



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.14.13.46-TDI

**MINERAÇÃO E ANÁLISE DE TRAJETÓRIAS DE
MUDANÇA DE COBERTURA DA TERRA:
EXPLORANDO PADRÕES COMPORTAMENTAIS NO
CONTEXTO DA DEGRADAÇÃO FLORESTAL**

Marcio Azeredo

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Antônio Miguel Vieira Monteiro, e Maria Isabel Sobral Escada, aprovada em 23 de março de 2017.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NGPJ7H>

INPE
São José dos Campos
2017

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

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 Duca 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, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.14.13.46-TDI

**MINERAÇÃO E ANÁLISE DE TRAJETÓRIAS DE
MUDANÇA DE COBERTURA DA TERRA:
EXPLORANDO PADRÕES COMPORTAMENTAIS NO
CONTEXTO DA DEGRADAÇÃO FLORESTAL**

Marcio Azeredo

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Antônio Miguel Vieira Monteiro, e Maria Isabel Sobral Escada, aprovada em 23 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NGPJ7H>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Azeredo, Marcio.

Az24m Mineração e análise de trajetórias de mudança de cobertura da terra: explorando padrões comportamentais no contexto da degradação florestal / Marcio Azeredo. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxvi + 124 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.14.13.46-TDI)

Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Antônio Miguel Vieira Monteiro, e Maria Isabel Sobral Escada.

1. Trajetória de mudança. 2. Cobertura da terra. 3. Degradação florestal. 4. Padrão comportamental. 5. Mineração de trajetória. I.Título.

CDU 502.5:004.62



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): **Marclo Azeredo**

Título: "MINERAÇÃO E ANÁLISE DE TRAJETÓRIAS DE MUDANÇA DE COBERTURA DA TERRA: EXPLORANDO PADRÕES COMPORTAMENTAIS NO CONTEXTO DA DEGRADAÇÃO FLORESTAL"

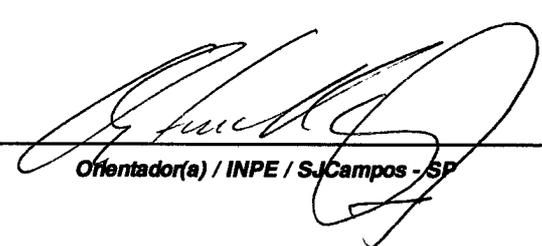
Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em **Computação Aplicada**

Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Maria Isabel Sobral Escada



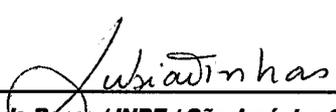
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Karine Reis Ferreira



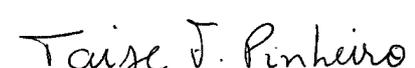
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Lúbia Vinhas



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Taise Farias Pinheiro



Convidado(a) / Vila R.C.A. Mineral / Aparecida de Goiânia - GO

Dr. Clodoveu Augusto Davis Junior



Convidado(a) / UFMG / Belo Horizonte - MG

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

“Quem não lê, mal fala, mal ouve, mal vê”.

MONTEIRO LOBATO

A minha esposa querida e adoráveis filhas, com todo o meu amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Departamento de Ciência e Tecnologia do Exército (DCT), por permitirem que eu realizasse este Curso de Pós-graduação em um Instituto de tamanha importância no cenário científico nacional.

Ao Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro e Dra. Maria Isabel Sobral Escada, profissionais do mais alto nível, agradeço o apoio incondicional, a dedicação e a paciência na transmissão dos conhecimentos. É com admiração que digo que foi um imenso prazer em tê-los a meu lado nesta jornada.

Aos docentes, discentes e funcionários do INPE.

À Dra Taise Farias Pinheiro, por produzir e disponibilizar gentilmente a base de dados de degradação florestal utilizada neste trabalho.

A meus pais, pela qualidade da educação que me proporcionaram (em todos os sentidos). Certamente, foram os primeiros a acreditar em mim.

A minha linda família, por todo o seu amor e suporte. Apesar de parecer um esforço solitário, eu não chegaria até aqui sem ter vocês a meu lado. Um agradecimento especial a minha esposa e maior incentivadora, por sua cumplicidade e dedicação.

RESUMO

Considerando os processos que envolvem coberturas florestais, o *Processo de Degradação Florestal* é particularmente importante, uma vez que, mantidas as condições que lhe dão origem, altera a estrutura da floresta de forma lenta e progressiva. Para a cobertura florestal, implica na redução das funções ecológicas e do armazenamento de carbono, na fragmentação de ecossistemas e na perda do potencial do uso florestal para atividades econômicas. Dada a sua relevância, é preciso não só compreender a dinâmica de como tal processo ocorre, mas também *onde, quando e como* se comportam os atores e os mecanismos associados a essas alterações. Envolvendo etapas de maior e menor intensidade e até mesmo a possibilidade de reversão, a *degradação florestal* requer longos períodos de observação em grandes bases de dados espaço-temporais, de forma continuada e sistemática, definindo as *Trajетórias de Mudança de Cobertura Florestal*. Tais trajetórias, por sua vez, são identificadas a partir das alterações recorrentes presentes nas propriedades das unidades de análise observadas e utilizadas na sua constituição. Para a identificação e exploração das referidas trajetórias, são definidos e ampliados conceitos estabelecidos na literatura de trajetórias de objetos móveis. Desse modo, esta Tese propõe, formaliza e implementa, na forma de uma biblioteca de funções parametrizáveis, os elementos que permitem estabelecer uma nova metodologia computacional para auxiliar analistas na exploração de grandes bases de dados no domínio dos estudos florestais, por intermédio da *mineração de padrões de trajetórias* e de seus agrupamentos. Para tal, este trabalho traz duas contribuições: (1) define e implementa os Padrões Comportamentais de Convergência, Encontro, Detecção de Inconsistências, Detecção de Anomalias, Rebanho e Liderança, encontrados na literatura de objetos móveis, para o contexto das Trajetórias de Mudança de Cobertura. Tal conjunto de definições foi aqui denominado de *Behavioral Patterns Mining on Land Cover Change* (BPML); e (2) define e implementa uma metodologia para agrupar as trajetórias de mudança de cobertura florestal, aqui denominada de *Grouping by Similarity of Temporal Evolution* (GSTE), baseada nas semelhanças entre as evoluções temporais dessas trajetórias. Esta metodologia utiliza de forma combinada os algoritmos computacionais *Dynamic Time Warping* (DTW), *Classical Multidimensional Scaling* (CMDs) e *K-Means Clustering*. Como prova de conceito, três estudos de caso foram conduzidos, nos quais os padrões comportamentais (BPML) e o método de agrupamento de trajetórias por semelhança de evolução temporal (GSTE) foram testados em dois conjuntos de dados de degradação florestal referentes às regiões do entorno dos municípios de Novo Progresso - PA e Sinop - MT. As referidas bases de dados utilizadas são constituídas por 27.815 e 27.367 unidades de análise (células), respectivamente, com resolução espacial de 1x1km, resolução temporal de 1 ano e extensão temporal de 28 anos (1984 a 2011).

Palavras-chave: Trajetória de Mudança. Cobertura da Terra. Degradação Florestal. Padrão Comportamental. Mineração de Trajetória.

DATA MINING AND ANALYSIS OF LAND COVER CHANGE TRAJECTORIES: EXPLORING BEHAVIORAL PATTERNS IN THE CONTEXT OF FOREST DEGRADATION

ABSTRACT

Considering the processes that involves forest cover, the *Forest Degradation Process* is particularly important because, keeping its original conditions, the structure of the forest is changed in a slow and progressive way. Regarding the forest cover, such process implies in a reduction of ecological functions and carbon storage in the fragmentation of ecosystems and the loss of the forest use potential for economic activities. Given its relevance, it is necessary not only to understand the dynamics of how these processes occur, but also *where, when* and *how* the actors and mechanisms associated with those changes behave. Concerning higher and lower intensity stages and even the possibility of reversal, *forest degradation* requires long periods of observation in large space-time databases, in a continuous and systematic way, defining the *Forest Cover Change Trajectories*. These trajectories, on the other hand, are identified from the recurrent changes in the properties of the units of analysis observed and used in its constitution. For the identification and exploration of these trajectories, this work defines and expands concepts established in the literature of moving objects trajectories. Thus, this thesis proposes, formalizes and implements, in the form of a library of parametrized functions, the elements that allow the establishment of a new computational methodology to assist analysts to deal with large databases of forest studies, through the data *mining of trajectory patterns* and their groupings. This study brings two innovative contributions: (1) it defines and implements the Behavior Patterns of *Convergence, Encounter, Inconsistencies Detection, Anomalies Detection, Flock* and *Leadership*, found in the literature to deal with moving objects, in the context of *Forest Cover Change Trajectories*. This set was called *Behavioral Patterns Mining on Land Cover Change (BPML)*; and (2) it defines and implements a methodology to group the *Forest Cover Change Trajectories*, here called *Grouping by Similarity of Temporal Evolution (GSTE)*, considering the similarities between the respective temporal evolutions and using computational algorithms of *Dynamic Time Warping (DTW)*, *Classical Multidimensional Scaling (CMDS)* and *K-Means Clustering*. As proof of concept, three case studies were generated and the behavior patterns (BPML) as well as the method of trajectory grouping by similarity of temporal evolution (GSTE) were tested in two sets of forest degradation data, referring to the regions surrounding the municipalities of Novo Progresso - PA and Sinop - MT. These databases are composed by 27,815 and 27,367 units of analysis (cells), respectively, with spatial resolution of 1x1km, temporal resolution of 1 year and temporal extension of 28 years (1984 to 2011).

Keywords: Land Cover Change Trajectory. Forest Degradation. Behavioral Pattern. Trajectory Data Mining.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Exemplos de cobertura da terra.	9
2.2 Exemplos de uso da terra.	10
2.3 Mudança de cobertura por modificação e conversão.	11
2.4 Relação entre os fatores motivadores, o uso e a cobertura da terra.	11
2.5 Exemplo de classificação temporal do <i>pixel</i> baseada em séries temporais de índices de vegetação.	15
2.6 A relação entre a escala temporal dos dados e dos processos.	17
2.7 Redução do estoque de carbono pelo processo de degradação florestal.	17
2.8 Etapas do Processo KDD.	19
2.9 Tarefas de descobrimento em mineração de dados.	20
2.10 Padrões comportamentais de trajetórias de objetos móveis.	23
2.11 Trajetórias com domínio de coberturas <i>A</i> e <i>B</i>	25
2.12 Comparação entre a evolução temporal de trajetórias de mudança de cobertura.	26
2.13 Correspondência entre um par de sequências de dados <i>X</i> e <i>Y</i>	27
2.14 Alinhamento resultante entre um par de sequências de dados.	28
2.15 Iterações do método <i>K-Means Clustering</i>	31
3.1 Possíveis representações geométricas de um objeto <i>o</i>	34
3.2 Objeto <i>o</i> observado com resolução temporal anual, no instante $t = 1993$	34
3.3 Estados de um objeto <i>o</i> em diferentes instantes.	35
3.4 Observações de um objeto <i>o</i>	35
3.5 Trajetória T_o referente ao objeto <i>o</i>	36
3.6 Restrições de vizinhança sobre um conjunto de trajetórias.	36
3.7 Intervalos sobre a trajetória T_o	37
3.8 Trajetória T_o com passo de tempo $p = 2$	37
3.9 Janela temporal $j = \{[1990, 1995], 2\}$ sobre a trajetória T_o	38
3.10 Transições de estado $tr_1 = \{[A], [D], 4\}$ e $tr_2 = \{[A, B], [D], 2\}$	38
3.11 Sequência de transições de estado <i>s</i>	39
3.12 Relacionamentos entre os elementos de caracterização dos padrões comportamentais.	41
3.13 FunçãoConvergência $(V, \{A, B\}, \{[1991, 1994], 1\}, 3)$	42
3.14 FunçãoEncontro $(V, \{C, D\}, \{[1991, 2000], 3\}, 2)$	43
3.15 FunçãoAnomalia $(V, \{[D, A, 2][B, B, 1]\}, \{[2000, 2006], 2\}, 5)$	44
3.16 FunçãoInconsistência $(V, \{[C, A, 1][B, B, 2]\}, \{[1991, 1994], 1\})$	45

3.17	FunçãoRebanho ($V, \{tr_1, tr_2\}$, 1996, 2).	46
3.18	FunçãoLiderança ($V, \{tr_1, tr_2\}, \{[1995, 2010], 5\}, 3$).	47
3.19	Metodologia para a mineração e análise da composição temporal das trajetórias de mudança de cobertura da terra utilizando o BPML.	49
3.20	Metodologia para agrupamento das trajetórias de mudança por semelhança de composição temporal das coberturas utilizando o GSTE.	51
4.1	Área de estudo A: região do entorno do município de Novo Progresso - PA.	57
4.2	Estudo de caso A: classificação das trajetórias no ano de 2011, conforme a tipologia de degradação proposta por Pinheiro (2015).	58
4.3	Experimento A.1.1: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 1997).	60
4.4	Experimento A.1.1 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 1997).	61
4.5	Experimento A.1.2: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (1998 a 2004).	62
4.6	Experimento A.1.2 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (1998 a 2004).	63
4.7	Experimento A.1.3: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).	65
4.8	Experimento A.1.3 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).	66
4.9	Experimento A.1: quantitativo de trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 2011).	67
4.10	Experimento A.2: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso por intensidade (1984 a 2011).	68
4.11	Experimento A.2: intensidade de convergência para corte raso (1984 a 2011).	69
4.12	Experimento A.3.1: distribuição espacial das trajetórias de encontro (2000 a 2005).	71
4.13	Experimento A.3.2: distribuição espacial das trajetórias de encontro (2006 a 2011).	73
4.14	Experimento A.4: distribuição espacial das trajetórias inconsistentes (1984 a 2011).	75
4.15	Experimento A.5: distribuição espacial das trajetórias anômalas no interior da FLONA Jamanxim (2006 a 2011).	77
4.16	Experimento A.6: distribuição espacial das trajetórias de rebanho iniciadas em 2003, 2006 e 2009.	79

4.17 Experimento A.7: distribuição espacial das trajetórias de liderança (1984 a 2011).	81
4.18 Área de estudo B: região do entorno do município de Sinop - MT.	85
4.19 Estudo de caso B: classificação das trajetórias no ano 2011, conforme a tipologia de degradação proposta por Pinheiro (2015).	86
4.20 Experimento B.1.1: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 1994).	88
4.21 Experimento B.1.1 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 1994).	89
4.22 Experimento B.1.2: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (1995 a 2004).	91
4.23 Experimento B.1.2 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).	92
4.24 Experimento B.1.3: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).	94
4.25 Experimento B.1.3: quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).	95
4.26 Experimentos B1: quantitativo de trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 2011).	96
4.27 Experimento B.2: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso por intensidade (1984 a 2011).	97
4.28 Experimento B.2: intensidade de convergência para corte raso (1984-2011).	98
4.29 Área de estudo C: amostra de 400 trajetórias.	101
4.30 Alinhamento resultante das trajetórias C84L51 e C85L38 : 0,7.	102
4.31 Método do Cotovelo para determinação do número K de grupos.	103
4.32 Distribuição espacial dos 8 grupos de trajetórias resultantes.	104
4.33 Evolução temporal do Grupo 1: 19 trajetórias.	106
4.34 Evolução temporal do Grupo 2: 14 trajetórias	106
4.35 Evolução temporal do Grupo 3: 62 trajetórias.	107
4.36 Evolução temporal do Grupo 4: 3 trajetórias.	107
4.37 Evolução temporal do Grupo 5: 32 trajetórias.	108
4.38 Evolução temporal do Grupo 6: 5 trajetórias.	108
4.39 Evolução temporal do Grupo 7: 73 trajetórias	109
4.40 Evolução temporal do Grupo 8: 192 trajetórias.	109

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Trajetórias de mudança de cobertura e seus elementos de caracterização.	48
4.1 Tipologia de degradação da cobertura florestal.	54
4.2 Tipologia de trajetórias de degradação florestal.	55
4.3 Estados de encontro identificados (2000 a 2005).	72
4.4 Estados de encontro identificados (2006 a 2011).	74
4.5 Transições inconsistentes identificadas (1984 a 2011).	76
4.6 Transições anômalas identificadas (2006 a 2011).	78
4.7 Trajetórias de rebanho identificadas (2003, 2006 e 2009).	80
4.8 Trajetórias de liderança identificadas (1984 a 2011).	82
4.9 Padrões Comportamentais e os respectivos elementos de caracterização do Estudo de Caso A.	83
4.10 Padrões Comportamentais e os respectivos elementos de caracterização do Estudo de Caso A.	84
4.11 Padrões Comportamentais e os respectivos elementos de caracterização do Estudo de Caso B.	100
4.12 Comparativo dos agrupamentos de trajetórias obtidos pela evolução temporal.	104
4.13 Tipologia de trajetórias baseada na semelhança de evolução temporal (GSTE).	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AED	–	Análise Exploratória de Dados
BPML	–	Behavioral Patterns Mining on Land Cover Change
CMDS	–	Classical Multidimensional Scaling
DBSCAN	–	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
FLONA	–	Floresta Nacional
HFD	–	Alta Intensidade de Degradação Florestal
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
DTW	–	Dynamic Time Warping
ETM+	–	Enhanced Thematic Mapper Plus Sensor
Gr	–	Agrupamento
GSTE	–	Grouping by Similarity of Temporal Evolution
KDD	–	Knowledge Discovery in Databases
LFD	–	Baixa Intensidade de Degradação Florestal
MDS	–	Multidimensional Scaling
MFD	–	Moderada Intensidade de Degradação Florestal
MSS	–	Multispectral Scanner System Sensor
PPCDAM	–	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
PRODES	–	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
REMO	–	Relative Motion
SIG	–	Sistema de Informações Geográficas
SSE	–	Sum of Squared Errors
TM	–	Thematic Mapper Sensor
UC	–	Unidade de Conservação

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo e Contribuições	5
1.2 Prova de Conceito: mineração e análise de trajetórias de mudança de cobertura da terra em estudos de degradação florestal	6
1.3 Organização da Tese	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 Uso e Cobertura da Terra	9
2.2 Mudança de Cobertura da Terra	10
2.3 Detecção de Mudanças da Cobertura da Terra	12
2.3.1 Detecção por Mudança Direta	13
2.3.2 Detecção por Trajetórias de Mudança	13
2.4 As Dimensões da Escala e as Trajetórias de Mudança	15
2.5 O Processo de Degradação Florestal	16
2.6 A Análise Exploratória de Dados	18
2.7 As Trajetórias de Objetos Móveis e os Padrões Comportamentais	20
2.8 As Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra	22
2.8.1 Agrupamento de Trajetórias por Semelhança de Evolução Temporal	26
2.8.1.1 Cálculo do Índice de Proximidade entre as Trajetórias de Mudança	26
2.8.1.2 Recuperação da Distribuição Espacial das Trajetórias de Mudança	29
2.8.1.3 Agrupamento das Trajetórias de Mudança Semelhantes	30
3 BPML e GSTE: CONTRIBUIÇÕES PARA A MINERAÇÃO E ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO TEMPORAL DAS TRAJETÓRIAS DE MUDANÇA DE COBERTURA DA TERRA	33
3.1 Conceitos Básicos	33
3.2 Padrões Comportamentais no Contexto das Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra	41
3.3 Metodologia para a Mineração e Análise da Evolução Temporal das Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra Utilizando o BPML	49
3.3.1 Etapa 1: Preparação dos Dados	49
3.3.2 Etapa 2: Mineração das Trajetórias	50
3.3.3 Etapa 3: Aplicação do Conhecimento	50

3.4	GSTE: Metodologia de Agrupamento por Semelhança de Evolução Temporal	50
3.4.1	Cálculo do Índice de Proximidade entre as Trajetórias de Mudança .	51
3.4.2	Recuperação da Distribuição Espacial das Trajetórias de Mudança .	51
3.4.3	Agrupamento das Trajetórias de Mudança Semelhantes	52
4	PROVA DE CONCEITO: MINERAÇÃO E ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO TEMPORAL DAS TRAJETÓRIAS DE DEGRADAÇÃO FLORESTAL NOS MUNICÍPIOS DE NOVO PROGRESSO-PA E SINOP-MT	53
4.1	As Bases de Dados de Trajetórias de Degradação Florestal	53
4.2	Estudo de Caso A: região do entorno do município de Novo Progresso - PA	56
4.2.1	Área de Estudo e Base de Dados	56
4.2.2	Preparação dos Dados	58
4.2.3	Mineração de Trajetórias e Aplicação do Conhecimento	59
4.2.3.1	Experimento A.1: trajetórias convergentes para corte raso	59
4.2.3.1.1	- A.1.1: Período de 1984 a 1997	59
4.2.3.1.2	- A.1.2: Período de 1998 a 2004	61
4.2.3.1.3	- A.1.3: Período de 2005 a 2011	64
4.2.3.2	Experimento A.2: intensidade das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 2011)	67
4.2.3.3	Experimento A.3: trajetórias de encontro de degradação	70
4.2.3.3.1	- A.3.1: Período de 2000 a 2005	70
4.2.3.3.2	- A.3.2: Período de 2006 a 2011	72
4.2.3.4	Experimento A.4: trajetórias inconsistentes (1984 a 2011)	74
4.2.3.5	Experimento A.5: trajetórias anômalas (2006-2011)	76
4.2.3.6	Experimento A.6: trajetórias de rebanho (2003, 2006 e 2009)	78
4.2.3.7	Experimento A.7: trajetórias de liderança (1984-2011)	80
4.3	Estudo de Caso B: região do entorno do município de Sinop - MT	85
4.3.1	Área de Estudo e Base de Dados	85
4.3.2	Preparação dos Dados	87
4.3.3	Mineração de Trajetórias e Aplicação do Conhecimento	87
4.3.3.1	Experimento B.1: trajetórias convergentes para corte raso	87
4.3.3.1.1	- B.1.1: Período de 1984 a 1994	87
4.3.3.1.2	- B.1.2: Período de 1995 a 2004	90
4.3.3.1.3	- B.1.3: Período de 2005 a 2011	93
4.3.3.2	Experimento B.2: intensidade das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 2011)	96

4.4	Estudo de Caso C: agrupamento de trajetórias por semelhança da evolução temporal	101
4.4.1	Área de Estudo	101
4.4.2	Cálculo do Índice de Proximidade entre as Trajetórias de Mudança .	102
4.4.3	Recuperação da Distribuição Espacial das Trajetórias de Mudança .	102
4.4.4	Agrupamento das Trajetórias de Mudança Semelhantes	103
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

1 INTRODUÇÃO

O estado biofísico da superfície terrestre (cobertura da terra) encontra-se em constante processo de transformação ao longo do tempo, como consequência de diferentes fatores sociais e ambientais. Entretanto, são as atividades promovidas pelo homem as principais responsáveis por influenciar tais mudanças (TURNER; MEYER, 1994). O aumento da demanda por recursos naturais, os movimentos migratórios e de expansão urbana, as pressões políticas, econômicas e culturais, são exemplos de fatores que, influenciando a utilização e destinação da cobertura da terra, induzem transformações na mesma (LAMBIN; GEIST, 2007).

Nos últimos 50 anos, as mudanças observadas na cobertura da terra, derivadas de atividades humanas, ocorreram em níveis de intensidade e extensão diferenciados nas várias partes do mundo (LAMBIN et al., 2001; TURNER et al., 1994). Degradação do solo, modificações na composição atmosférica, mudanças climáticas, migrações populacionais e pobreza, são algumas das principais consequências observadas (LIU et al., 2016; FOLEY et al., 2005). Estudos que exploram a dinâmica de mudança de cobertura, assim como os fatores que influenciam as mesmas, permitem compreender melhor os diferentes processos socioambientais que envolvem tais mudanças ao longo do tempo. Particularmente neste trabalho, são tratadas mudanças de cobertura relacionadas aos processos de desflorestamento e degradação florestal.

