness	1989	0,00001	0,00067	0,00025
SS1xP	Wetness	1989	0,00067	0,00794	0,00433
SS2xSS3	Wetness	1989	0,00704	0,01234	0,78693
SS2xP	Wetness	1989	0,00100	0,00400	0,00400
SS3xP	Wetness	1989	0,00400	0,16583	0,01931
SS1xSS2	Brightness	1996	0,02014	0,27353	0,65468
SS1xSS3	Brightness	1996	0,00041	0,00175	0,00275
SS1xP	Brightness	1996	0,00155	0,00433	0,00794
SS2xSS3	Brightness	1996	0,00012	0,00002	0,00043
SS2xP	Brightness	1996	0,00046	0,00100	0,00067
SS3xP	Brightness	1996	0,00400	0,06061	0,00275
SS1xSS2	Greenness	1996	0,06533	0,27353	0,16583
SS1xSS3	Greenness	1996	0,39175	0,24875	0,69643
SS1xP	Greenness	1996	0,00155	0,02597	0,00794
SS2xSS3	Greenness	1996	0,00043	0,01234	0,01115
SS2xP	Greenness	1996	0,00046	0,00100	0,00067
SS3xP	Greenness	1996	0,00400	0,06061	0,00962
SS1xSS2	Wetness	1996	0,00310	0,17582	0,06061
SS1xSS3	Wetness	1996	0,00041	0,00025	0,01374
SS1xP	Wetness	1996	0,00155	0,00433	0,07937
SS2xSS3	Wetness	1996	0,02421	0,02098	0,28689
SS2xP	Wetness	1996	0,00046	0,01399	0,06061
SS3xP	Wetness	1996	0,00400	0,01931	0,02930
SS1xSS2	Brightness	2005	0,10121	0,18182	0,04444
SS1xSS3	Brightness	2005	0,00041	0,01905	0,01307
SS1xP	Brightness	2005	0,00155	0,09524	0,09524
SS2xSS3	Brightness	2005	0,00012	0,00002	0,05793
SS2xP	Brightness	2005	0,00046	0,00067	0,00155
SS3xP	Brightness	2005	0,01931	0,02474	0,00059
SS1xSS2	Greenness	2005	0,06533	0,18182	0,13333
SS1xSS3	Greenness	2005	0,24754	0,91429	0,94118
SS1xP	Greenness	2005	0,00155	0,09524	0,09524
SS2xSS3	Greenness	2005	0,00636	0,00248	0,12557
SS2xP	Greenness	2005	0,00046	0,00067	0,00155

(Continua)

Tabela E.2 - Continuação.

SS3xP	Greenness	2005	0,00400	0,02474	0,00206
SS1xSS2	Wetness	2005	0,14388	0,03030	0,04444
SS1xSS3	Wetness	2005	0,02066	0,01905	0,01307
SS1xP	Wetness	2005	0,00155	0,09524	0,09524
SS2xSS3	Wetness	2005	0,02421	0,47258	0,88768
SS2xP	Wetness	2005	0,00046	0,01931	0,31624
SS3xP	Wetness	2005	0,06061	0,02474	0,53118
SS1xSS2	Brightness	2011	0,01305	0,10909	0,07143
SS1xSS3	Brightness	2011	0,00014	0,01667	0,01053
SS1xP	Brightness	2011	0,00253	0,09524	0,09524
SS2xSS3	Brightness	2011	0,03813	0,00016	0,10101
SS2xP	Brightness	2011	0,00155	0,00100	0,00433
SS3xP	Brightness	2011	0,00103	0,01909	0,00036
SS1xSS2	Greenness	2011	0,03263	0,92727	0,85714
SS1xSS3	Greenness	2011	0,56986	0,46667	0,97895
SS1xP	Greenness	2011	0,00253	0,09524	0,09524
SS2xSS3	Greenness	2011	0,01345	0,02136	0,30233
SS2xP	Greenness	2011	0,00155	0,00599	0,00433
SS3xP	Greenness	2011	0,00103	0,04747	0,00036
SS1xSS2	Wetness	2011	0,00466	0,10909	0,07143
SS1xSS3	Wetness	2011	0,00083	0,01667	0,01053
SS1xP	Wetness	2011	0,00253	0,09524	0,09524
SS2xSS3	Wetness	2011	0,03813	0,21969	0,30233
SS2xP	Wetness	2011	0,00155	0,00100	0,81818
SS3xP	Wetness	2011	0,03027	0,00568	0,17159