Observar mudanças na cobertura florestal em vastas áreas sobre a superfície terrestre, muitas vezes remotas e inacessíveis ao homem, não é uma tarefa trivial. No entanto, o avanço tecnológico na área de imageamento orbital, ocorrido nas últimas décadas, proporcionou uma melhora significativa, não somente na rapidez de obtenção e disponibilização dos dados imageados, mas também no detalhamento das informações coletadas (GIRI et al., 2013; JIANYA et al., 2008). Esse fato elevou o sensoriamento remoto ao patamar de maior fonte de dados para o mapeamento e monitoramento da dinâmica de mudança das coberturas florestais (LU et al., 2014; COMBER, 2008; ZHOU et al., 2008b; VELDKAMP; LAMBIN, 2001).

Considerando os processos que envolvem coberturas florestais, o Processo de Degradação Florestal é particularmente importante, pois foi intensificado nas últimas décadas na região da Amazônia brasileira. Segundo relatório do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2008), se trata de um processo gradual e de longo prazo, no qual há a redução da cobertura florestal principalmente por ações

ilegais de extração de madeira e fogo florestal. Para a cobertura florestal, o processo de degradação implica na perda de biodiversidade, na redução das funções ecológicas e do armazenamento de carbono, na fragmentação de ecossistemas e na perda do potencial do uso florestal para atividades econômicas ligadas ao extrativismo. Dada a sua relevância, é preciso compreender a dinâmica de como tais processos ocorrem, onde, quando e como se comportam os atores e os mecanismos associados a essas alterações. A ocorrência e a evolução do processo de degradação dependem das circunstâncias envolvidas, variando no tempo e no espaço.

Por ser um processo que envolve etapas de maior e menor intensidade e até mesmo a possibilidade de reversão, a degradação florestal requer longos períodos de observação e uma unidade de análise que permite mensurar determinadas propriedades da cobertura que sejam de interesse do analista (especialista). Nesse caso, é importante que a resolução espacial da unidade de análise seja compatível com o propósito do estudo, de modo a permitir a identificação e o monitoramento das mudanças ocorridas em cada uma delas ao longo do tempo.

Entre os diferentes tipos de cobertura e seus contextos específicos de transformação, observam-se mudanças recorrentes nas propriedades não espaciais das unidades de análise. Tais alterações, quando observadas ao longo do tempo e sob diferentes dimensões da escala (espacial, temporal e quantitativa) (GIBSON et al., 2000), definem as *Trajétórias de Mudança de Cobertura da Terra*. No entanto, é um conceito de trajetória que difere do termo já consolidado na literatura sobre objetos móveis (JEUNG et al., 2011; LAUBE et al., 2005; LAUBE; IMFELD, 2002). No contexto das coberturas florestais, as trajetórias são definidas como o conjunto de classificações sucessivas de cobertura da terra associadas a uma porção definida da superfície terrestre (BOORI; VOZENILEK, 2014a; MENA, 2008; BRAIMOH; VLEK, 2005; MERTENS; LAMBIN, 2000).

Semelhantes às unidades de análise que as constituem, as trajetórias de cobertura também possuem propriedades não espaciais que variam ao longo do tempo. No contexto das coberturas florestais, não há sentido em utilizar atributos como velocidade ou aceleração, pois a unidade de análise possui localização fixa. Além disso, existe uma dimensão temporal e descritiva da trajetória a ser considerada. A primeira está relacionada com o instante inicial, instante final e a resolução temporal nos quais as propriedades das unidades de análise que a compõem são mensuradas. A segunda pode ser representada por um con-

junto de propriedades associadas às referidas unidades, que variam ao longo do tempo (p.ex. proporção de desmatamento no interior de uma célula); ou ainda por propriedades que se mantêm constantes nas trajetórias, como a intensidade e a consistência. Nesse caso, a intensidade é associada à velocidade com a qual são observadas determinadas alterações nas coberturas que constituem as trajetórias. A consistência, por sua vez, está relacionada à validade das alterações identificadas, sendo realizada por um especialista no assunto.

A sequência de alterações em determinadas propriedades da cobertura da unidade de análise, quando observadas ao longo do tempo, determinam a evolução temporal das trajetórias de mudança. Tal evolução pode ser utilizada com diferentes propósitos. O principal, para o qual este trabalho se orienta, é estabelecer instrumentos para a observação da dinâmica do processo de degradação, que possam auxiliar no mapeamento indireto das relações entre atores e processos ao longo do tempo em uma determinada região. Tal informação serve de base para a definição de políticas públicas socioambientais, assim como para o planejamento de políticas de comando e controle associadas ao monitoramento da ocupação em áreas de floresta. Para isso, são confrontados a série temporal de dados de cobertura e dados complementares que auxiliem na descrição de processos que existiram na região de estudo (p.ex. dados socioeconômicos), assim como na identificação das possíveis motivações das mudanças observadas. Estímulos semelhantes, sejam eles sociais ou ambientais, tendem a condicionar a existência de padrões similares de comportamento na evolução temporal das trajetórias de cobertura da terra.

Dentre as diferentes possibilidades de análise da evolução temporal das trajetórias, é possível: determinar a existência e a intensidade das mudanças; identificar alterações semelhantes nas coberturas que tenham ocorrido em uma mesma trajetória ou simultaneamente em trajetórias distintas; ou ainda validar as mudanças observadas segundo critérios pré-definidos, identificando anomalias e inconsistências na base de dados. Posteriormente, com o auxílio de um especialista, tais informações são confrontadas com os atores e os processos existentes na região de estudo, no momento da aquisição dos dados de cobertura.

A análise de trajetórias de mudança e suas propriedades é o estado da arte no estudo da dinâmica de mudança de cobertura da terra, sendo realizada por intermédio de séries temporais de dados de cobertura (WANG et al., 2012). No entanto, a literatura existente sobre o assunto ainda é recente e necessita de novas

metodologias que ampliem a capacidade exploratória das referidas trajetórias, possibilitando não só a sua identificação e quantificação, mas também a análise de suas propriedades.

O estudo de trajetórias possui uma literatura robusta e já consolidada no contexto dos objetos móveis (LAUBE; IMFELD, 2002; COHEN; MEDIONI, 1999; NANNI; PEDRESCHI, 2006), oferecendo conceitos para a extração de propriedades que estejam associadas ao comportamento das mesmas, no tempo e no espaço (p.ex. padrões comportamentais de objetos móveis). Segundo Jeung et al. (2011), tais padrões comportamentais buscam identificar trajetórias com comportamento semelhante entre si (p.ex. Padrões de Convergência, Encontro, Detecção de Anomalias e Liderança). Apesar de não serem aplicáveis diretamente no contexto das trajetórias de mudança de cobertura, pois a sua interpretação não contempla fenômenos associados às mudanças de cobertura da terra, são perfeitamente passíveis de adaptação. No caso das trajetórias de objetos móveis, a unidade de análise é denominada de móvel e a propriedade que varia no tempo é a localização. No contexto das trajetórias de coberturas florestais, por sua vez, a unidade de análise é uma região fixa da superfície terrestre (p.ex. *pixel*) e a propriedade que varia no tempo é a cobertura associada à referida região.

No que se refere às tipologias de trajetórias encontradas na literatura sobre trajetórias de mudança de cobertura, verifica-se que as mesmas são definidas em função do domínio de coberturas presentes, aqui denominada de *Classificação de Trajetórias por Semelhança de Cobertura*. Desse modo, as trajetórias são rotuladas exclusivamente em função da presença (ou não) de determinadas classificações de cobertura na sua constituição. No entanto, é possível considerar a evolução temporal de tais coberturas, ampliando a capacidade de exploração das referidas bases de dados e favorecendo a criação de novas tipologias baseadas nas sequências de coberturas semelhantes, o que aqui convencionou-se chamar de *Agrupamento de Trajetórias por Semelhança de Evolução Temporal*.

Face ao exposto, este trabalho amplia o conhecimento no contexto das mudanças de coberturas florestais, utilizando conceitos estabelecidos na literatura de trajetórias de objetos móveis (JEUNG et al., 2011; LAUBE et al., 2005). Para isso, apresenta e define um conjunto de padrões comportamentais de trajetórias de mudança de cobertura da terra. Tais padrões conceituais são utilizados para a identificação de padrões de trajetórias de mudança válidos, potencialmente úteis e compreensíveis no contexto da degradação florestal. Juntamente com

suas propriedades (p.ex. intensidade e consistência), esses padrões fornecem ao analista do processo uma observação, baseada nos dados, acerca dos atores e dos processos envolvidos na produção da degradação florestal na região de estudo. Conjuntos de trajetórias com padrões similares de comportamento, ou seja, padrões similares de alteração nas coberturas que as constituem, podem ser identificados com o auxílio de padrões comportamentais de trajetórias de mudança de cobertura.

Neste trabalho, os algoritmos e a metodologia desenvolvidos oferecem uma nova perspectiva de análise e exploração para grandes bases de dados de coberturas florestais, medidas sistematicamente ao longo de uma série histórica. Fazem isso através de uma metodologia computacional que, ao permitir a identificação de padrões espaço-temporais associados às dinâmicas de modificação daquela cobertura ao longo do tempo, tornam-se um importante instrumento de análise do processo.

As técnicas computacionais desenvolvidas nesta Tese estão organizadas na forma de uma biblioteca de funções que, encadeadas a partir da lógica do analista, compõem uma metodologia que permite a exploração de conjuntos de dados de cobertura de grande extensão espacial e temporal, incorporando informações contextuais relevantes. Essa tarefa seria extremamente difícil, ou até inviável em certas situações, sem o auxílio de técnicas computacionais similares às desenvolvidas neste trabalho.

1.1 Objetivo e Contribuições

Este estudo parte da premissa de que é possível encontrar, identificar, extrair e caracterizar padrões de trajetórias de mudança em grandes bases de dados que incorporam o mapeamento sistemático, ao longo do tempo, de classes de cobertura da terra. Com tal propósito, explora a evolução temporal da sequência de coberturas presentes nas trajetórias, estabelecendo um conjunto de padrões comportamentais adaptados da literatura de objetos móveis e definidos para o domínio de objetos encontrados em mapeamentos de cobertura. Em particular, no contexto definido pelos processos que produzem degradação florestal. Desse modo, esta Tese propõe, formaliza e implementa, na forma de uma biblioteca de funções parametrizáveis, os elementos que permitem estabelecer uma nova metodologia computacional para auxiliar os analistas e/ou especialistas no domínio dos estudos florestais. Como resultado, é possível explorar grandes bases de dados utilizando a mineração de padrões de trajetórias e seus agrupamentos.

Para tal, este trabalho traz duas contribuições inovadoras:

- a) Define e implementa os Padrões Comportamentais de Convergência, Encontro, Detecção de Inconsistências, Detecção de Anomalias, Rebanho e Liderança, encontrados na literatura para de objetos móveis, para o contexto das trajetórias de mudança de cobertura da terra. Tal conjunto de definições foi aqui denominado de *Behavioral Patterns Mining on Land Cover Change* (BPML); e
- b) Define e implementa uma metodologia computacional para agrupar as trajetórias de mudança de cobertura florestal, aqui denominada de *Grouping by Similarity of Temporal Evolution* (GSTE), considerando as semelhanças entre as respectivas evoluções temporais dessas trajetórias. Esta metodologia utiliza, de forma combinada, os algoritmos computacionais *Dynamic Time Warping* (DTW) (SAKOE; CHIBA, 1978), *Classical Multidimensional Scaling* (CMDS) (TORGERSON, 1952) e *K-Means Clustering* (MACQUEEN, 1967).

Como consequência, agrega-se valor à discussão sobre a análise de trajetórias de mudança de cobertura da terra, com a apresentação de um conjunto de novos conceitos e metodologias que possibilitam explorar a evolução temporal das referidas trajetórias no domínio das coberturas florestais.

1.2 Prova de Conceito: mineração e análise de trajetórias de mudança de cobertura da terra em estudos de degradação florestal

Com o intuito de demonstrar a metodologia computacional e os conceitos propostos, assim como suas possibilidades de utilização em problemas reais, este trabalho apresenta três estudos de caso sobre duas bases temporais de dados de degradação florestal (PINHEIRO, 2015). As características dos experimentos e os respectivos conjuntos de dados são apresentados a seguir:

- a) Estudo de Caso A: Os *Padrões Comportamentais de Convergência, Encontro, Detecção de Inconsistências, Detecção de Anomalias, Rebanho e Liderança*, foram aplicados a um conjunto de dados de degradação florestal da região do entorno do município de Novo Progresso - PA. Trata-se de uma base de dados constituída por 27.815 unidades de análise (células) com resolução espacial de 1x1km, resolução temporal de 1 ano e extensão temporal de 28 anos (1984 a 2011).

- b) Estudo de Caso B: O padrão comportamental de *Convergência* foi aplicado a um conjunto de dados de degradação florestal da região do entorno do município de Sinop - MT. Trata-se de uma base de dados constituída por 27.367 unidades de análise (células) com resolução espacial de 1x1km, resolução temporal de 1 ano e extensão temporal de 28 anos (1984 a 2011).
- c) Estudo de Caso C: Uma nova metodologia de agrupamento de trajetórias de mudança por semelhança de evolução temporal foi utilizada para definir uma tipologia de trajetórias de degradação florestal na região do entorno do município de Novo Progresso - PA. A amostra é constituída de 400 unidades de análise (células) com resolução espacial de 1x1km, resolução temporal de 1 ano e extensão temporal de 28 anos (1984-2011). Tal metodologia utilizou os algoritmos computacionais *DTW* (SAKOE; CHIBA, 1978), *CMDS* (TORGERSON, 1952) e *K-Means Clustering* (MACQUEEN, 1967), para agrupar as trajetórias de mudança de cobertura tomando como referência a semelhança entre a evolução temporal das mesmas.

As áreas dos experimentos foram escolhidas por representarem fronteiras de exploração madeireira em diferentes estágios (PINHEIRO, 2015), quase sempre de forma ilícita e sem manejo, iniciando processos de degradação da cobertura florestal com consequências diretas para os ecossistemas locais.

1.3 Organização da Tese

A presente Tese encontra-se dividida em 5 capítulos:

- a) O Capítulo 1 apresenta o contexto, a motivação, o objetivo, a contribuição do trabalho, introduzindo a prova de conceito que será realizada no transcurso do mesmo.
- b) O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica com os principais conceitos discutidos ao longo deste estudo.
- c) O Capítulo 3 apresenta o conjunto de definições e a metodologia proposta para a utilização de padrões comportamentais de trajetórias no contexto da mudança de cobertura florestal, assim como um novo método de agrupamento das referidas trajetórias baseado na evolução temporal das mesmas.

- d) O Capítulo 4 traz três estudos de caso com experimentos conduzidos nas regiões do entorno dos municípios de Novo Progresso - PA e Sinop - MT, nos quais a teoria abordada no Capítulo 2, assim como os conceitos apresentados no Capítulo 3, são aplicados às bases de dados de degradação florestal supracitadas.
- e) O Capítulo 5 apresenta as considerações finais acerca dos resultados obtidos e algumas perspectivas futuras sobre o presente trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Uso e Cobertura da Terra

A cobertura da terra é a base para o estudo da influência das ações humanas nas mudanças observadas na superfície terrestre, assim como dos seus respectivos fatores motivadores. É o conjunto das características biofísicas, ou seja, os fatores bióticos e abióticos da superfície observados em diferentes instantes no tempo, de forma indireta ou direta (COMBER et al., 2008; TURNER; MEYER, 1994). Indiretamente, pela captura das assinaturas multiespectrais características dos diferentes tipos de coberturas por sensores remotos que, visualizando vastas extensões da superfície em diferentes escalas, são amplamente utilizados pela comunidade científica para o estudo de mudanças de cobertura da terra (ZHOU et al., 2008a). Diretamente, com a execução de trabalhos de campo *in loco* cujo propósito principal é complementar as informações obtidas de forma indireta. São exemplos de cobertura da terra a vegetação de uma forma geral, corpos d'água, áreas edificadas e solo exposto (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Exemplos de cobertura da terra.



Ao conjunto das atividades exercidas pelo homem sobre a cobertura da terra, assim como a destinação que lhe é dada, dá-se o nome de uso da terra (LAMBIN; GEIST, 2007). É o propósito pelo qual o homem emprega a cobertura da terra (TURNER; MEYER, 1994), sendo de fundamental importância para o planejamento e implantação de políticas públicas em diferentes esferas do governo (WANG et al., 2010; LUNETTA et al., 2006). São exemplos de uso da terra a exploração madeireira, a atividade agropecuária e de recreação, assim como a delimitação de áreas de conservação e proteção ambiental (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Exemplos de uso da terra.



Exploração Madeireira

Agricultura

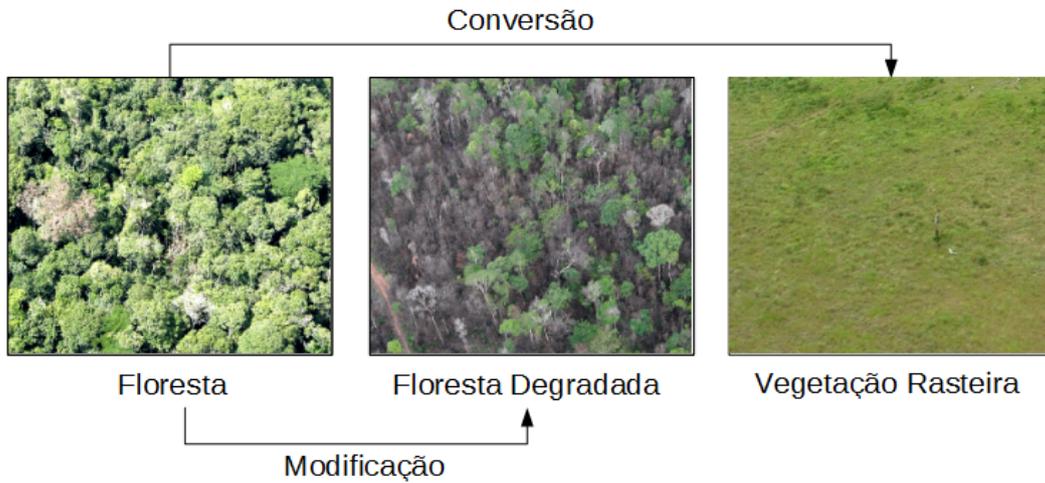
Área de Proteção

Apesar de distintos, os conceitos de uso e cobertura da terra estão diretamente relacionados, pois uma cobertura pode ser associada a vários tipos de uso, assim como um determinado uso pode estar relacionado a diferentes tipos de cobertura. A cobertura “Floresta”, por exemplo, pode ter seu uso associado à “Exploração Madeireira” ou pode ser uma “Área de Proteção Ambiental”. Uma “Área de Recreação” pode, por sua vez, estar associada a regiões de “Solo Exposto” ou de “Vegetação Gramínea”.

2.2 Mudança de Cobertura da Terra

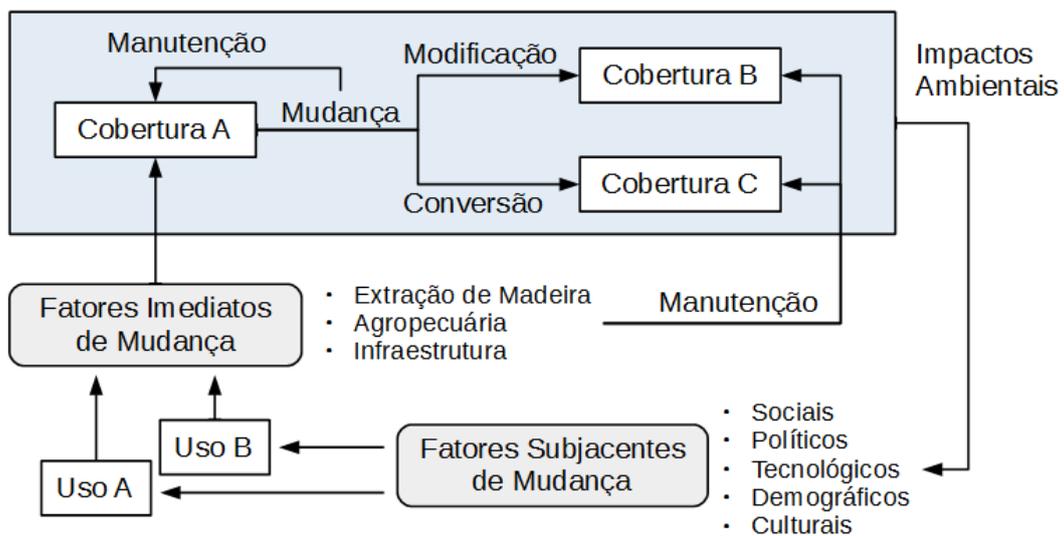
O conceito de mudança de cobertura da terra diz respeito a alterações nos atributos biofísicos da superfície terrestre observadas ao longo do tempo, sendo as ações humanas os principais fatores de tal modificação (LAMBIN et al., 2001). Cabe ressaltar que o referido processo pode ocorrer por modificação ou conversão. Na primeira, as características da cobertura são alteradas, sem que no entanto haja mudança na respectiva classe (COPPIN et al., 2004). Uma “Floresta” que passa a “Floresta Degradada”, por exemplo. Na segunda, existe a mudança de classe, como por exemplo, uma “Floresta” que passa a “Vegetação Rasteira” (Figura 2.3). A mudança de cobertura por modificação é mais difícil de ser observada e identificada, uma vez que ocorre ao longo do tempo em diferentes estágios (TURNER; MEYER, 1994).

Figura 2.3 - Mudança de cobertura por modificação e conversão.



Segundo Ojima et al. (1994) e Geist et al. (2006), os fatores motivadores da mudança de uso e cobertura são divididos em imediatos e subjacentes (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Relação entre os fatores motivadores, o uso e a cobertura da terra.



Fonte: Adaptado de Ojima et al. (1994).

Os fatores imediatos de mudança ocorrem a nível local e estão relacionados às ações físicas que agem sobre a cobertura da terra, sejam elas de origem natural ou antrópica. São exemplos as atividades de extração de madeira, agropecuária e construção de infraestruturas (GEIST; LAMBIN, 2002). Os fatores subjacentes, por sua vez, são mais difusos e indiretos, com possibilidade de ocorrência a nível regional e global. Como consequência, esses fatores determinam os contextos que influenciam os fatores imediatos. São exemplos de fatores subjacentes os fatores econômicos, sociais, políticos, tecnológicos, demográficos e culturais. Posteriormente, eventuais impactos ambientais motivados pelas mudanças da cobertura podem influenciar, de forma cíclica, novos contextos para a modificação dos fatores subjacentes.

Segundo Geist et al. (2006), no estudo da dinâmica da mudança de cobertura existem duas etapas fundamentais: a detecção da mudança da cobertura propriamente dita e a identificação dos respectivos fatores motivadores das mudanças detectadas.

2.3 Detecção de Mudanças da Cobertura da Terra

A detecção de mudanças é definida como o processo de identificação das diferenças no estado de um objeto, ou fenômeno, observado em dois ou mais instantes distintos no tempo (SINGH, 1989). Desse modo, é possível detectar tais mudanças com o auxílio de sensores orbitais em diferentes contextos de aplicação. No estudo das coberturas florestais (CARMONA; NAHUELHUAL, 2012; KÄYHKÖ; SKÄNES, 2008; CARNEIRO, 2007), de bacias hidrográficas (WANG et al., 2012; RUIZ; DOMON, 2009), da ocupação humana e urbanização (GAVLAK et al., 2011; GRIMM et al., 2008; SILVA et al., 2008), entre outros.

Considerando os dados de sensoriamento remoto, a detecção de mudanças parte do princípio de que houve alteração na resposta espectral da superfície terrestre em instantes distintos no tempo. Nesse contexto, busca-se *a priori*, por intermédio de técnicas de pré-processamento, minimizar a influência de outros fatores indesejáveis que não estejam necessariamente relacionados às mudanças ocorridas na superfície como, por exemplo, as condições atmosféricas, o ângulo de inclinação do sol e a umidade do solo. Uma vez minimizadas tais influências negativas, é necessário garantir que os valores medidos sobre a imagem, em diferentes instantes de tempo, estejam relacionados à mesma unidade de análise na imagem subsequente (p.ex. *pixel*). Para tal, é realizado o registro dos dados sobrepondo duas ou mais imagens obtidas em momentos distintos, mas

referentes a mesma região geográfica (ZITOVÁ; FLUSSER, 2003). Cabe ressaltar que o registro deve ser realizado com muito cuidado, pois caso as unidades de análise comparadas não sejam homólogas, é provável que a mudança detectada não tenha necessariamente ocorrido (THÉAU, 2012).

Na literatura sobre detecção de mudanças de cobertura, diferentes técnicas de detecção foram utilizadas e sumarizadas, considerando fatores como a escala de observação e os dados disponíveis para o estudo (THÉAU, 2012; COPPIN et al., 2004; LU et al., 2004; SINGH, 1989). Quanto às metodologias utilizadas para a detecção, verificou-se uma certa similaridade entre as mesmas, com pequenas variações nas técnicas empregadas. Segundo Lu et al. (2004), é possível resumir as referidas metodologias nas seguintes etapas: i) pré-processamento das imagens para registro, correção geométrica e radiométrica; ii) seleção das técnicas para a detecção de mudanças; e iii) avaliação dos resultados. As abordagens de detecção, por sua vez, foram divididas em Detecção por Mudança Direta e Detecção por Trajetórias de Mudança (ZHOU et al., 2008b).

2.3.1 Detecção por Mudança Direta

Na Detecção por Mudança Direta ou bitemporal, como o próprio nome sugere, existe a comparação entre duas observações distintas realizadas em diferentes instantes. Segundo Coppin et al. (2004), seu sucesso reside, entre outros fatores, nas correções já mencionadas anteriormente, na qualidade do registro dos dados, na seleção apropriada das datas de aquisição dos mesmos, na escolha do sensor, na definição das categorias de mudança (cobertura) e na escolha dos algoritmos de detecção. No contexto do estudo das coberturas florestais, por exemplo, é necessário considerar ainda, sempre que possível, os períodos do ano nos quais a fenologia encontra-se mais estável. As técnicas de detecção de mudança direta mais utilizadas são a *Image Differencing* (THÉAU, 2012), *Image Rationing* (SINGH, 1989), *Post Classification* (PETIT et al., 2001) e *Image Regression* (LU et al., 2004).

2.3.2 Detecção por Trajetórias de Mudança

Dado o avanço do imageamento orbital e o conseqüente aumento na disponibilização de séries temporais de dados de observação da superfície terrestre (GIRI et al., 2013; JIANYA et al., 2008), a detecção por trajetórias representa o estado da arte na detecção de mudanças de cobertura da terra. Além do mais, possibilita o estudo das mesmas utilizando um conjunto maior de observações. Como con-

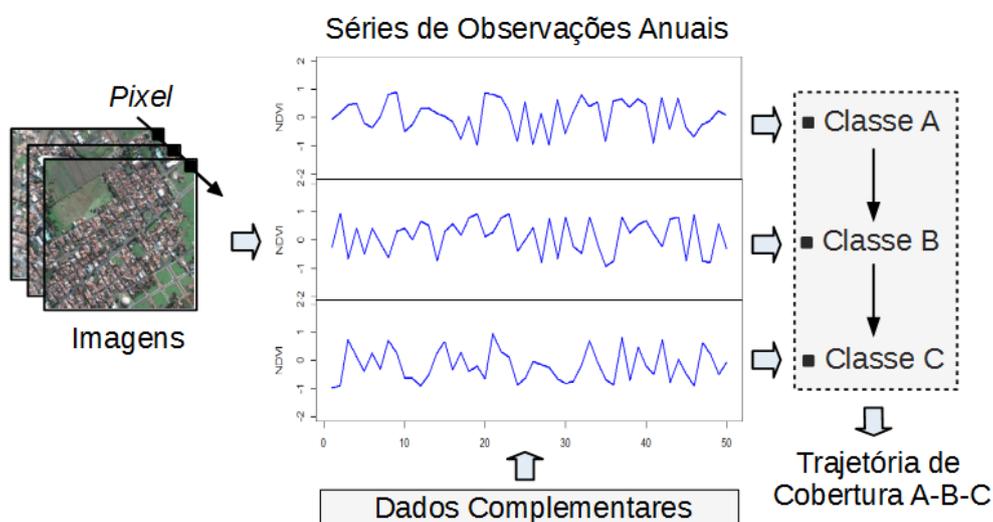
sequência, favorece uma análise mais rica que a bitemporal, atribuindo à questão temporal um papel de maior importância. Uma valiosa ferramenta de apoio à decisão, oferecendo subsídios importantes para o planejamento do uso da terra e para o desenvolvimento de políticas públicas relacionadas à cobertura da terra (BRAIMOH; VLEK, 2005).

Uma vez que os sensores orbitais são a principal fonte de dados para o estudo da dinâmica de mudança de cobertura, a unidade básica de análise utilizada na evolução temporal das trajetórias é o *pixel*. No entanto, existem outras possibilidades como, por exemplo, a utilização de polígonos irregulares formados pela agregação de *pixels* adjacentes de mesma classificação (BOORI; VOZENILEK, 2014a), assim como de polígonos regulares integrantes de grades celulares aplicadas sobre o conjunto de dados (GAVLAK et al., 2011). Desse modo, é possível classificar tais unidades a partir de determinadas propriedades das coberturas.

Trajetórias de mudança de cobertura são representadas por uma sequência temporal finita de classificações de cobertura que podem ser obtidas, por exemplo, com o auxílio de diferentes índices de vegetação (MENA, 2008). Tais índices são medidas radiométricas adimensionais que indicam a abundância relativa e a atividade fotossintética da vegetação verde (JENSEN, 2009). Considerando a alta resolução temporal de obtenção dos mesmos, é possível utilizar um conjunto de observações periódicas para que, juntamente com o auxílio de dados complementares (p.ex. dados de culturas agrícolas), sejam classificadas as unidades de análise ao longo de uma determinada extensão temporal. Como consequência, a sequência de classificações de coberturas resultante é associada a uma trajetória de mudança (Figura 2.5). No caso das unidades celulares, constituídas por conjuntos de *pixels* adjacentes, é possível mensurar determinadas propriedades geométricas e de arranjo espacial no seu interior (p.ex. polígonos de desmatamento) com o auxílio de métricas de manchas e de paisagem (WANG et al., 2012; GAVLAK et al., 2011; FROHN; HAO, 2006).

Após a identificação das trajetórias de mudança existentes em uma determinada região específica de estudo, a sua associação com os respectivos fatores motivadores é realizada com dados complementares correspondentes ao mesmo período de aquisição dos dados de cobertura (TURNER et al., 1994). Os dados complementares e de cobertura devem possuir dimensões de escala compatíveis, de modo a evitar inconsistências no momento da análise.

Figura 2.5 - Exemplo de classificação temporal do *pixel* baseada em séries temporais de índices de vegetação.



São exemplos de dados complementares as imagens de sensores orbitais de diferentes resoluções (WANG et al., 2012), fotografias aéreas (BRAIMOH; VLEK, 2005; MERTENS; LAMBIN, 2000; PETIT et al., 2001), dados censitários (MENA, 2008), documentos históricos (KÄYHKÖ; SKÅNES, 2008), modelos digitais de elevação (WANG et al., 2013), índices diversos (WANG et al., 2012) e dados ambientais (GAVLAK et al., 2011). Para a associação dos efeitos observados aos seus prováveis fatores motivadores, é imprescindível a utilização de um especialista no domínio de estudo.

2.4 As Dimensões da Escala e as Trajetórias de Mudança

Segundo Gibson et al. (2000), a escala possui três dimensões: espacial, temporal e quantitativa. Cada qual, por sua vez, possui uma resolução ou grau de detalhamento (MARCEAU; HAY, 1999); e uma extensão, também chamada de magnitude do estudo (GOODCHILD et al., 2007). No contexto deste trabalho, as referidas dimensões foram assim definidas para as trajetórias de mudança:

- **Dimensão Espacial:** a Resolução Espacial é a precisão da observação da cobertura associada à trajetória de mudança (p.ex. resolução do sensor remoto). A Extensão Espacial, por sua vez, refere-se à área que delimita a trajetória, ou seja, o limite da unidade de análise representa-

tiva da trajetória de mudança (p.ex. área da célula).

- **Dimensão Temporal:** a Resolução Temporal é determinada pelo intervalo de tempo entre duas observações consecutivas (p.ex. 1 ano). Dependendo do conjunto de dados de observação, a resolução temporal pode não ser constante ao longo de toda a trajetória. A Extensão Temporal de uma trajetória de mudança, por sua vez, é o intervalo de tempo entre a primeira e a última observação (p.ex. 10 anos).
- **Dimensão Quantitativa:** a Resolução Quantitativa diz respeito às eventuais agregações das unidades de análise utilizadas (p.ex. grupos de 4 células), enquanto que a Extensão Quantitativa diz respeito ao número total de unidades de análise envolvidas no estudo, ou seja, a quantidade total de trajetórias (p.ex. 200 células).

Entender a relação entre a escala dos dados de observação e as escalas na qual os processos que influenciam as mudanças de cobertura são identificados é fundamental (CARNEIRO, 2007; COMBER, 2008), pois a extensão e a resolução dos dados influenciam diretamente os padrões de cobertura que serão observados.

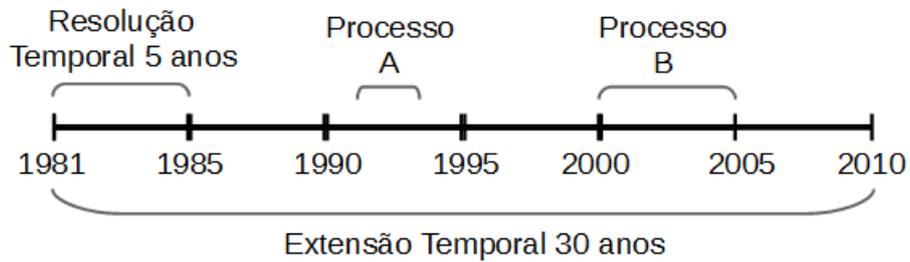
Na definição da resolução temporal, por exemplo, intervalos de tempo curtos favorecem a identificação de mudanças que seriam ignoradas em intervalos maiores. No contexto de um conjunto de observações com a extensão temporal de trinta anos e resolução temporal de cinco anos (Figura 2.6), um processo que ocorra no intervalo de 3 anos não será identificado (Processo A). Por outro lado, um processo que ocorra por no mínimo cinco anos, poderá ser identificado de forma parcial ou até completa (Processo B). A escolha da resolução espacial deve necessariamente considerar uma unidade de análise que possibilite identificar as mudanças de cobertura desejadas (GAVLAK et al., 2011).

As alterações de cobertura identificadas nas trajetórias de mudança são úteis para compreender a dinâmica de importantes processos ambientais que impactam diretamente as coberturas florestais, como por exemplo, o Processo de Degradação Florestal.

2.5 O Processo de Degradação Florestal

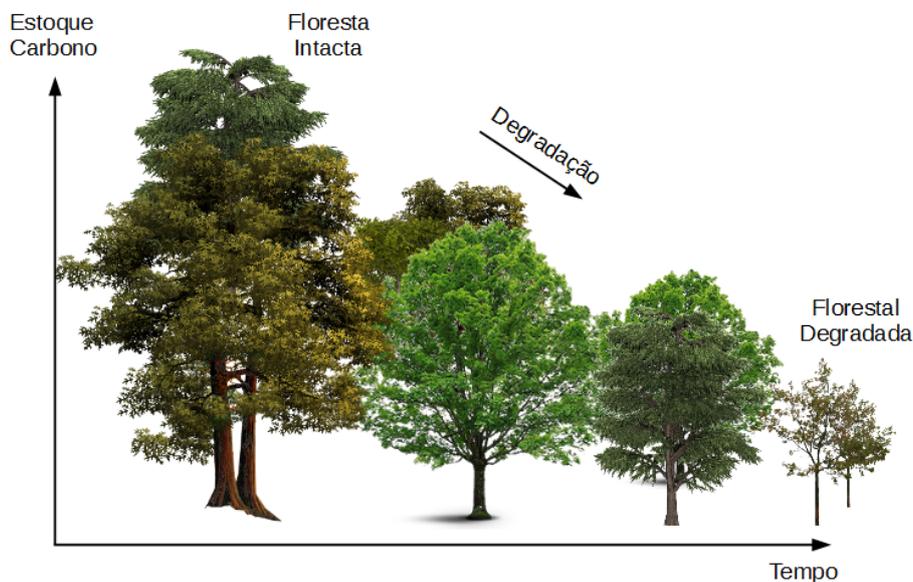
Neste estudo, é adotado o conceito de degradação florestal como um processo gradual e de longo prazo que culmina com a redução da cobertura florestal (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2008). Segundo Pinheiro et al. (2016),

Figura 2.6 - A relação entre a escala temporal dos dados e dos processos.



tal processo ocorre principalmente pelo fogo florestal e pela extração insustentável de madeira. São consequências para o meio ambiente a redução da biodiversidade e do estoque de carbono das florestas (Figura 2.7), as mudanças no ciclo hidrológico, a erosão do solo e as alterações climáticas, entre outros.

Figura 2.7 - Redução do estoque de carbono pelo processo de degradação florestal.



Com o conseqüente aumento da preocupação com as questões ambientais, os estudos sobre a mudança de cobertura cresceram de importância nos últimos anos. No caso específico do Brasil, dada a vasta cobertura florestal existente, há uma apreensão constante do governo federal com os avanços da degradação na Floresta Amazônica, principalmente na região conhecida como Amazônia Legal.

Segundo o relatório do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2016), no período compreendido entre os anos de 1988 e 2016, foram desmatados 421.871 km^2 de floresta por corte raso, principalmente pela expansão agrícola motivada pelo crescimento do mercado de terras na região (COSTA, 2016), assim como pela falta de uma regulamentação e fiscalização eficientes por parte dos órgãos públicos competentes (GEIST et al., 2006; MARGULIS, 2004). Cabe ressaltar que a degradação não deve ser confundida com desflorestamento ou desmatamento por corte raso, definidos pela remoção completa da cobertura florestal.

O aumento significativo da capacidade de aquisição de dados digitais de cobertura florestal, proporcionado principalmente pelo avanço do sensoriamento remoto, favorece o surgimento de grandes bases de dados de degradação (PINHEIRO, 2015). No entanto, o desafio atual é a extração de tais conhecimentos implícitos nas referidas bases, de forma que os mesmos sejam úteis nos estudos sobre a dinâmica de mudança da cobertura da terra.

2.6 A Análise Exploratória de Dados

A Análise Exploratória de Dados (AED) é uma abordagem da análise de dados que emprega um conjunto diferente de técnicas para vasculhar bases de dados com o propósito de identificar potenciais informações, de isolar variáveis importantes, de detectar *outliers*, assim como o de descobrir estruturas implícitas (HINTERBERGER, 2009). No contexto dos dados espaciais, a AED tem ainda seu foco na interação em tempo real, nas múltiplas visões dos dados e na busca por padrões e anomalias (GOODCHILD, 2009), sendo adotada pelos usuários de bancos de dados como suporte à mineração de dados e à descoberta de conhecimento.

Paralelamente ao crescimento da capacidade de aquisição de dados, houve o aprimoramento de sistemas computacionais de armazenamento e recuperação, assim como dos processos de investigação sobre os mesmos. Nesse contexto, o Processo de Descoberta de Conhecimento em Banco de Dados (*Knowledge Discovery in Databases - KDD*), descrito por Fayyad et al. (1996), define um conjunto de etapas que visa identificar, de forma não trivial, padrões de dados válidos, originais (previamente desconhecidos), potencialmente úteis (no contexto desejado) e compreensíveis, obtidos a partir de grandes bases de dados. Na Figura 2.8, uma adaptação da sequência de etapas que compõem o Processo KDD é apresentada.

Figura 2.8 - Etapas do Processo KDD.



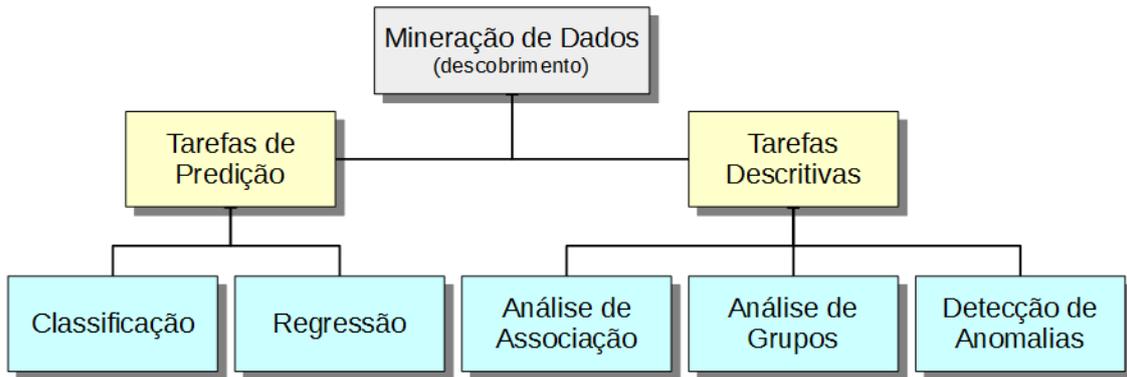
Fonte: Adaptado de Fayyad et al. (1996).

1. **Preparação dos dados:** em função do conhecimento que se pretende adquirir no domínio da aplicação do estudo, são identificadas e selecionadas, dentre todos os dados e variáveis disponíveis na base de dados, quais serão efetivamente utilizados para produzir o conhecimento de interesse. Paralelamente, são executadas operações para retirar ruídos indesejáveis e definir a estratégia para lidar com eventuais problemas envolvendo os dados (p.ex. falta de completeza ou exatidão). Caso seja necessário, também são utilizados métodos de redução de dimensionalidade das variáveis e transformações que visem melhorar a representação dos mesmos.
2. **Mineração de dados:** é a principal etapa do Processo KDD, na qual são efetivamente descobertas as informações úteis e implícitas nas grandes bases de dados, com a identificação de padrões que poderiam, de outra forma, ser ignorados. Para tal, são selecionados os algoritmos de mineração que serão utilizados de acordo com os objetivos da investigação (p.ex. algoritmos de classificação, associação, agrupamento ou detecção de anomalias), assim como os parâmetros mais apropriados para sua aplicação.
3. **Aplicação do conhecimento:** busca-se interpretar os padrões minerados de modo que o conhecimento produzido seja incorporado a outros sistemas, subsidiando o planejamento e a execução de outras ações.

Segundo Geetha et al. (2008), o objetivo da Etapa de Mineração de Dados pode ser dividido em Verificação ou Descobrimto (Figura 2.9). No caso da Verifica-

ção, é testada a validade de uma hipótese inicial. No Descobrimto, busca-se determinar novos padrões utilizando Tarefas de Predição (Classificação e Regressão) e Tarefas Descritivas (Análise de Associação, Análise de Grupo e Detecção de Anomalias) (TAN et al., 2009).

Figura 2.9 - Tarefas de descobrimto em mineração de dados.



No contexto deste trabalho, a Tarefa de Classificação é utilizada para organizar a base de dados de cobertura em categorias de acordo com um modelo (tipologia), mapeando um conjunto de atributos de entrada para o rótulo de uma classe pré-determinada. Desse modo, é possível definir um domínio de classificações a partir do qual as demais unidades de análise são rotuladas. São algoritmos de classificação a Árvore de Decisão, o Vizinbo Mais Próximo, as Redes Neurais e a Máquina de Vetor de Suporte. A Tarefa de Agrupamento, por sua vez, parte do princípio de que trajetórias com comportamento semelhante pertencem ao mesmo conjunto. Como consequência, são mais próximas entre si do que de outras pertentes aos demais agrupamentos. Para tal propósito, são utilizados algoritmos como o *K-Means Clustering*, o Agrupamento Hierárquico e o *Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN). Por fim, a Tarefa de Detecção de Anomalias procura identificar dados de cobertura significativamente diferentes do esperado, dado um contexto pré-definido.

2.7 As Trajetórias de Objetos Móveis e os Padrões Comportamentais

No contexto dos objetos móveis, as trajetórias são constituídas de sequências finitas de posições referenciadas no tempo (LAUBE; IMFELD, 2002). Desse modo,

são representadas por uma poligonal que interliga um conjunto de n pontos, na qual as localizações são conhecidas por t instantes consecutivos (GUDMUNDSSON et al., 2004). Tais trajetórias são utilizadas para modelar fenômenos em diferentes domínios de aplicação, como em Straw et al. (2010), no estudo da migração de espécies animais; em Kratz e Nishino (2009), na detecção de movimentos em multidões; e em Mirge et al. (2014) e Guo et al. (2010), no estudo de padrões de deslocamento de veículos.

Para que os dados de trajetórias sejam interpretados corretamente, são necessárias novas técnicas, métodos e algoritmos, que possibilitem a extração de um conhecimento útil e aplicável no contexto desejado (BOGORNÝ et al., 2012). Com tal propósito, Laube e Imfeld (2002) definiram um conceito de análise denominado de REMO (*RElative MOtion*), que permite, por intermédio da comparação dos atributos dos objetos pontuais ao longo do tempo e do espaço, a construção de uma variedade de padrões comportamentais com o intuito de relacionar os diferentes movimentos observados. Posteriormente, o referido trabalho foi estendido para comportar o conceito de restrição espacial, tomando como base a premissa de que o movimento dos objetos é influenciado pelo movimento de outros objetos na mesma região geográfica (LAUBE et al., 2005).

Os padrões comportamentais de objetos móveis podem ocorrer no interior de uma mesma trajetória ou em trajetórias distintas, de forma isolada ou simultânea, caracterizando as mesmas em função das similaridades observadas. Com esse propósito foram definidos os Padrões de Convergência, Encontro, Rebanho, Liderança e Detecção de Anomalias, cujas definições são apresentadas a seguir (JEUNG et al., 2011):

- a) **Convergência** (n, r): caracterizado por um conjunto de no mínimo n objetos que chegarão a uma mesma região do espaço representada por uma circunferência de raio r , não necessariamente ao mesmo tempo, caso mantenham seus respectivos azimutes.
- b) **Encontro** (n, r): definido por um grupo de no mínimo n objetos que chegarão simultaneamente a uma mesma região do espaço representada por uma circunferência de raio r , caso mantenham as suas respectivas velocidades e azimutes.
- c) **Rebanho** (n, r, k): determinado por um conjunto de no mínimo n objetos que se movem dentro de uma mesma região do espaço representada

por uma circunferência de raio r , por pelo menos k instantes de tempo.

- d) **Liderança** (n, r, k) : caracterizado por um conjunto de no mínimo n objetos que se movem dentro de uma mesma região do espaço representada por uma circunferência de raio r , por pelo menos k instantes de tempo. O objeto que antecipa o movimento dos demais é o objeto líder.
- e) **Detecção de Anomalias** (n, r, p) : definido por um conjunto de no mínimo n objetos, no qual a trajetória de até p elementos difere das demais. Para tal, considera-se uma determinada região do espaço representada por uma circunferência de raio r .

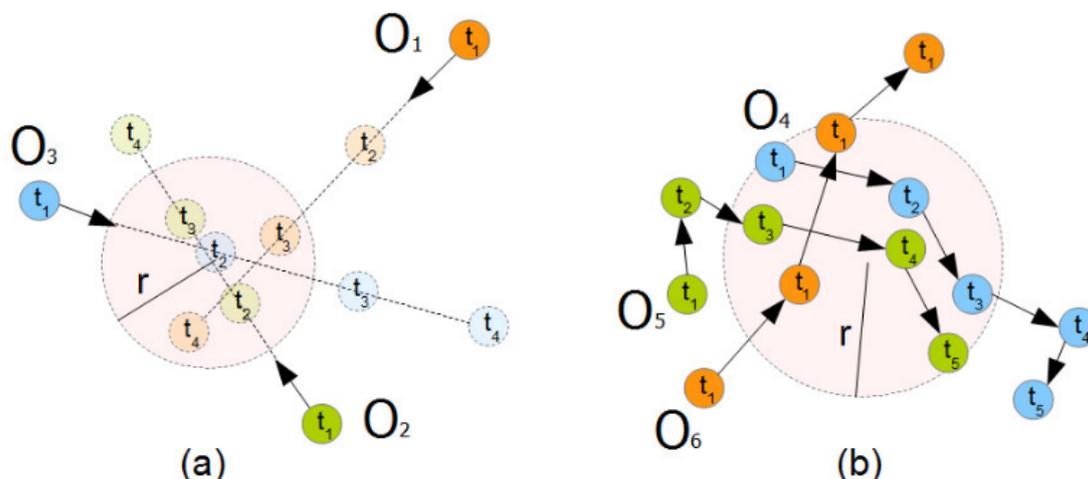
Na Figura 2.10a, são exemplificados o padrão de Convergência $(2, r)$, caracterizado pelos objetos O_1 , O_2 e O_3 , que chegarão à circunferência de raio r se mantiverem seus azimutes; Encontro $(2, r)$, definido pelos objetos O_2 e O_3 , que chegam à circunferência de raio r no mesmo instante t_2 ; e Rebanho $(2, r, 2)$, determinado pelos objetos O_1 e O_2 , que se movem dentro da circunferência de raio r , por pelo menos dois instantes de tempo. Na Figura 2.10b, por sua vez, são apresentados exemplos do padrão de Liderança $(2, r, 3)$, caracterizado pelos objetos O_4 e O_5 , que se movem dentro da circunferência de raio r , por pelo menos três instantes de tempo (O_4 é o objeto líder e antecipa os movimentos de O_5); e ainda a da Detecção de Anomalias $(3, r, 1)$, considerando o objeto O_6 , cujo movimento dentro da circunferência de raio r difere de forma significativa dos demais (O_4 e O_5).

Os padrões comportamentais são de grande utilidade na análise de trajetórias de objetos móveis, mas podem não ser aplicáveis diretamente em outros contextos nos quais a propriedade mensurada que varia no tempo é diferente, assim como a própria semântica dada ao conceito de trajetória. A adaptação de tais conceitos para outros estudos oferece novas possibilidades de análise sobre dados de trajetórias, como por exemplo, no estudo da dinâmica de coberturas florestais.

2.8 As Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra

Os trabalhos sobre as trajetórias de cobertura disponíveis na literatura são similares no propósito de identificar e quantificar as mudanças de cobertura da terra, sendo as principais diferenças observadas relacionadas às dimensões da escala das bases de dados utilizadas. A extensão espacial, por exemplo, variou em função dos objetivos dos trabalhos e das diferentes regiões de estudo. Em

Figura 2.10 - Padrões comportamentais de trajetórias de objetos móveis.



Fonte: Azeredo et al. (2016).

sua maior parte, os dados foram obtidos pelos sensores Landsat TM (PINHEIRO, 2015; BOORI; VOZENILEK, 2014b), Landsat ETM+ (GAVLAK et al., 2011), Landsat MSS (ZHOU et al., 2008b; MERTENS; LAMBIN, 2000) e SPOT 5 (WANG et al., 2013). As unidades de análise mais utilizadas foram o *pixel* (MENA, 2008), as células regulares (PINHEIRO, 2015; GAVLAK et al., 2011) e os polígonos irregulares representadas por lotes cadastrais e setores censitários (RUIZ; DOMON, 2009; MENA, 2008).

No que se refere a dimensão temporal, a maioria dos estudos analisou intervalos de tempo com uma extensão superior a quinze anos (PINHEIRO, 2015; BOORI; VOZENILEK, 2014b; RUIZ; DOMON, 2009; ZHOU et al., 2008b; MENA, 2008; KÄYHKÖ; SKÅNES, 2008; BRAIMOH; VLEK, 2005). Algumas exceções foram observadas (WANG et al., 2013; GAVLAK et al., 2011; PETIT et al., 2001; MERTENS; LAMBIN, 2000). Cabe ressaltar que a dimensão temporal é definida sobre a base de dados em função das mudanças e dos processos existentes na área de estudo, mas também pode estar condicionada aos dados de observação disponíveis. A resolução temporal média das trajetórias, por sua vez, foi de cinco anos, raramente ultrapassando dez anos (BOORI; VOZENILEK, 2014b; RUIZ; DOMON, 2009). Desse modo, favoreceram a identificação de processos de mudança relativamente curtos.

O domínio de classificações da cobertura foi composto, na maior parte dos casos observados, por no máximo dez classes (BOORI; VOZENILEK, 2014b; WANG et al., 2013; RUIZ; DOMON, 2009; ZHOU et al., 2008b; BRAIMOH; VLEK, 2005; MERTENS; LAMBIN, 2000). No entanto, em Pinheiro (2015) e Petit et al. (2001), as tipologias definiram um número superior de classificações. Quanto à composição das trajetórias, foram utilizadas em sua maioria sequências de dados com três observações (BOORI; VOZENILEK, 2014b; WANG et al., 2013; BRAIMOH; VLEK, 2005), quatro observações (GAVLAK et al., 2011; MERTENS; LAMBIN, 2000) e cinco observações (RUIZ; DOMON, 2009; ZHOU et al., 2008b). Somente lembrando que a observação está relacionada à fonte de dados de cobertura (p.ex. imagens de satélite).

Poucos trabalhos utilizaram as mudanças de cobertura classificadas para inferir sobre a previsão de mudanças futuras. Em Petit et al. (2001), por exemplo, foi testado um modelo baseado na Cadeia de Markov para projetar as mudanças de cobertura em um futuro próximo, concluindo sobre o aumento e redução das classes de cobertura identificadas. Em Mena (2008), por sua vez, foi utilizado um modelo de regressão logística com variáveis como a proximidade das cidades e a declividade do terreno, para a determinação da probabilidade de transições futuras.

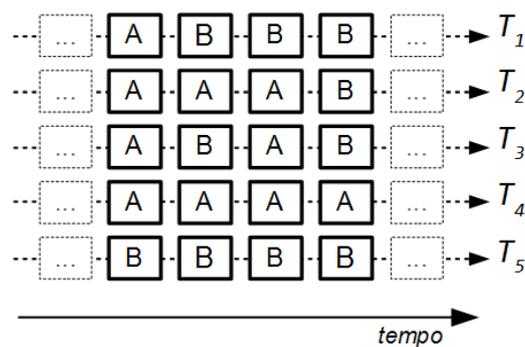
Dentre os diferentes contextos de estudo sobre mudanças de cobertura da terra, foram identificados trabalhos envolvendo fronteiras agrícolas (BOORI; VOZENILEK, 2014a; RUIZ; DOMON, 2009; BRAIMOH; VLEK, 2005), distribuição de espécies vegetais (KÄYHKÖ; SKÅNES, 2008), bacias hidrográficas (WANG et al., 2013; WANG et al., 2012), ocupação humana e urbanização (CHEN et al., 2009; SILVA et al., 2005) e desflorestamento (MERTENS; LAMBIN, 2000; GAVLAK et al., 2011). No contexto específico das coberturas florestais na região amazônica, poucos trabalhos foram observados. Gavlak et al. (2011), por exemplo, relacionou a dinâmica de mudança de cobertura à ocupação humana no Distrito Florestal Sustentável da BR-163. Para tal, definiu uma tipologia com cinco trajetórias em uma base com extensão temporal de dez anos, resolução temporal de três anos e quatro observações.

No contexto da degradação florestal, por sua vez, destaca-se o trabalho de Pinheiro (2015), que classificou e avaliou uma base de dados anual de degradação florestal na região da Amazônia Legal. Para tal, definiu uma tipologia com 4 tipos de trajetórias principais e 28 observações com resolução temporal anual (base de dados utilizada neste trabalho). Como resultado, quantificou e carac-

terizou as trajetórias de degradação florestal existentes nas regiões de estudo, relacionando a dinâmica de mudança das trajetórias com os respectivos fatores motivadores.

No que se refere às definições das tipologias de trajetórias de mudança, verificou-se que é um procedimento comum selecionar as principais trajetórias de interesse e descartar as demais, uma vez que foram consideradas irrelevantes para o objetivo do estudo. Também foi observado que o agrupamento das trajetórias em todos os trabalhos foi determinado pela presença (nas trajetórias) de certas classificações de cobertura previamente definidas. Tal tipologia apresenta a vantagem de simplificar o processo de classificação das trajetórias mantendo o foco na existência das coberturas que as constituem, mas não analisa a semântica envolvida nas alterações observadas, nem tão pouco no encadeamento temporal das classificações. Na Figura 2.11, por exemplo, são apresentadas cinco trajetórias (T_1 a T_5) que, apesar de possuírem evoluções temporais distintas, seriam agrupadas em uma mesma tipologia baseada na presença das coberturas A e B . No entanto, pode ser importante analisar como tais coberturas evoluíram ao longo do tempo, segregando as trajetórias que possuem uma única classe de cobertura (T_4 e T_5). Como consequência, são necessárias novas metodologias de agrupamento que conduzam a outras formas de classificar e estudar as trajetórias de mudança de cobertura da terra.

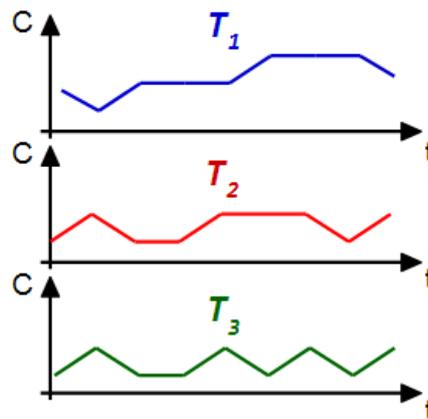
Figura 2.11 - Trajetórias com domínio de coberturas A e B .



2.8.1 Agrupamento de Trajetórias por Semelhança de Evolução Temporal

No contexto das trajetórias de mudança de cobertura da terra, é possível agrupar as mesmas em função da semelhança entre suas sequências de cobertura, ou seja, da semelhança entre suas evoluções temporais. Na Figura 2.12, por exemplo, são apresentadas três trajetórias e suas respectivas variações de uma determinada propriedade C , classificada ao longo do tempo t . É possível observar, comparando a evolução temporal das classificações de cobertura, por exemplo, que a trajetória T_2 apresenta uma evolução temporal mais próxima da trajetória T_3 do que da trajetória T_1 . No entanto, para agrupá-las tomando como referência a evolução temporal de suas coberturas, é preciso inicialmente quantificar, de alguma forma, a proximidade entre tais evoluções.

Figura 2.12 - Comparação entre a evolução temporal de trajetórias de mudança de cobertura.

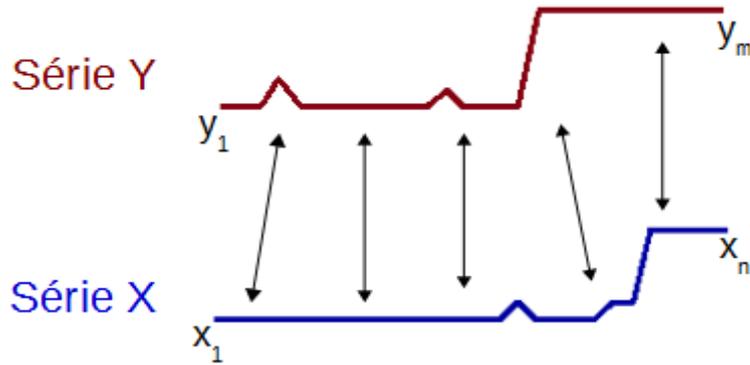


2.8.1.1 Cálculo do Índice de Proximidade entre as Trajetórias de Mudança

O cálculo de um índice de proximidade entre as séries temporais de dados de cobertura permite identificar as trajetórias que possuem maior semelhança entre si. Dependendo do contexto, o índice de proximidade calculado pode representar uma medida de dissimilaridade (quanto menor o valor, maior a semelhança) ou de similaridade (quanto maior o valor, maior a semelhança). Existem diferentes algoritmos que calculam índices de proximidade entre séries de dados, dentre os quais o algoritmo DTW (SAKOE; CHIBA, 1978).

Inicialmente concebido e aplicado no reconhecimento de voz, o algoritmo DTW calcula o custo mínimo para alinhar duas sequências independentes de dados numéricos, não necessariamente com a mesma quantidade de pontos (MULLER, 2007). Como por exemplo, no caso das séries $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, com $n \in \mathbb{N}$; e $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, com $m \in \mathbb{N}$ (Figura 2.13).

Figura 2.13 - Correspondência entre um par de sequências de dados X e Y.

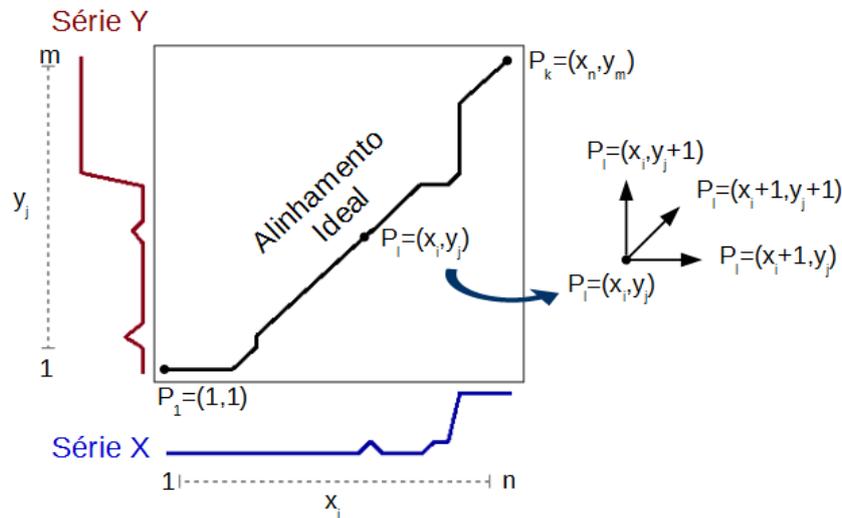


Com o propósito de comparar as sequências temporais, o algoritmo DTW computa inicialmente a matriz de custo local C_l que representa as distâncias entre todos os pontos existentes no par de sequências X e Y (SENIN, 2008) (Equação 2.1).

$$C_l : c_{i,j} = \|\{x_i - y_j\}\|, i \in [1 : n], j \in [1 : m] \quad (2.1)$$

Posteriormente, os valores referentes aos custos locais acumulados dão origem à matriz de custo global, na qual o alinhamento ideal correspondente ao custo mínimo é representado pelo caminho (sequência de pontos) $p = (p_1, p_2, \dots, p_k)$, com $p_l = (x_i, y_j)$ para todo $l \in [1 : k]$ (Figura 2.14).

Figura 2.14 - Alinhamento resultante entre um par de seqüências de dados.



Para a determinação do alinhamento ideal, as seguintes restrições devem ser satisfeitas (SENIN, 2008; BERNDT; CLIFFORD, 1994):

- **Condições de Borda:** $P_1 = (1, 1)$ e $P_k = (n, m)$, o que corresponde ao alinhamento dos pontos iniciais e finais do par de seqüências. O caminho solução, que representa o menor custo entre todos os custos possíveis, tem início em p_1 e término em p_k (Figura 2.14).
- **Monotonicidade:** $n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_k$ e $m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_k$. Desse modo, é garantido o ordenamento temporal dos pontos impossibilitando o retrocesso no tempo.
- **Tamanho do Passo:** $P_{l+1} - P_l \in \{(1, 0), (0, 1), (1, 1)\}$. Desse modo, o passo utilizado no alinhamento das seqüências fica limitado, respectivamente, a um movimento para a direita, para cima ou para a diagonal superior direita (Figura 2.14).

Uma vez que no contexto deste trabalho as seqüências de dados (trajetórias) são representadas pelas coberturas classificadas, quanto menor o custo necessário para “alinhar” duas trajetórias de mudança de cobertura distintas, maior a similaridade entre a evolução temporal das mesmas. No caso de uma base de dados com n trajetórias, por exemplo, são determinados $\frac{n(n-1)}{2}$ índices de proximidade

entre os pares existentes, considerando a simetria entre os valores calculados. Para cada trajetória, existem n dimensões de representação, o que significa que em uma base com 200 trajetórias, por exemplo, são calculados 19.900 índices ao todo e existem 200 dimensões de representação para cada trajetória. Nesse contexto, a utilização de um algoritmo de redução de dimensionalidade é algo necessário e desejável para facilitar a representação e interpretação dos resultados, o que pode ser realizado com o auxílio do algoritmo CMDS (TORGERSON, 1952).

2.8.1.2 Recuperação da Distribuição Espacial das Trajetórias de Mudança

Segundo Kruskal e Wish (1978), o MDS envolve uma classe de técnicas que utiliza o conceito de proximidade entre um conjunto de objetos tomados aos pares. Nesse caso, a proximidade é representada por um valor de dissimilaridade que indica semelhança. Quanto menor o valor, mais próximos encontram-se os objetos em um espaço de representação. Como resultado, o MDS busca determinar o arranjo espacial multidimensional que melhor represente as relações embutidas na matriz dos índices de proximidade calculados entre os referidos objetos (FRIEDMAN; KOHLER, 2003).

Existem diferentes tipos de MDS de acordo com as características dos dados que se deseja trabalhar. O MDS métrico, por exemplo, é caracterizado pela comparação entre os valores de proximidade calculados utilizando uma determinada métrica de distância (p.ex. distância euclidiana). O CMDS, por sua vez, é um MDS métrico que considera uma única matriz simétrica de dissimilaridades.

As distâncias resultantes calculadas entre os pares de objetos após a aplicação do CMDS são diferentes das distâncias iniciais, pois foram calculadas tomando como referência a matriz dos índices de proximidade (dissimilaridades). Segundo Kruskal e Wish (1978), essas diferenças são representadas por uma medida de ajuste chamada de *Stress*, que auxilia na determinação da dimensão na qual as distorções entre as configurações são minimizadas. Na Equação 2.2, o termo \hat{d}_{ij} representa a distância no espaço calculada pelo CMDS e d_{ij} é a dissimilaridade original (índice de proximidade) entre cada par de objetos i e j .

$$Stress = \sqrt{\frac{\sum_{i < j} (\hat{d}_{ij} - d_{ij})^2}{\sum_{i < j} d_{ij}^2}} \quad (2.2)$$

Para que as índices de dissimilaridades (d_{ij}) sejam mapeados pelo CMDS para representar a proximidade entre os objetos na forma de distâncias euclidianas (\hat{d}_{ij}), por exemplo, as seguintes propriedades métricas devem ser satisfeitas (BORG; GROENEN, 2005):

- **Não negatividade:** a distância entre dois objetos quaisquer é sempre maior ou igual a zero ($d_{ij} \geq 0$).
- **Simetria:** a distância calculada entre dois objetos é sempre igual, não importando quem é tomado como referência ($d_{ij} = d_{ji}$).
- **Inequação triangular:** a distância direta entre dois objetos nunca será maior que a distância entre os mesmos tomada por um ponto intermediário qualquer ($d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}$).

Caso a propriedade da inequação triangular seja violada em algum momento devido à natureza dos valores de dissimilaridade presentes no conjunto de dados, é possível avaliar a necessidade e o impacto da adição de uma constante à matriz de dissimilaridades (BORG; GROENEN, 2005), de modo que as proximidades entre as trajetórias sejam relativamente preservadas. Segundo Kruskal (1964), é aceitável um valor de stress menor ou igual a 0,1. Como consequência, os dados resultantes da aplicação do CMDS representam o arranjo espacial das trajetórias em um sistema de coordenadas arbitrário, definido pelo próprio algoritmo e calculado em função dos índices de proximidade utilizados segundo uma métrica de distância euclidiana.

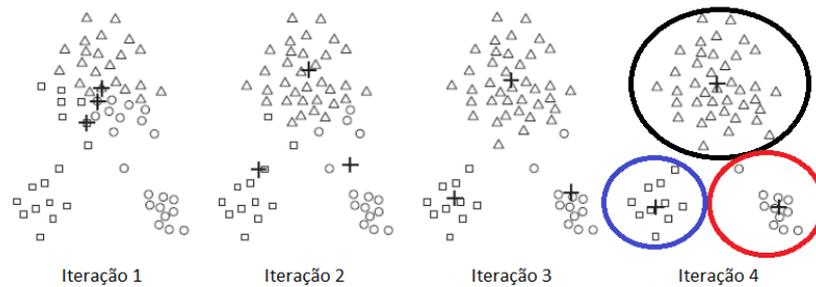
2.8.1.3 Agrupamento das Trajetórias de Mudança Semelhantes

Para o agrupamento das trajetórias semelhantes, ou seja, das trajetórias mais próximas no arranjo espacial resultante da aplicação do CMDS na etapa anterior, pode ser utilizado o algoritmo *K-Means Clustering* que agrupa o conjunto de dados em k de grupos, considerando as seguintes etapas:

- a) escolha dos k centroides iniciais;
- b) formação dos k grupos, atribuindo a cada ponto do conjunto de dados o respectivo centroide mais próximo;
- c) cálculo dos centroides dos k grupos em função dos pontos do conjunto de dados atribuídos aos mesmos na etapa anterior.

As etapas b) e c) são repetidas até que os centroides associados não sejam mais alterados ou que uma condição de parada pré-definida seja satisfeita. Na Figura 2.15, por exemplo, foram necessárias quatro iterações para a formação de três grupos de dados, dada uma determinada condição de parada.

Figura 2.15 - Iterações do método *K-Means Clustering*.



Fonte: Adaptado de [Tan et al. \(2009\)](#).

Posteriormente, os agrupamentos gerados pela metodologia podem servir de base para a criação de uma tipologia de trajetórias em função de algumas de suas propriedades observadas ao longo do tempo.

É fato que as trajetórias de mudança são o estado da arte no estudo da dinâmica de mudança da cobertura da terra, possibilitando uma análise mais rica do que a análise bitemporal. No entanto, ainda é uma literatura que carece de novas metodologias e algoritmos que ofereçam novas possibilidades de exploração de bases de dados de cobertura, cada vez maiores em termos de qualidade e volume de informações. Desse modo, este trabalho propõe estudar a evolução temporal das trajetórias de mudança utilizando padrões comportamentais e uma metodologia de agrupamento combinando os algoritmos DTW, CMDS e *K-Means Clustering*.

3 BPML e GSTE: CONTRIBUIÇÕES PARA A MINERAÇÃO E ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO TEMPORAL DAS TRAJETÓRIAS DE MUDANÇA DE COBERTURA DA TERRA

Neste Capítulo, são apresentadas as duas principais contribuições deste trabalho, denominadas de *Behavioral Patterns Mining on Land Cover Change* (BPML) e *Grouping by Similarity of Temporal Evolution* (GSTE), bem como são descritas as metodologias desenvolvidas para sua utilização no contexto da degradação florestal. No entanto, cabe ressaltar que a as mesmas podem ser utilizadas para outros contexto de estudo, sem que haja grandes modificações.

A BPML trata da formalização de um conjunto de padrões comportamentais estudados no domínio dos objetos móveis (JEUNG et al., 2011; LAUBE et al., 2005; LAUBE; IMFELD, 2002), aqui definidos com o propósito de analisar a evolução temporal de trajetórias de mudança. São os componentes utilizados para identificar e caracterizar padrões de mudança válidos, compreensíveis e potencialmente úteis no estudo da dinâmica de mudança de cobertura da terra.

O GSTE, por sua vez, é uma metodologia desenvolvida para agrupar trajetórias de mudança com sequências de coberturas semelhantes. Diferente das metodologias computacionais usuais neste domínio, a proposta deste trabalho não se baseia na semelhança das classificação das coberturas presentes nas trajetórias, mas sim nas semelhanças obtidas a partir da observação da dinâmica temporal das coberturas. Para tal, são necessárias três etapas: (i) definição e cálculo de um índice de proximidade entre as trajetórias de mudança; (ii) recuperação da distribuição espacial das trajetórias de mudança; e (iii) agrupamento das trajetórias de mudança semelhantes utilizando como base o índice de proximidade calculado entre as mesmas.

Antes da apresentação das definições propriamente ditas dos padrões comportamentais, é necessário uniformizar os conceitos, mesmo que triviais, dos elementos básicos responsáveis por caracterizar tais padrões.

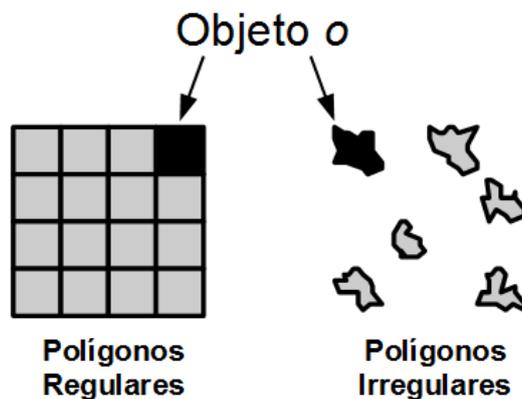
3.1 Conceitos Básicos

Definição 3.1. Objeto: O objeto o é a unidade básica de análise, identificado de forma singular, com geometria e localização espacial fixas.

Para a representação geométrica do objeto o é comum a utilização de polígonos regulares ou irregulares (Figura 3.1), uma vez que os mesmos favorecem o

cálculo de propriedades da cobertura no seu interior. Posteriormente, tais propriedades são utilizadas na classificação das respectivas coberturas.

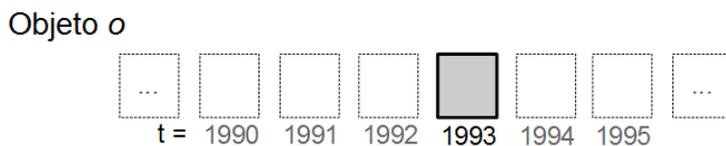
Figura 3.1 - Possíveis representações geométricas de um objeto o .



Definição 3.2. Instante: O instante t é um momento identificável na linha do tempo, associado à ocorrência de um evento de interesse.

No caso das coberturas florestais, o instante t está normalmente relacionado ao momento de obtenção dos dados de cobertura, ou seja, ao momento de aquisição da imagem pelo sensor remoto (Figura 3.2). Como consequência, é possível associar diferentes níveis de granularidade temporal aos dados (p.ex. hora, dia, mês ou ano).

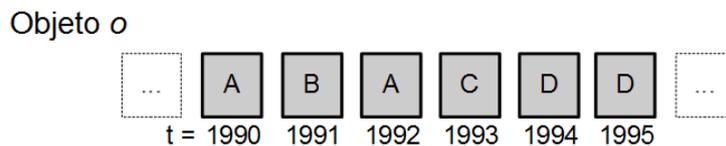
Figura 3.2 - Objeto o observado com resolução temporal anual, no instante $t = 1993$.



Definição 3.3. Estado: O estado e representa o valor da propriedade do objeto o associado a sua respectiva classificação de cobertura, de forma que para qualquer instante t , existe um único estado e correspondente.

O conjunto de estados utilizados para a classificação da cobertura é também chamado de “domínio de estados”. Na prática, corresponde à uma tipologia definida no contexto de estudo que representa todas as possíveis classificações de cobertura do objeto o . Na Figura 3.3, observa-se um conjunto de classificações de estado (A, B, C e D) em diferentes instantes na linha do tempo.

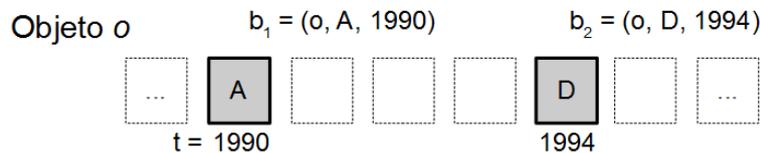
Figura 3.3 - Estados de um objeto o em diferentes instantes.



Definição 3.4. Observação: A observação b é representada de forma singular pela tupla $b = \{o, e, t\}$, na qual o objeto o possui o estado e , no instante t .

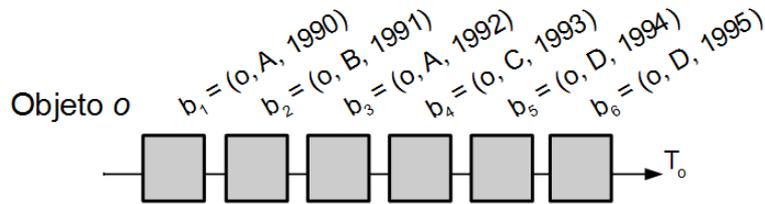
Cabe ressaltar que cada observação deve possibilitar o seu ordenamento cronológico, normalmente associado ao momento de aquisição da imagem de satélite. Na Figura 3.4, são destacadas duas observações referentes ao objeto o .

Figura 3.4 - Observações de um objeto o .



Definição 3.5. Trajetória: A trajetória $T_o = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ é uma lista finita de observações $b_n = \{o, e_n, t_n\}$ referentes a um objeto o , tal que, para qualquer $b_n \in T_o$, tem-se $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ (Figura 3.5).

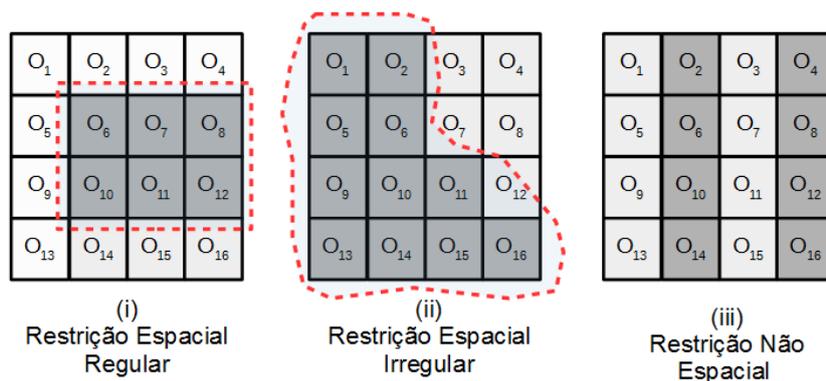
Figura 3.5 - Trajetória T_o referente ao objeto o .



Definição 3.6. Vizinhança: A vizinhança $V = \{T_{o1}, T_{o2}, \dots, T_{on}\}$ é uma lista finita de trajetórias obtida como resultado de restrições aplicadas sobre determinadas propriedades espaciais e/ou descritivas dos respectivos objetos associados.

As restrições espaciais buscam selecionar trajetórias com base na localização espacial do objeto o que as representa, enquanto que as restrições descritivas consideram propriedades não espaciais. Na Figura 3.6, são apresentados três exemplos de restrições aplicadas sobre uma grade celular: i) uma restrição espacial regular (p.ex. objetos localizados no interior de uma área regular); ii) uma restrição espacial irregular (p.ex. objetos localizados no interior de uma área irregular); e iii) uma restrição não espacial (p.ex. objetos com índices pares).

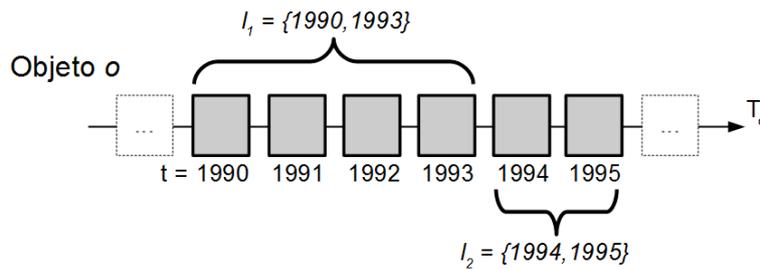
Figura 3.6 - Restrições de vizinhança sobre um conjunto de trajetórias.



Definição 3.7. Intervalo: O intervalo l é representado pela tupla $l = \{t_i, t_f\}$, na qual t_i é o instante inicial do intervalo e t_f o instante final, tal que $t_i \leq t_f$.

O intervalo l delimita a extensão temporal do conjunto de observações. Na Figura 3.7, são exemplificados os intervalos $l_1 = \{1990, 1993\}$ e $l_2 = \{1994, 1995\}$.

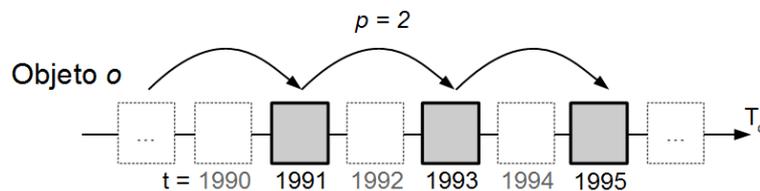
Figura 3.7 - Intervalos sobre a trajetória T_o .



Definição 3.8. Passo de Tempo: O passo de tempo p é o número inteiro positivo que representa o afastamento entre duas ou mais observações na série de dados $b_n = \{o, e_n, t_n\}$ e $b_m = \{o, e_m, t_m\}$, pertencentes à mesma trajetória T_o , tal que $p = m - n$.

Um exemplo de trajetória T_o com $p = 2$ é apresentado na Figura 3.8. A utilização de diferentes valores no passo de tempo permite analisar observações não consecutivas, o que fornece uma maior flexibilidade no estudo das trajetórias.

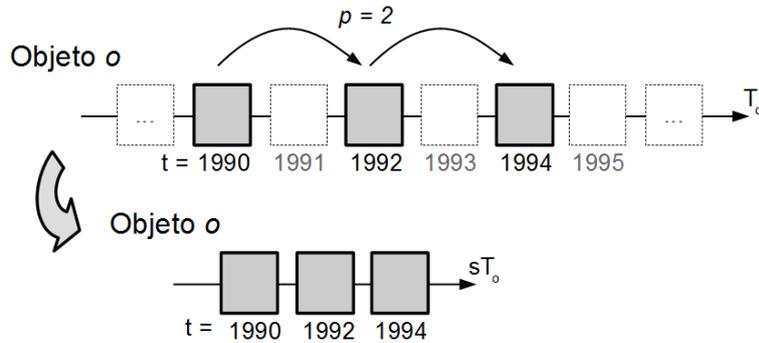
Figura 3.8 - Trajetória T_o com passo de tempo $p = 2$.



Definição 3.9. Janela Temporal: A janela temporal j é representada pela tupla $j = \{l, p\}$, na qual um intervalo $l = \{t_i, t_f\}$ e um passo de tempo p , restringem o conjunto de observações, originando uma nova trajetória sT_o .

Na Figura 3.9 é apresentada uma nova trajetória sT_o criada a partir de uma janela temporal $j = \{[1990, 1995], 2\}$ aplicada sobre a trajetória T_o .

Figura 3.9 - Janela temporal $j = \{[1990, 1995], 2\}$ sobre a trajetória T_o .

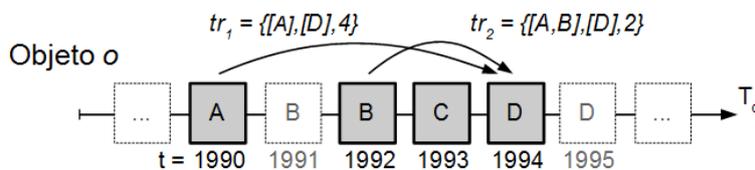


Definição 3.10. Conjunto de Estados: O conjunto de estados $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ é composto por um grupo finito de estados.

Definição 3.11. Transição de Estado: A transição de estado tr é representada pela tupla $tr = \{E_i, E_f, p\}$, na qual E_i é um conjunto de estados no instante t_i ; E_f é um conjunto de estados no instante t_f ; e p é o passo de tempo entre as observações b_i e b_f .

Uma transição de estado $tr = \{[e_i], [e_f], p\}$ somente é válida caso sejam verificadas as seguintes condições: i) $e_i \in E_i$; ii) $e_f \in E_f$; e iii) $p = f - i$. Na Figura 3.10, são apresentados os exemplos de transições de estado $tr_1 = \{[A], [D], 4\}$ e $tr_2 = \{[A, B], [D], 2\}$.

Figura 3.10 - Transições de estado $tr_1 = \{[A], [D], 4\}$ e $tr_2 = \{[A, B], [D], 2\}$.



Definição 3.12. Conjunto de Transições Anômalas de Estado: O conjunto de transições anômalas de estado $A = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\}$ é representado por um grupo finito de transições de estado definidas como anômalas.

As transições anômalas de estado são transições de estado que dependem da semântica dada por um especialista. São transições raras que ocorrem somente em determinados contextos específicos.

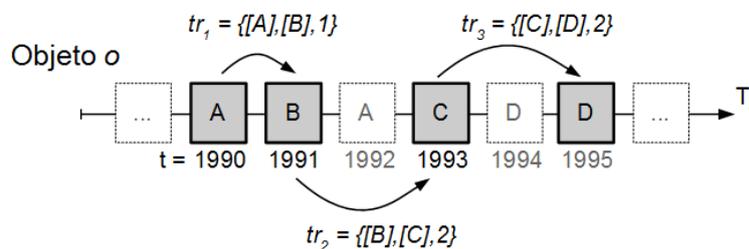
Definição 3.13. Conjunto de Transições Inconsistentes de Estado: O conjunto de transições inconsistentes de estado $I = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\}$ é representado por um grupo finito de transições de estado definidas como inconsistentes.

As inconsistências são prováveis erros (*outliers*) que não deveriam ocorrer em tempo algum. Também são definidas por um especialista.

Definição 3.14. Sequência de Transições de Estado: A sequência de transições de estado $s = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\}$ é uma lista finita de transições de estado encadeadas, tal que para cada par consecutivo de transições $tr_m = \{E_{i_m}, E_{f_m}, p_m\}$ e $tr_{m+1} = \{E_{i_{m+1}}, E_{f_{m+1}}, p_{m+1}\}$, tem-se $E_{f_m} \subseteq E_{i_{m+1}}$.

Uma sequência somente será validada depois de verificado o encadeamento dos conjuntos de estados, ou seja, o conjunto de estados finais de uma transição deve estar contido ou ser igual ao conjunto de estados iniciais da transição subsequente. Na Figura 3.11, é apresentado um exemplo de sequência com as seguintes transições de estado encadeadas: $tr_1 = \{[A], [B], 1\}$, $tr_2 = \{[B], [C], 2\}$ e $tr_3 = \{[C], [D], 2\}$.

Figura 3.11 - Sequência de transições de estado s .



Definição 3.15. Intensidade: A intensidade i é representada pela tupla $i = \{E_i, E_f, l\}$, na qual E_i é um conjunto inicial de estados no instante t_i ; E_f é um conjunto final de estados no instante t_f ; e l é o intervalo no qual a transição acontece.

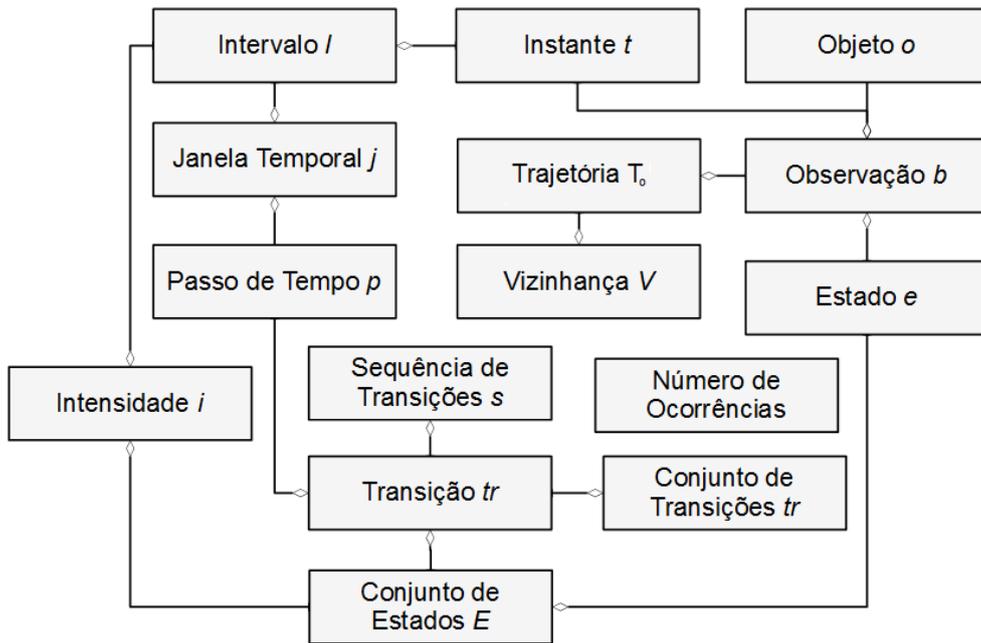
A intensidade no interior do intervalo l é determinada pelo passo de tempo da transição, considerando os estados E_i e E_f e suas respectivas observações. Quanto menor o afastamento (passo de tempo) entre as observações, mais intensa é a transição. No exemplo da Figura 3.10, é possível observar que a transição tr_1 ocorreu em quatro anos, enquanto que tr_2 em dois anos. Logo, a transição tr_2 foi mais intensa.

Definição 3.16. Número Mínimo de Ocorrências: O número mínimo de ocorrências n é um número inteiro positivo que define a quantidade mínima de ocorrências a partir da qual fica caracterizado um determinado evento de interesse.

Definição 3.17. Número Máximo de Ocorrências: O número máximo de ocorrências q é um número inteiro positivo que define o limite máximo de ocorrências para a caracterização de um determinado evento de interesse.

Os relacionamentos (agregações) entre o conjunto de elementos básicos definidos anteriormente são apresentados no diagrama da Figura 3.12. Cabe ressaltar que qualquer novo elemento pode ser definido de forma isolada ou como uma agregação (ou composição) dos elementos já existentes.

Figura 3.12 - Relacionamentos entre os elementos de caracterização dos padrões comportamentais.



3.2 Padrões Comportamentais no Contexto das Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra

Neste trabalho, são definidos e utilizados padrões comportamentais no contexto das coberturas da terra, adaptados do contexto dos objetos móveis. São eles os Padrões de Convergência, Encontro, Detecção de Anomalias, Liderança e Rebanho. O padrão de Detecção de Inconsistências, por sua vez, foi criado especificamente para este estudo, uma vez que foi definido com uma semântica diferente do Padrão de Detecção de Anomalias.

Definição 3.18. Padrão de Convergência: O Padrão de Convergência sobre uma vizinhança V é caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n trajetórias que tenham seus estados modificados, não necessariamente no mesmo instante, para um conjunto de estados definitivos de convergência E_c , no interior de uma janela temporal j e com intensidade i .

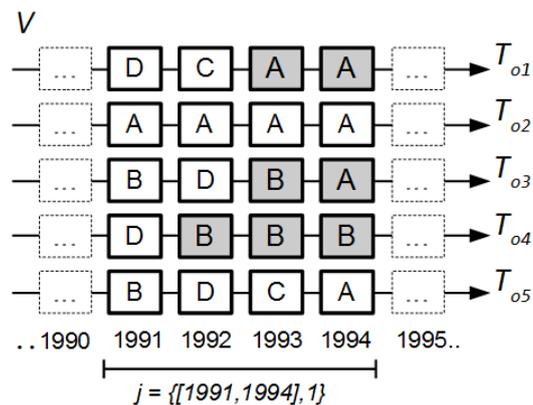
Para caracterizar a convergência no interior da janela temporal j , existem duas condições que devem ser satisfeitas: i) ao menos os dois últimos estados do objeto o , no interior da janela temporal j , devem pertencer ao conjunto de estados

de convergência E_c ; e ii) a trajetória do objeto deve possuir ao menos um estado não pertencente ao conjunto de estados de convergência E_c . Desse modo, é possível identificar o instante inicial da convergência que, por sua vez, é mantida posteriormente no interior da janela j . Não é necessário especificar a intensidade para o caso no qual o intervalo de pesquisa corresponde à extensão da janela temporal.

Utilizando o Padrão de Convergência, o analista pode buscar no banco de dados espaço-temporal de coberturas as respostas para diferentes questionamentos, como por exemplo: *Quais as trajetórias que convergem para um determinado conjunto de estados finais no interior de uma janela temporal específica? Quais trajetórias convergem para um determinado conjunto de estados finais, em um instante específico? Qual a intensidade das convergências identificadas anteriormente?*

Exemplo 1: Dada uma vizinhança $V = \{T_{o1}, T_{o2}, \dots, T_{o5}\}$ sobre uma base de dados de trajetórias; um conjunto de estados de convergência $E_c = \{A, B\}$; uma janela temporal $j = \{[1991, 1994], 1\}$; e um número mínimo de $n = 3$ trajetórias para que a existência do padrão seja caracterizada, verifica-se que somente o conjunto de trajetórias $T = \{T_{o1}, T_{o3}, T_{o4}\}$ atende às condições da pesquisa (Figura 3.13).

Figura 3.13 - FunçãoConvergência ($V, \{A, B\}, \{[1991, 1994], 1\}, 3$).



A trajetória T_{o2} foi descartada por não possuir ao menos um estado $e \notin E_c$, não sendo possível determinar, no interior de $j = \{[1991, 1994], 1\}$, o instante inicial de uma eventual convergência. No caso da trajetória T_{o5} , não foi possível determinar se o estado de convergência é mantido após $t = 1994$. Caso fosse definida uma

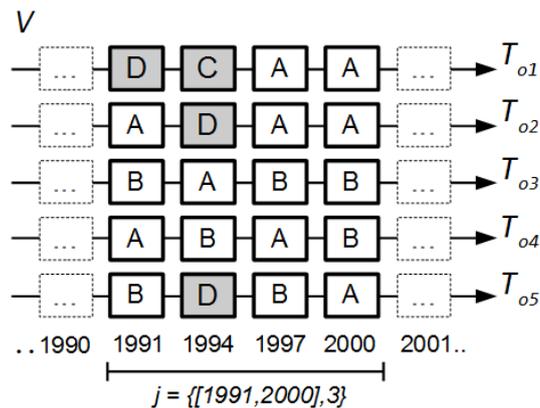
intensidade de convergência $i = \{D, B, [1991, 1993]\}$, por exemplo, somente a trajetória T_{o4} atenderia às condições supracitadas.

Definição 3.19. Padrão de Encontro: O Padrão de Encontro sobre uma vizinhança V é caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n trajetórias que possuem um estado $e \in E_e$, definido como um conjunto de estados de encontro, no interior de uma janela temporal j .

Utilizando o Padrão de Encontro, o analista pode buscar no banco de dados espaço-temporal de coberturas as respostas para diferentes questionamentos, como por exemplo: *Quais as trajetórias de mudança de cobertura que apresentam classificação de cobertura idêntica (ou similar) em um determinado instante ou no interior de um intervalo específico?*

Exemplo 2: Dada uma vizinhança $V = \{T_{o1}, T_{o2}, \dots, T_{o5}\}$ sobre uma base de dados de trajetórias; um conjunto de estados de encontro $E_c = \{C, D\}$; uma janela temporal $j = \{[1991, 2000], 3\}$; e um número mínimo de $n = 2$ trajetórias para que a existência do padrão seja caracterizada, verifica-se que somente o conjunto de trajetórias $T = \{T_{o1}, T_{o2}, T_{o5}\}$ atende às condições da pesquisa (Figura 3.14). As trajetórias T_{o3} e T_{o4} foram descartadas por não apresentarem estados de encontro no interior da janela temporal j .

Figura 3.14 - Função Encontro ($V, \{C, D\}, \{[1991, 2000], 3\}, 2$).



Definição 3.20. Padrão de Detecção de Anomalias: O Padrão de Detecção de Anomalias sobre uma vizinhança V é caracterizado por um conjunto de, no máximo, q trajetórias que possuem pelo menos uma transição de estado $tr \in$

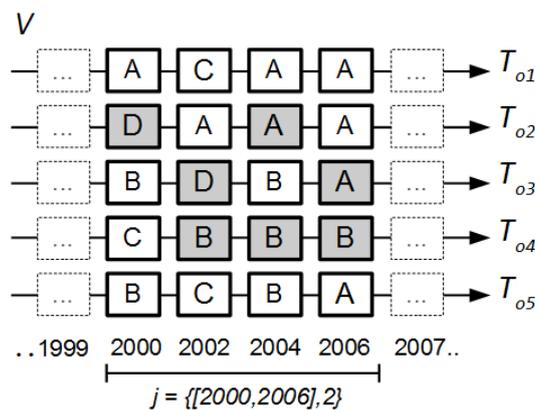
$A = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\}$, definido como o conjunto de transições anômalas de estado no interior de uma janela temporal j .

A anomalia fica caracterizada caso sejam encontradas até q trajetórias. Qualquer valor superior é considerado aceitável (normal).

Utilizando o Padrão de Detecção de Anomalias, o analista pode buscar no banco de dados espaço-temporal de coberturas as respostas para diferentes questionamentos, como por exemplo: *Quais as trajetórias de mudança de cobertura que apresentam alguma transição de estado definida como rara ou inesperada em sua composição, a partir de uma definição dada por um especialista?*

Exemplo 3: Dada uma vizinhança $V = \{T_{o1}, T_{o2}, \dots, T_{o5}\}$ sobre uma base de dados de trajetórias; um conjunto de transições anômalas de estado $A = \{tr_1, tr_2\}$, tal que $tr_1 = \{[D], [A], 2\}$ e $tr_2 = \{[B], [B], 1\}$; uma janela temporal $j = \{[2000, 2006], 2\}$; e um número máximo de $q = 5$ trajetórias para que a existência do padrão seja caracterizada, verifica-se que somente o conjunto de trajetórias $T = \{T_{o2}, T_{o3}, T_{o4}\}$ atende às condições da pesquisa (Figura 3.15). As trajetórias T_{o1} e T_{o5} foram descartadas por não possuírem transições de estado definidas como anômalas.

Figura 3.15 - FunçãoAnomalia ($V, \{[D, A, 2][B, B, 1]\}, \{[2000, 2006], 2\}, 5$).



Definição 3.21. Padrão de Detecção de Inconsistências: O Padrão de Detecção de Inconsistências sobre uma vizinhança V é caracterizado pela existência de pelo menos uma transição de estado $tr \in I = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\}$, definido como o conjunto de transições inconsistentes de estado no interior da janela temporal

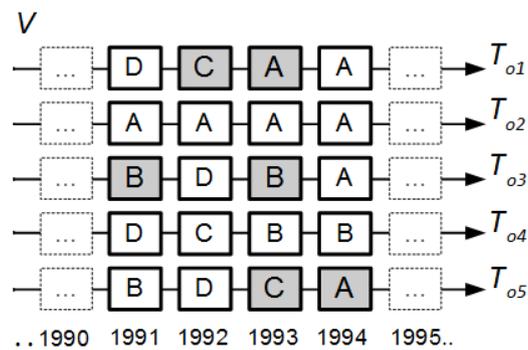
j .

As inconsistências identificadas podem indicar problemas no processo de detecção de mudanças e classificação das coberturas. Desse modo, em função dos resultados encontrados, é possível isolar tais trajetórias para que as mesmas não influenciem outras análises.

Utilizando o Padrão de Detecção de Inconsistências, o analista pode buscar no banco de dados espaço-temporal de coberturas as respostas para diferentes questionamentos, como por exemplo: *Quais as trajetórias de mudança de cobertura que apresentam alguma de transição de estado definida como inconsistente em sua composição, a partir de uma definição dada por um especialista?*

Exemplo 4: Dada uma vizinhança $V = \{T_{o1}, T_{o2}, \dots, T_{o5}\}$ sobre uma base de dados de trajetórias; um conjunto de transições inconsistentes de estado $I = \{tr_1, tr_2\}$, tal que $tr_1 = \{[C], [A], 1\}$ e $tr_2 = \{[B], [B], 2\}$; e uma janela temporal $j = \{[1991, 1994], 1\}$, verifica-se que somente o conjunto de trajetórias $T = \{T_{o1}, T_{o3}, T_{o5}\}$ atende às condições da pesquisa (Figura 3.16). As trajetórias T_{o2} e T_{o4} foram descartadas por não possuírem transições de estado definidas como inconsistentes.

Figura 3.16 - Função Inconsistência ($V, \{[C, A, 1][B, B, 2]\}, \{[1991, 1994], 1\}$).



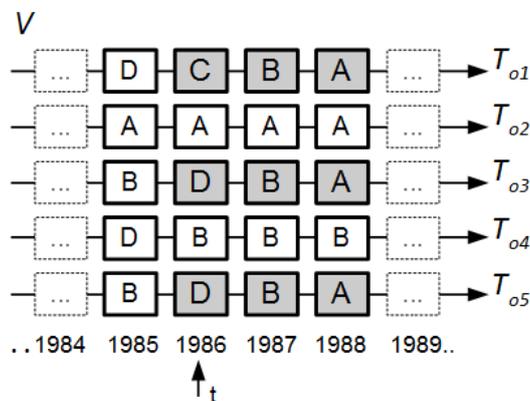
Definição 3.22. Padrão de Rebanho: O Padrão de Rebanho sobre uma vizinhança V é caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n trajetórias que possuem a sequência de transições de estado $s = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\}$ iniciada no mesmo instante t .

Uma vez que as transições de estado são definidas por conjuntos de estados, é possível verificar, tanto a existência de sequências idênticas, quanto a existência de sequências similares. Em outras palavras, transições entre grupos de cobertura com semântica semelhante.

Utilizando o Padrão de Rebanho, o analista pode buscar no banco de dados espaço-temporal de coberturas as respostas para diferentes questionamentos, como por exemplo: *Quais as trajetórias de mudança de cobertura que apresentam uma sequência de alterações de cobertura idêntica (ou similar) ao longo do tempo, iniciada no mesmo instante?*

Exemplo 5: Dada uma vizinhança $V = \{T_{o1}, T_{o2}, \dots, T_{o5}\}$ sobre uma base de dados de trajetórias; uma sequência de transições de estado $s = \{tr_1, tr_2\}$, tal que $E_1 = \{C, D\}$, $E_2 = \{B\}$, $E_3 = \{A\}$, $tr_1 = \{E_1, E_2, 1\}$ e $tr_2 = \{E_2, E_3, 1\}$, iniciada em $t = 1986$; e um número mínimo de $n = 2$ trajetórias para que a existência do padrão seja caracterizada, verifica-se que somente o conjunto de trajetórias $T = \{T_{o1}, T_{o3}, T_{o5}\}$ atende às condições da pesquisa (Figura 3.17).

Figura 3.17 - FunçãoRebanho ($V, \{tr_1, tr_2\}, 1996, 2$).



Considerando as transições de estado definidas no Exemplo 5, foram identificadas as sequências $C \rightarrow B \rightarrow A$ em T_{o1} , assim como a sequência $D \rightarrow B \rightarrow A$ em T_{o3} e T_{o5} . As trajetórias T_{o2} e T_{o4} foram descartadas por não possuírem sequências de transições de estado possíveis em s , iniciadas no instante t .

Definição 3.23. Padrão de Liderança: O Padrão de Liderança sobre uma vizinhança V é caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n trajetórias que

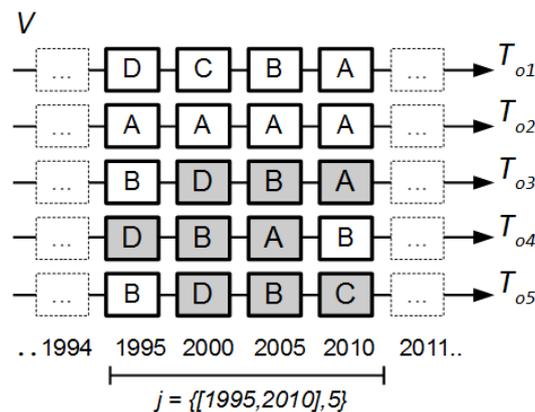
possuem a mesma sequência de transições de estado $s = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\}$ iniciadas no interior de uma janela temporal j , não necessariamente no mesmo instante t .

Sequências de transição de estado iniciadas em instantes distintos, mas em uma mesma vizinhança, podem indicar a existência de fatores motivadores semelhantes e eventuais “direções de propagação”.

Utilizando o Padrão de Liderança, o analista pode buscar no banco de dados espaço-temporal de coberturas as respostas para diferentes questionamentos, como por exemplo: *Quais as trajetórias de mudança de cobertura que apresentam uma sequência de alterações de cobertura idêntica (ou similar) ao longo do tempo, iniciadas no interior de uma determinada janela temporal?*

Exemplo 6: Dada uma vizinhança $V = \{T_{o1}, T_{o2}, \dots, T_{o5}\}$ sobre uma base de dados de trajetórias; uma sequência de transições de estado $s = \{tr_1, tr_2\}$, tal que $E_1 = \{D\}$, $E_2 = \{B\}$, $E_3 = \{A, C\}$, $tr_1 = \{E_1, E_2, 1\}$ e $tr_2 = \{E_2, E_3, 1\}$, iniciada no interior da janela temporal $j = \{[1995, 2010], 5\}$; e um número mínimo de $n = 3$ trajetórias para que a existência do padrão seja caracterizada, verifica-se que somente o conjunto de trajetórias $T = \{T_{o3}, T_{o4}, T_{o5}\}$ atende às condições da pesquisa (Figura 3.18).

Figura 3.18 - FunçãoLiderança ($V, \{tr_1, tr_2\}, \{[1995, 2010], 5\}, 3$).



No caso das transições de estado definidas no Exemplo 6, foram identificadas as sequências $D \rightarrow B \rightarrow A$ nas trajetórias T_{o3} e T_{o4} iniciando em $t = 1995$ e $t = 2000$, respectivamente; e ainda a sequência $D \rightarrow B \rightarrow C$ na trajetória T_{o5} , iniciando

em $t = 2000$. As trajetórias T_{o_1} e T_{o_2} foram descartadas por não possuírem a sequência de transições de estado s definida no interior da janela temporal j . Posteriormente, é possível investigar, com o auxílio de dados complementares e especialistas, se a trajetória T_{o_4} (líder) influenciou a ocorrência das trajetórias T_{o_3} e T_{o_5} .

Na Tabela 3.1, são resumidas as trajetórias de mudança de cobertura resultantes a partir da utilização dos padrões comportamentais e seus respectivos elementos de caracterização.

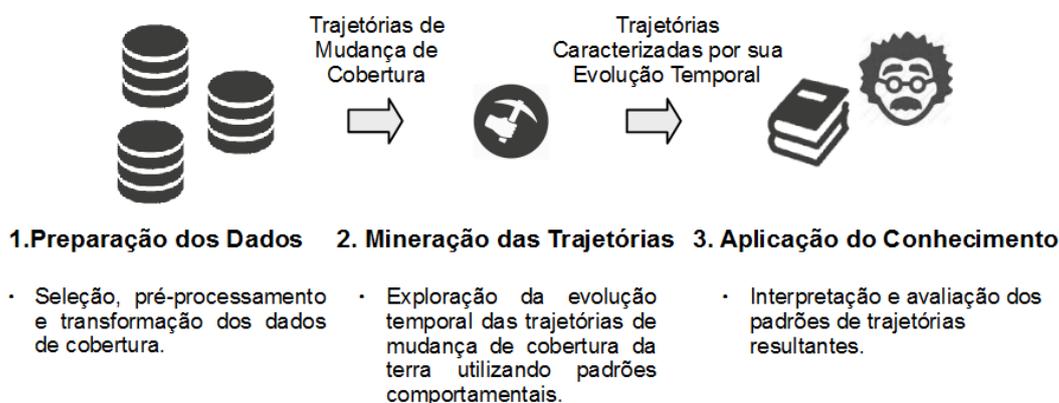
Tabela 3.1 - Trajetórias de mudança de cobertura e seus elementos de caracterização.

Trajetórias Resultantes	Elementos de Caracterização
Trajetórias de Convergência	Restrição de vizinhança V ; número mínimo de ocorrências n ; conjunto de estados de convergência E_c ; janela temporal j ; e intensidade i .
Trajetórias de Encontro	Restrição de vizinhança V ; número mínimo de ocorrências n ; conjunto de estados de encontro E_e ; e janela temporal j .
Trajetórias Anômalas	Restrição de vizinhança V ; número máximo de ocorrências q ; conjunto de transições anômalas A ; e janela temporal j .
Trajetórias Inconsistentes	Restrição de vizinhança V ; conjunto de transições inconsistentes I ; e janela temporal j .
Trajetórias de Rebanho	Restrição de vizinhança V ; número mínimo de ocorrências n ; sequência de transições de estado s ; e instante t .
Trajetórias de Liderança	Restrição de vizinhança V ; número mínimo de ocorrências n ; sequência de transições de estado s ; e janela temporal j .

3.3 Metodologia para a Mineração e Análise da Evolução Temporal das Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra Utilizando o BPML

A metodologia para a exploração da evolução temporal das trajetórias de mudança de cobertura da terra utilizando padrões comportamentais é composta por três etapas principais, adaptadas do Processo KDD (Figura 3.19).

Figura 3.19 - Metodologia para a mineração e análise da composição temporal das trajetórias de mudança de cobertura da terra utilizando o BPML.



O ponto de partida para a utilização da metodologia é uma base de dados de cobertura da terra já completamente classificada ao longo de toda a extensão temporal de estudo, independente dos algoritmos de detecção de mudança eventualmente utilizados. No caso específico deste trabalho, é utilizada uma base de dados de cobertura florestal.

3.3.1 Etapa 1: Preparação dos Dados

Inicialmente, os dados de cobertura já classificados são selecionados e pré-processados. São exemplos desse processamento a seleção unívoca das unidades básicas de análise que serão utilizadas na constituição das trajetórias de mudança; a verificação da singularidade e ordenamento cronológico das observações, de forma que as mesmas possuam um único estado associado pertencente ao domínio de estados do estudo; a estruturação dos dados de observação para atender necessidades específicas de armazenamento ou processamento; e eventual conversão de valores (ou alteração de tipo) das propriedades utiliza-

das para classificar as coberturas; e a identificação de dados complementares que auxiliarão futuramente na análise dos dados. O resultado desta etapa é um conjunto de trajetórias de mudança com todas as coberturas classificadas.

3.3.2 Etapa 2: Mineração das Trajetórias

Na Etapa de Mineração de Trajetórias, os padrões comportamentais são aplicados sobre o conjunto de dados pré-processados de trajetórias de mudança. Para tal, são definidos com a ajuda de um especialista no contexto de estudo os questionamentos que serão realizados sobre a base de dados, assim como os padrões comportamentais e seus respectivos elementos de caracterização mais indicados para respondê-los (Tabela 3.1).

3.3.3 Etapa 3: Aplicação do Conhecimento

Na Etapa de Aplicação do Conhecimento, os resultados obtidos com a utilização dos padrões são confrontados com os dados complementares conhecidos da região, de forma que sejam produzidos novos conhecimentos com o objetivo de auxiliar o estudo da dinâmica de mudança de cobertura da terra.

Considerando o volume de dados de trajetórias de mudança normalmente existente em grandes bases de cobertura florestal, é possível definir novas tipologias de trajetórias, ou agrupamentos iniciais, de modo a restringir o universo de utilização do *BPML* sobre eventuais trajetórias sem utilidade para a análise em questão. Desse modo, a fase de mineração de trajetórias pode ser otimizada, demandando menos recursos computacionais de processamento e armazenamento.

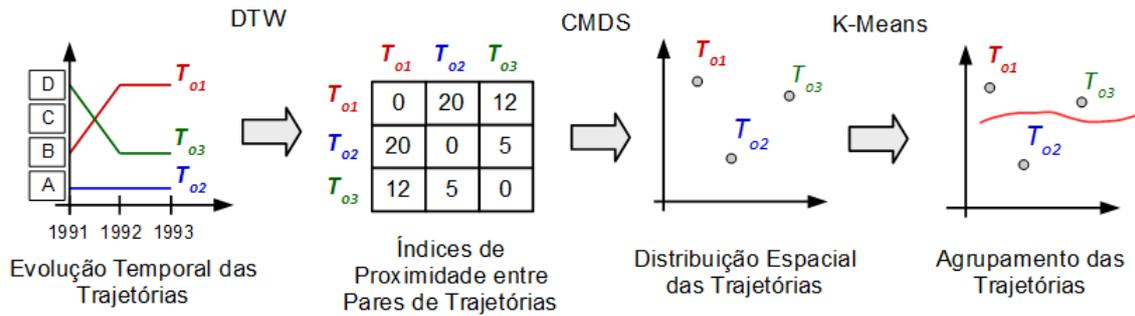
Na literatura sobre trajetórias de mudança de cobertura é comum rotular as trajetórias por semelhança de classificação de coberturas, ou seja, as trajetórias são agrupadas (tipificadas) em função de um domínio de classificações de coberturas existentes. No entanto, existem outras alternativas que oferecem novas possibilidades de análise.

3.4 GSTE: Metodologia de Agrupamento por Semelhança de Evolução Temporal

A presente metodologia é baseada na dinâmica de alteração das coberturas e consiste nas seguintes etapas: i) cálculo do índice de proximidade entre as trajetórias de mudança; ii) recuperação da distribuição espacial das trajetórias de

mudança; e iii) agrupamento das trajetórias de mudança semelhantes. Para tal, utiliza-se uma combinação de algoritmos já consagrados para agrupar as trajetórias que apresentem uma evolução temporal similar (Figura 3.20).

Figura 3.20 - Metodologia para agrupamento das trajetórias de mudança por semelhança de composição temporal das coberturas utilizando o GSTE.



3.4.1 Cálculo do Índice de Proximidade entre as Trajetórias de Mudança

Nesta etapa, as trajetórias são comparadas aos pares para que sejam calculados os índices de proximidade (custo mínimo para alinhar os pares de séries temporais correspondentes às sequências de classificações de cobertura das trajetórias) utilizado o algoritmo *DTW* (SAKOE; CHIBA, 1978). Procedimento que, repetido para todas as n trajetórias da base de dados, origina uma matriz simétrica de mesma ordem. Considerando que o *DTW* necessita de valores numéricos para sua utilização, pode ser necessário a definição de um conjunto de regras que permita converter uma eventual tipologia de cobertura categórica para uma tipologia numérica.

3.4.2 Recuperação da Distribuição Espacial das Trajetórias de Mudança

Considerando que a matriz de dissimilaridades de ordem n produzida na etapa anterior, corresponde aos índices de proximidade entre os pares de trajetórias, é preciso reduzir o número de variáveis de relacionamentos embutidos na matriz. Como consequência, é possível representar e interpretar melhor os resultados. No caso desta metodologia, é utilizado o CMDS (TORGERSON, 1952) e as variáveis resultantes representam as coordenadas do arranjo espacial dos ob-

jetos (trajetórias) em um sistema arbitrário, definido pelo próprio CMDS. Como consequência, as trajetórias são espacializadas utilizando uma métrica euclidiana em função da proximidade entre as mesmas. Uma medida de ajuste (p.ex. *Stress*) pode ser utilizada para avaliar a dimensão de representação na qual as distorções são minimizadas. No entanto, este nem sempre é o fator determinante para a escolha e sim a viabilidade de representação e interpretação.

3.4.3 Agrupamento das Trajetórias de Mudança Semelhantes

O propósito desta fase é agrupar as trajetórias espacializadas em função dos cálculos realizados pelos algoritmos *DTW* e *CMDS* considerando a semelhança entre as evoluções temporais das trajetórias. Outras propriedades também podem ser adicionadas às variáveis já existentes, o que pode demandar uma eventual normalização. Nesta metodologia é utilizado o algoritmo *K-Means Clustering* (MACQUEEN, 1967), a partir do qual são originados os k agrupamentos de trajetórias. Para a determinação do número ideal de agrupamentos, pode ser utilizado o *Método do Cotovelo* (THORNDIKE, 1953). Posteriormente, investiga-se as características das mesmas para criar uma tipologia que explique a constituição dos grupos em função de algumas de suas propriedades previamente definidas.

No próximo Capítulo 4, os conceitos e metodologias aqui apresentadas (BPML e GSTE) são aplicados a duas bases de dados de degradação florestal referentes às regiões do entorno dos municípios de Novo Progresso-PA e Sinop-MT, sendo possível verificar que os resultados obtidos agregam valor à discussão sobre a dinâmica da mudança de cobertura da terra.

4 PROVA DE CONCEITO: MINERAÇÃO E ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO TEMPORAL DAS TRAJETÓRIAS DE DEGRADAÇÃO FLORESTAL NOS MUNICÍPIOS DE NOVO PROGRESSO-PA E SINOP-MT

O presente capítulo traz uma prova de conceito com três estudos de caso, nos quais as teorias abordadas no Capítulo 2, em conjunto com a metodologia apresentada no Capítulo 3, são aplicadas a três bases de dados de cobertura no contexto da degradação florestal. Desse modo, busca-se explorar a evolução temporal das trajetórias de mudança de cobertura no referido contexto com a utilização de padrões comportamentais de trajetórias, assim como oferecer uma nova possibilidade de agrupamento em função da semelhança da evolução temporal das mesmas.

Nos experimentos apresentados neste capítulo, optou-se por implementar o BPML e GSTE na linguagem C++, utilizando a biblioteca geográfica TerraLib (CÂMARA et al., 2008). Tal escolha é justificada por se tratar de uma biblioteca computacional com o código-fonte aberto, concebida para servir como base para o desenvolvimento colaborativo na comunidade de usuários ou desenvolvedores de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (CASANOVA et al., 2005). Na sua versão 5.0.1, a TerraLib (<http://www.terralib.org>) possui um módulo espaço-temporal para trabalhar com dados dessa natureza, o que favorece o armazenamento e acesso aos mesmos. No referido modelo de dados, define um conceito genérico de “Observação” a partir do qual define e implementa os dados espaço-temporais de trajetórias (no contexto dos objetos móveis), de séries temporais e *coverage* (FERREIRA, 2012). Como consequência, houve a necessidade de adaptar a utilização das trajetórias de mudança de cobertura como séries temporais, variando a propriedade de cobertura ao longo do tempo.

4.1 As Bases de Dados de Trajetórias de Degradação Florestal

As bases de degradação florestal utilizadas neste estudo foram produzidas por Pinheiro (2015) utilizando indicativos de degradação florestal (extração de madeira e fogo florestal), técnicas de mineração de dados (QUINLAN, 1993) e métricas de paisagem (FROHN; HAO, 2006). Para tal, as mudanças de cobertura foram detectadas utilizando 28 imagens Landsat 5 (TM), obtidas anualmente entre os anos de 1984 e 2011. Posteriormente, um método semiautomático gerou um conjunto de polígonos de degradação florestal excluindo, a partir da máscara de desmatamento do Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES) (CÂMARA et al., 2006), as áreas desmatadas por corte

raso e as demais áreas que não apresentavam fisionomia florestal.

Com o propósito de mensurar de forma apropriada a variação da degradação florestal presente nos polígonos de desmatamento, particionou-se a região de estudo com o auxílio de uma grade regular utilizando o SIG TerraView (CÂMARA et al., 2008), na sua versão 4.1.0. Como resultado, foram originadas: i) 27.815 células com resolução espacial de 1x1km na região do entorno do município de Novo Progresso - PA (cena 227/65); e ii) 27.367 células de mesma resolução espacial na região do entorno do município de Sinop - MT (cena 226/68). Cabe ressaltar que a escolha da resolução considerou o tamanho médio dos polígonos de degradação.

Uma vez definido o espaço celular, os diferentes estágios de degradação observados foram associados a uma semântica e a um padrão espacial, assim como métricas da paisagem quantificaram as propriedades de forma e de arranjo dos polígonos de desmatamento no interior de cada uma das células. Posteriormente, o algoritmo de classificação C4.5 (QUINLAN, 1993) foi treinado e utilizado para classificar a base de dados em função de um índice (nível) de degradação numérico ao longo dos 28 anos de observação, de modo a facilitar a sua manipulação e análise (PINHEIRO, 2015) (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Tipologia de degradação da cobertura florestal.

Classe de Degradação Florestal	Nível de Degradação Florestal
Floresta	0
LFD: Baixa Intensidade de Degradação Florestal	0,1; 0,2; e 0,3
MFD: Moderada Intensidade de Degradação Florestal	0,4; 0,5; e 0,6
HFD: Alta Intensidade de Degradação florestal	0,7; 0,8; e 0,9
Corte raso	1

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2015).

Em função do domínio de estados possíveis para a classificação das coberturas, foi definida uma tipologia de trajetórias de mudança de cobertura que adotou como critério a semelhança entre os níveis de degradação presentes nas trajetórias (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Tipologia de trajetórias de degradação florestal.

Tipologia	Descrição	Domínio de Estados
Trajétória de Corte Raso	Conversão repentina da floresta em corte raso sem qualquer estágio de degradação anterior, no período de um ano ou menos.	0 e 1
Trajétória de Degradação com Corte Raso	Evento único ou múltiplos eventos de extração de madeira e/ou fogo florestal, seguido da conversão repentina da floresta em corte raso.	0; 0,1 a 0,9; e 1
Trajétórias de Degradação Persistente	Após eventos de exploração de madeira e/ou fogo florestal, a floresta não é convertida em corte raso	0; e 0,1 a 0,9
Trajétória de Floresta Persistente	A floresta permanece inalterada.	0
Desmatamento até 1984	A cobertura florestal foi completamente removida antes do ano de 1984.	1

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2015).

Para cada uma das trajetórias associadas às células resultantes da partição do espaço, foram armazenados os seguintes atributos:

- **id_obs**: número sequencial que identifica cada uma das observações associadas às células (trajetórias).

- **cell:** identificador singular da célula, atribuído no momento do particionamento da área de estudo pela grade celular. É composto pelas coordenadas da respectiva célula no interior da grade (p.ex. C10L34: coluna 10 e linha 34).
- **ttime:** instante de observação da cobertura, correspondendo ao momento de aquisição da imagem de satélite.
- **value:** estado da célula correspondente ao nível de degradação resultante do processo de classificação da cobertura (Tabela 4.1).
- **class:** classificação da trajetória em função do domínio de estados existentes em sua composição (Tabela 4.2).
- **spatial_data:** geometria da célula (polígono) associada à trajetória.

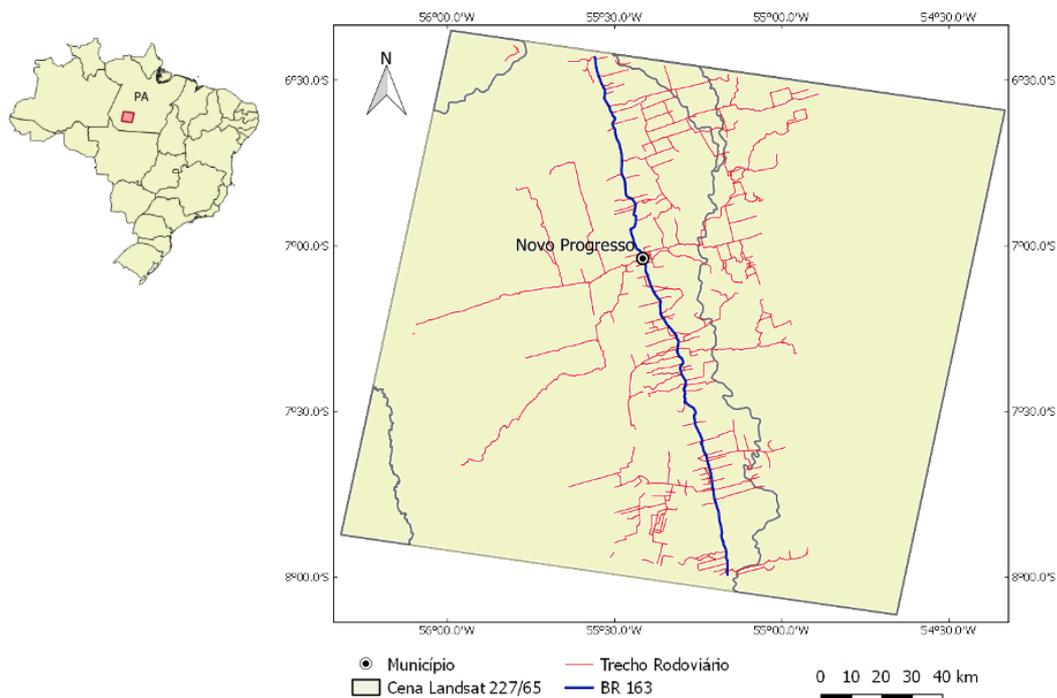
A seguir, são apresentados os estudos de caso conduzidos com o objetivo de explorar a evolução temporal de trajetórias de degradação florestal utilizando os Padrões Comportamentais de Convergência, Encontro, Detecção de Anomalias, Detecção de Inconsistências, Rebanho e Liderança. Para tal, foram escolhidas duas áreas de estudo localizadas no entorno dos municípios de Novo Progresso - PA e Sinop - MT, por essas representarem fronteiras de exploração madeireira em estágios distintos, mas com importantes consequências ambientais.

4.2 Estudo de Caso A: região do entorno do município de Novo Progresso - PA

4.2.1 Área de Estudo e Base de Dados

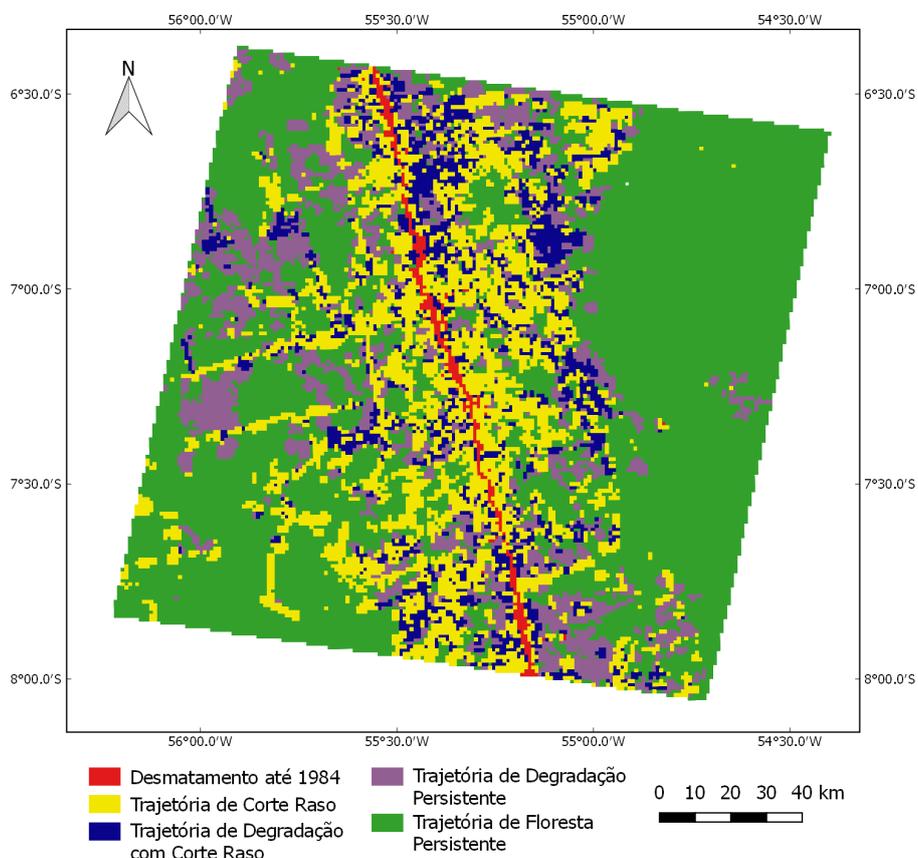
A presente área de estudo é delimitada pela cena 227/65 do satélite Landsat 5 (TM), possui 27.815 km^2 e corresponde à região do entorno do município de Novo Progresso (Figura 4.1). Localizado na porção sudoeste do estado do Pará (PA), às margens da BR-163, o município de Novo Progresso está inserido no Bioma Amazônia, abrange uma área de aproximadamente 38.162,123 km^2 e possuía a população estimada em 25.102 habitantes no ano de 2016 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016). Trata-se de uma fronteira de exploração madeireira ainda em desenvolvimento, realizada quase sempre de forma ilícita e sem manejo, iniciando processos de degradação da cobertura florestal com consequências diretas para o ecossistema local (PINHEIRO, 2015).

Figura 4.1 - Área de estudo A: região do entorno do município de Novo Progresso - PA.



A partição da área de estudo, por uma grade regular com resolução espacial de 1x1km, originou um conjunto de 27.815 células (trajetórias) e 778.820 observações, considerando toda a extensão temporal dos dados (28 anos). O resultado final no ano de 2011, dados os critérios de agrupamento utilizados na Tabela 4.2, apresentou 16.079 (57,8%) trajetórias de floresta persistente; 5.211 (18,7%) trajetórias de corte raso; 3.775 (13,6%) trajetórias de degradação persistente; 2.381 (8,6%) trajetórias de degradação com corte raso; e 369 (1,3%) trajetórias com desmatamento anterior ao ano de 1984 (Figura 4.2). Descartadas as áreas desmatadas antes do ano de 1984, verificou-se que, no intervalo da base de dados (1984 a 2011), houve a remoção completa da cobertura em 7.592 km^2 (27,6%). As trajetórias que apresentaram algum tipo de degradação em sua constituição, por sua vez, corresponderam a 6.156 km^2 (22,4%).

Figura 4.2 - Estudo de caso A: classificação das trajetórias no ano de 2011, conforme a tipologia de degradação proposta por Pinheiro (2015).



4.2.2 Preparação dos Dados

A base de dados de trajetórias foi armazenada utilizando o Gerenciador de Banco de Dados PostgreSQL, na sua versão 9.1.14, juntamente com a extensão espacial PostGIS, na sua versão 1.5.5. Posteriormente, tal base foi validada quanto à singularidade das unidades de análise, ao ordenamento cronológico das observações e ao domínio de estados das classificações. Houve ainda a necessidade de conversão dos dados originais para a estrutura de armazenamento do módulo espaço-temporal da biblioteca Terralib. Desse modo, cada uma das 27.815 células deu origem a 28 registros no banco de dados, totalizando 778.820 observações. Não houve a necessidade de conversão de tipo ou de valores nos atributos armazenados, uma vez que as coberturas foram classificadas conforme os níveis de degradação identificados na Tabela 4.1. Foram ainda utilizados dados

históricos sobre a região e o auxílio de um especialista no contexto de estudo.

4.2.3 Mineração de Trajetórias e Aplicação do Conhecimento

Para atingir os objetivos dos experimentos a seguir, os Padrões Comportamentais de Convergência, Encontro, Detecção de Anomalias, Detecção de Inconsistências, Rebanho e Liderança, foram definidos e aplicados, juntamente com os seus respectivos elementos de caracterização, à uma base de dados de degradação florestal. Com o propósito de evitar processamento desnecessário de dados conhecidamente fora do contexto de estudo, foram desconsideradas as trajetórias de desflorestamento anteriores ao ano de 1984.

4.2.3.1 Experimento A.1: trajetórias convergentes para corte raso

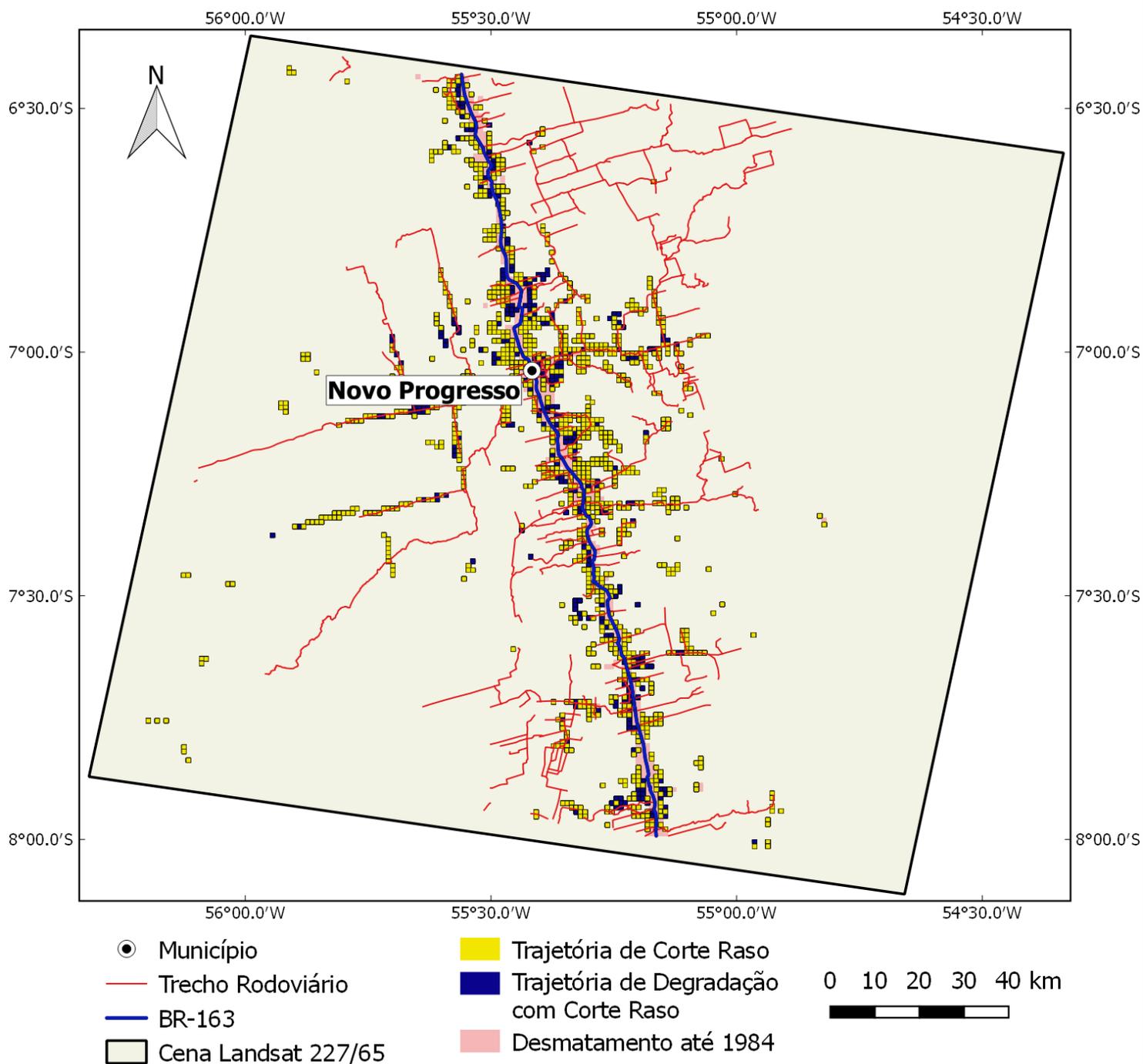
Em função dos diferentes contextos existentes na região de estudo ao longo do tempo, o presente experimento foi dividido em três intervalos de pesquisa: 1984 a 1997, 1998 a 2004 e 2005 a 2011.

4.2.3.1.1 A.1.1: Período de 1984 a 1997

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Onde estão localizadas as áreas de floresta nas quais houve a conversão da cobertura para corte raso no período compreendido entre os anos de 1984 e 1997?* Tal período foi escolhido por refletir as consequências da presença humana na região iniciada na década de 70, mas somente observada de forma sistemática a partir da década de 80. A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 227/65 (Figura 4.3) e a determinação da intensidade da convergência não foi objeto deste experimento.

Como resultado, foi possível identificar a convergência de 1.401 trajetórias no intervalo de pesquisa (1984 a 1997), dentre as quais, 1.120 (79,9%) trajetórias de corte raso e 281 (20,1%) trajetórias de degradação com corte raso. Desse modo, verificou-se que a maior parte das trajetórias correspondeu à conversão repentina da floresta em corte raso sem qualquer evento de degradação anterior na trajetória. Tais trajetórias foram identificadas às margens dos trechos rodoviários, principalmente ao longo da BR-163, apresentando uma dinâmica compatível com uma fronteira de exploração ainda em desenvolvimento (PINHEIRO, 2015). Nesse caso, é extraída uma pequena variedade de espécies por colonos e garimpeiros (em função do alto custo de transporte), uma vez que a indústria madeireira ainda está se estabelecendo na região de estudo (OVAREC, 1998).

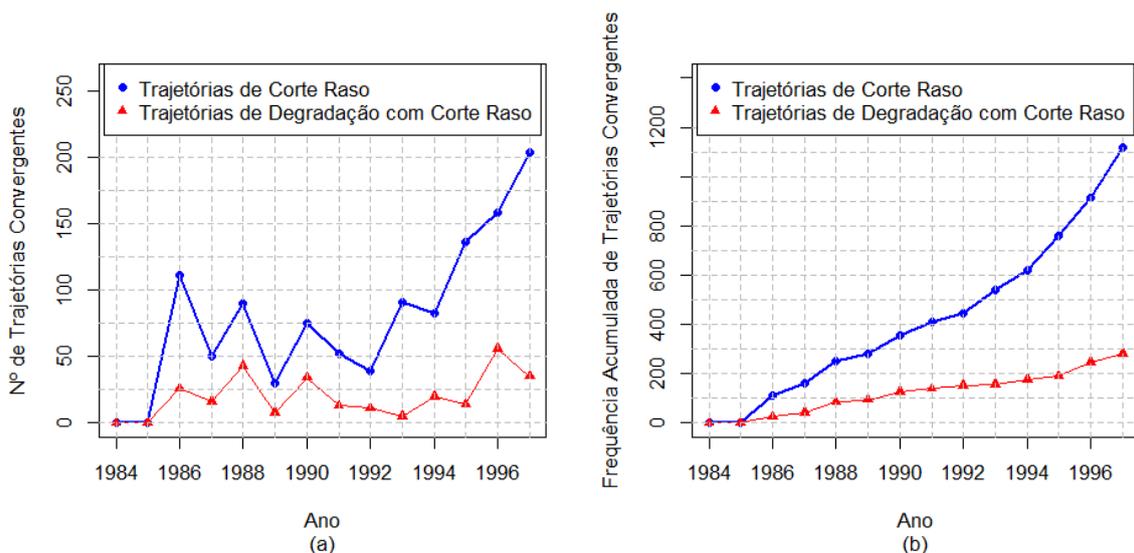
Figura 4.3 - Experimento A.1.1: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 1997).



Analisando os quantitativos de trajetórias e os respectivos instantes de conver-

gência no interior do intervalo de estudo (1984 a 1997), observou-se uma oscilação em ambos os grupos de trajetórias até o ano de 1994, a partir do qual houve um aumento da frequência anual das trajetórias de degradação com corte raso (Figura 4.4a). Ainda no período considerado, houve um aumento de 909% na presença de trajetórias de corte raso e de 980% nas trajetórias de degradação com corte raso (Figura 4.4b). Cabe ressaltar que não foram identificadas trajetórias convergentes no ano de 1984, pela impossibilidade de determinação do instante de uma eventual convergência anterior ao início da série de dados. No entanto, a base de dados permitiu verificar se foi mantido, no ano subsequente ao instante final do intervalo de busca (1998), o estado de convergência identificado no ano de 1997.

Figura 4.4 - Experimento A.1.1 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 1997).



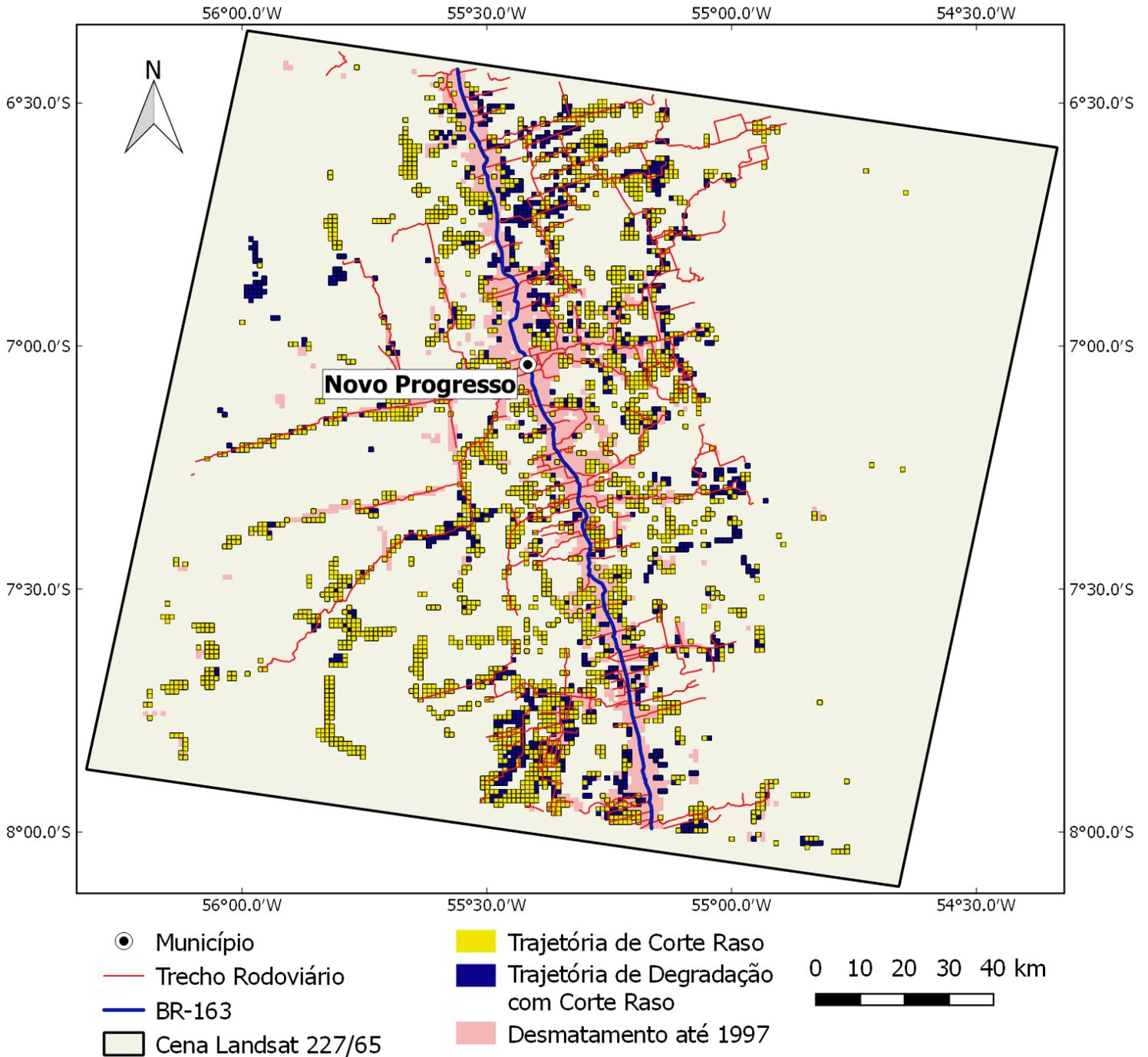
(a) Quantitativo anual e (b) Frequência acumulada.

4.2.3.1.2 A.1.2: Período de 1998 a 2004

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Onde estão localizadas as áreas de floresta nas quais houve a conversão da cobertura para corte raso, no período compreendido entre os anos de 1998 e 2004?* Tal período foi escolhido por coincidir com a perspectiva de asfaltamento da BR-163 criada na região e com o Programa Avança Brasil, cujo objetivo era ampliar a infraestrutura na região. A restrição de vizinhança considerada foi a

área delimitada pela cena Landsat 227/65 (Figura 4.5) e a determinação da intensidade da convergência não foi objeto deste experimento.

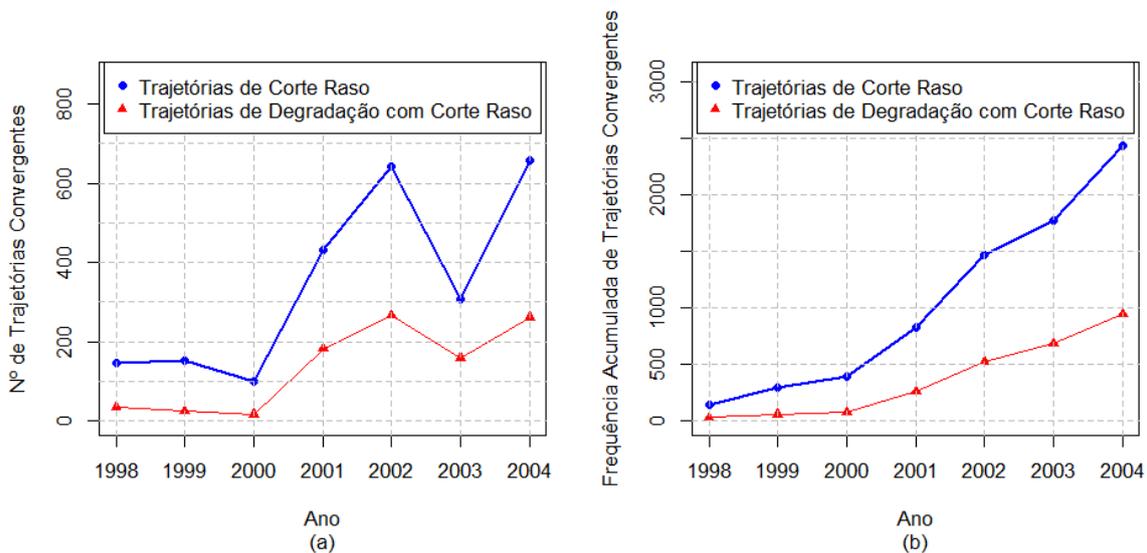
Figura 4.5 - Experimento A.1.2: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (1998 a 2004).



Os resultados obtidos permitiram identificar a convergência de 3.378 trajetórias no intervalo de pesquisa (1998 a 2004), dentre as quais, 2.432 (72%) trajetórias de corte raso e 946 (28%) trajetórias de degradação com corte raso. A maior parte das trajetórias correspondeu à conversão repentina da floresta em corte raso sem que houvesse qualquer evento de degradação anterior na trajetória. Tais trajetórias foram localizadas em regiões um pouco mais interiorizadas em relação aos trechos rodoviários existentes. Comparando com o período anterior, houve um acréscimo de 117% nas trajetórias de corte raso e 236% nas trajetórias de degradação com corte raso. Fato que pode ser justificado pelo início de um novo ciclo de migração e pelo estabelecimento de várias madeireiras na região.

Analisando os quantitativos de trajetórias e os respectivos instantes de convergência no interior do intervalo de estudo (1998 a 2004), observou-se um aumento acentuado na ocorrência de trajetórias de ambos os grupos nos anos de 2002 e 2004 (Figura 4.6a). Houve, ainda, um aumento de 1.569% na presença de trajetórias de corte raso e de 2.602% nas trajetórias de degradação com corte raso (Figura 4.6b).

Figura 4.6 - Experimento A.1.2 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (1998 a 2004).



(a) Quantitativo anual e (b) Frequência acumulada.

No referido período, influenciada pelo projeto de pavimentação da BR-163, ocor-

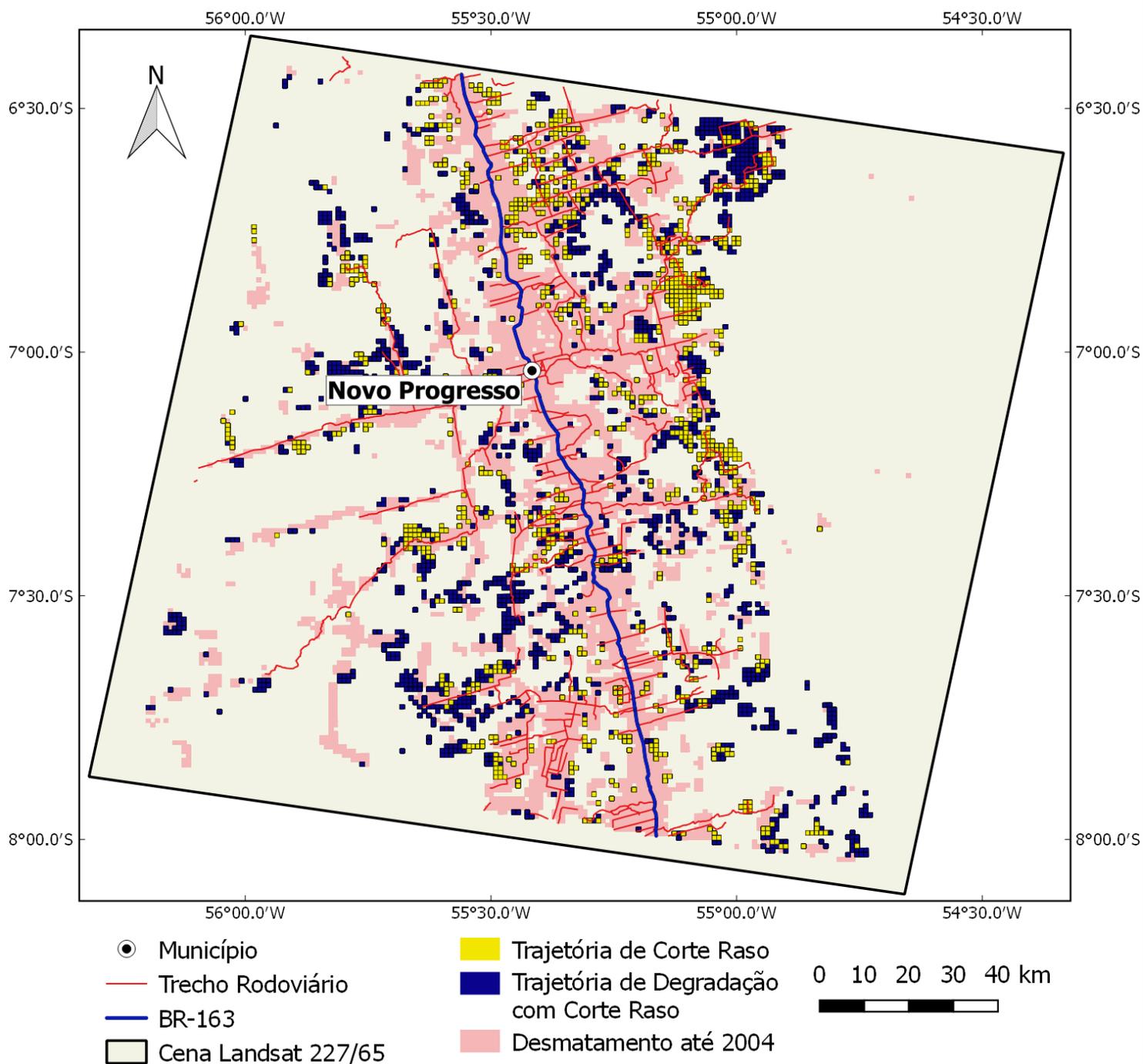
reu uma intensificação do movimento migratório e o estabelecimento de um número elevado de madeireiras na região. Foi ainda possível verificar se a convergência iniciou em 1998, analisando o ano de 1997; e se foi mantida no ano subsequente ao instante final (2004), analisando o ano de 2005.

4.2.3.1.3 A.1.3: Período de 2005 a 2011

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Onde estão localizadas as áreas de floresta nas quais houve a conversão da cobertura para corte raso, no período compreendido entre os anos de 2005 e 2011?* Tal período foi escolhido pela intensificação dos mecanismos governamentais de controle sobre a região. A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 227/65 (Figura 4.7) e a determinação da intensidade da convergência não foi objeto deste experimento.

Como resultado, foi possível identificar a convergência de 2.658 trajetórias no intervalo de pesquisa (2005 a 2011), dentre as quais, 1.571 (59%) trajetórias de corte raso e 1.087 (41%) trajetórias de degradação com corte raso. Desse modo, verificou-se que a maior parte das trajetórias correspondeu à conversão repentina da floresta em corte raso sem que houvesse qualquer evento de degradação anterior na trajetória. Tais trajetórias foram localizadas cada vez mais afastadas dos trechos rodoviários e distribuídas na região de estudo. Comparando com o período anterior, houve uma redução de 35% nas trajetórias de corte raso e um acréscimo de 15% nas trajetórias de degradação com corte raso. A “melhora” observada nos resultados pode ser justificada pelo aumento de políticas governamentais de proteção, como a criação do Plano de Proteção e Controle do Desmatamento da Amazônia (PPCDAM) (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2004), que buscou reduzir de forma contínua o desmatamento na região, criando condições para o estabelecimento de um modelo de desenvolvimento sustentável.

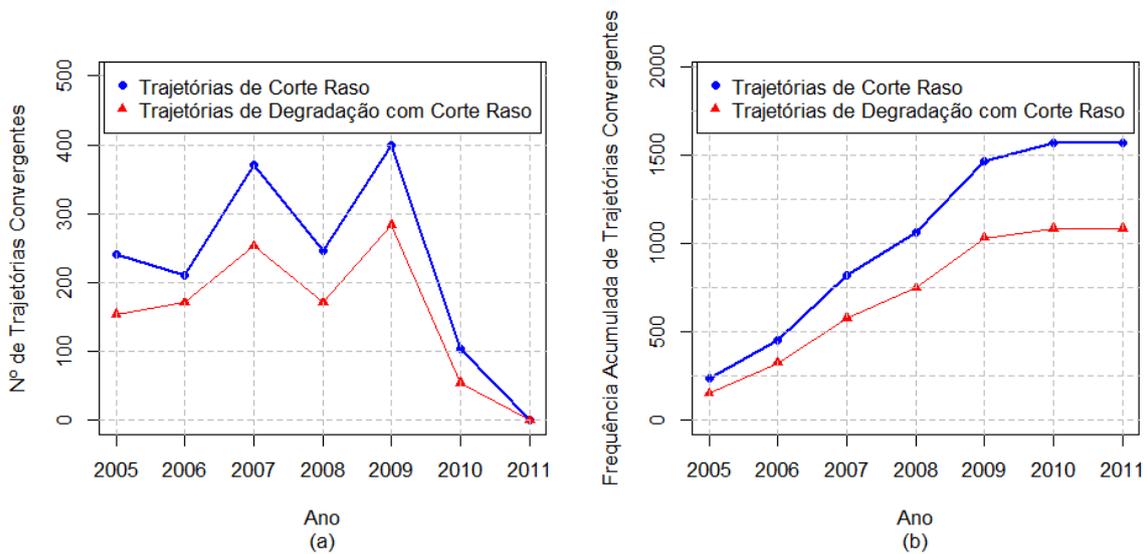
Figura 4.7 - Experimento A.1.3: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011)



Analisando os quantitativos de trajetórias e os respectivos instantes de conver-

gência no interior do intervalo de estudo (2005 a 2011), observou-se uma diminuição na presença de ambos os grupos de trajetórias a partir do ano de 2009 (Figura 4.8a). No período considerado, houve ainda um aumento de 551% no número de ocorrências das trajetórias de corte raso e de 605% nas trajetórias de degradação com corte raso (Figura 4.8b). Tal fato pode ser explicado pelas políticas governamentais de proteção já mencionadas. Cabe ressaltar que a base de dados permitiu verificar se a convergência foi iniciada em 2005, analisando o ano de 2004, mas não possibilitou identificar se uma eventual convergência em 2011 foi mantida.

Figura 4.8 - Experimento A.1.3 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).

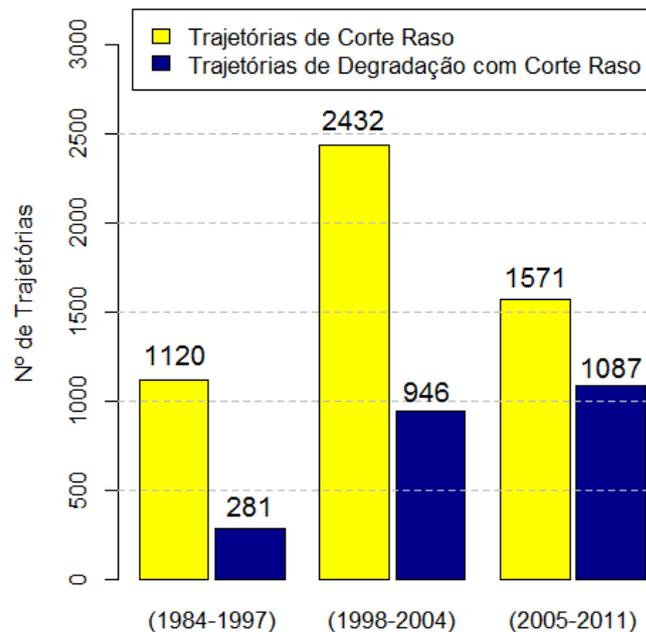


(a) Quantitativo anual e (b) Frequência acumulada.

Considerando todo o Experimento A.1, observou-se que as trajetórias de degradação com corte raso, ou seja, as trajetórias com eventos de extração de madeira e/ou fogo florestal seguidos da conversão da floresta em corte raso, aumentaram 236% entre 1997 e 2004 e 15% entre 2005 e 2011. Enquanto isso, as trajetórias de corte raso, nas quais houve conversão repentina da floresta em corte raso sem qualquer estágio de degradação anterior, aumentaram 117% entre 1997 e 2004, reduzindo 35% entre 2005 e 2011 (Figura 4.9). Fato que reflete, nos períodos iniciais, o aumento da presença humana e das atividades de exploração predatória da madeira, seguidos do aumento de políticas públicas no período

subsequente.

Figura 4.9 - Experimento A.1: quantitativo de trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 2011).

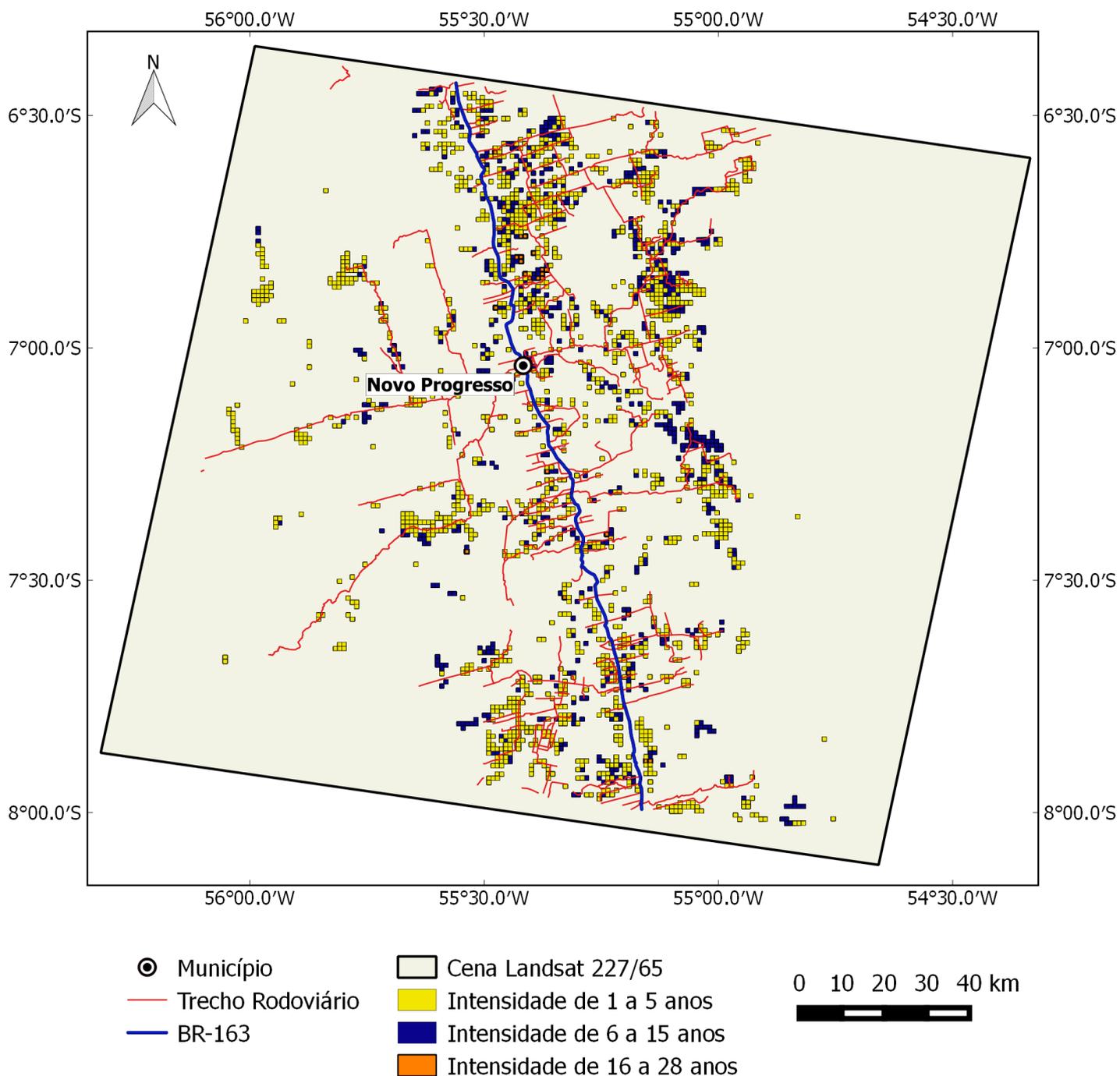


Existe ainda a possibilidade de utilização do Padrão de Convergência para identificar a intensidade da convergência. No caso deste experimento, a rapidez com a qual a cobertura florestal foi totalmente removida, em um intervalo de tempo definido, a partir do primeiro estado de degradação identificado na trajetória.

4.2.3.2 Experimento A.2: intensidade das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 2011)

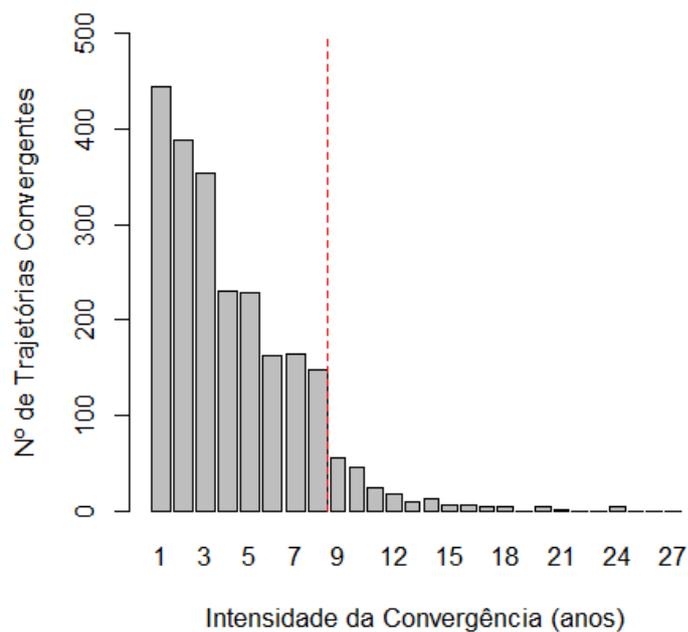
Considerando que essa é uma fronteira de ocupação ativa, onde as dinâmicas de conversão da floresta são mais aceleradas, procurou-se responder ao seguinte questionamento: *Qual a velocidade do processo de conversão de áreas previamente degradadas para corte raso, no período de 1984 a 2011, desde que foram detectadas pela primeira vez?* Para tal, foi considerado o intervalo entre o primeiro estado de degradação e o primeiro estado de corte raso, assim como as seguintes intensidades de convergência definidas por um especialista: 1 a 5 anos, 6 a 15 anos e 16 a 28 anos. A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 227/65 (Figura 4.10).

Figura 4.10 - Experimento A.2: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso por intensidade (1984 a 2011).



Como resultado, foi possível identificar a convergência em 2.314 trajetórias nas condições definidas para o experimento, dentre as quais, 1.645 (71,1%) com intensidade entre 1 e 5 anos, 644 (27,8%) entre 6 e 15 anos e 25 (1,1%) entre 16 e 28 anos. Observou-se, ainda, que 91% das trajetórias de degradação com corte raso convergiram para corte raso em até 8 anos, uma vez identificado o primeiro estado de degradação. A distribuição das trajetórias por intensidade de convergência já era esperado e corrobora com os resultados obtidos por Pinheiro (2015) (Figura 4.11). Cabe ressaltar que não foi possível identificar a convergência das trajetórias nos anos de 1984 e 2011, pelos motivos já descritos anteriormente.

Figura 4.11 - Experimento A.2: intensidade de convergência para corte raso (1984 a 2011).



4.2.3.3 Experimento A.3: trajetórias de encontro de degradação

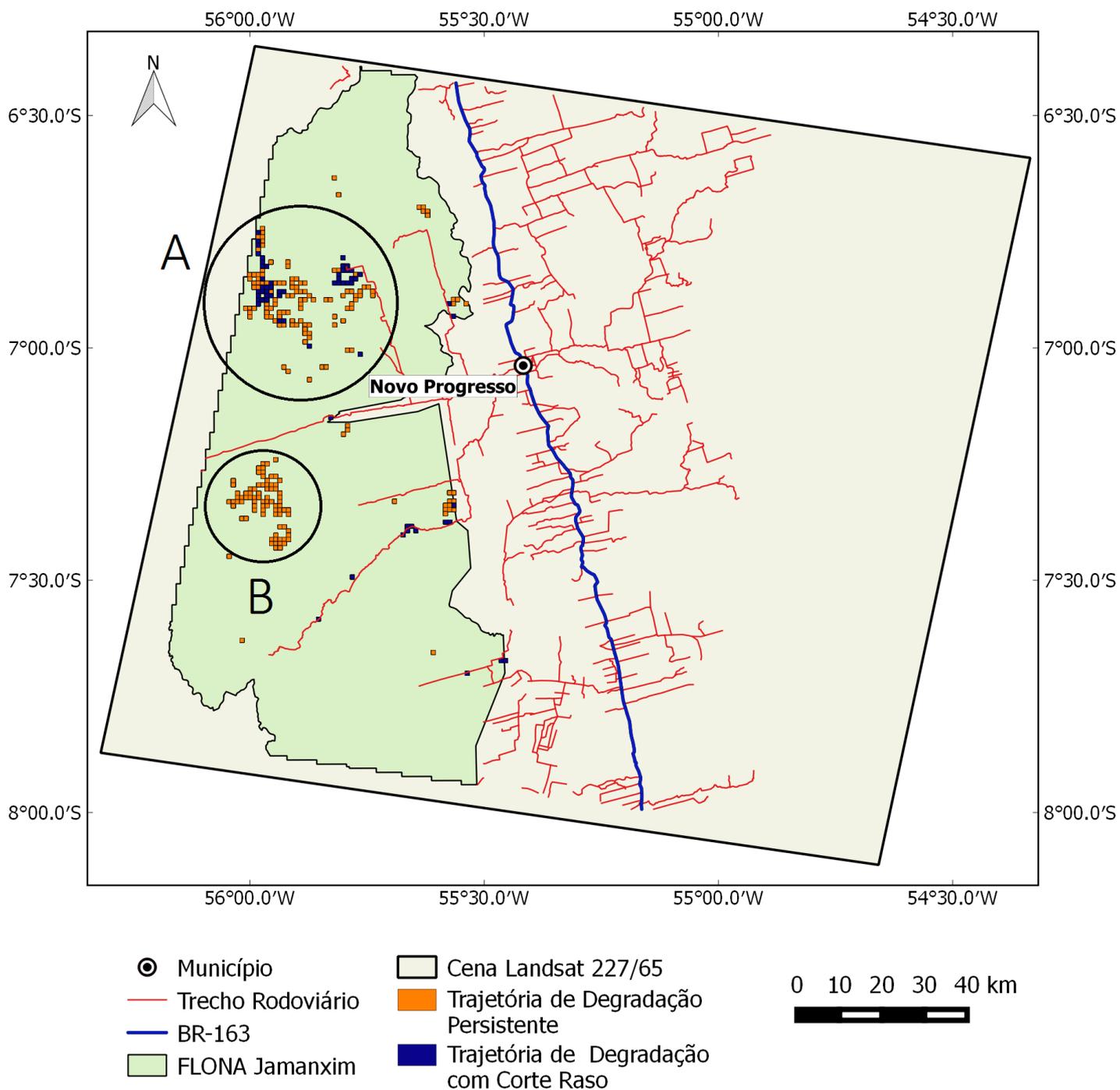
Em função dos diferentes contextos existentes na região de estudo, o presente experimento foi dividido em dois intervalos de pesquisa: 2000 a 2005 e 2006 a 2011.

4.2.3.3.1 A.3.1: Período de 2000 a 2005

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Havia, dentro do limite da Floresta Nacional de Jamanxim (FLONA Jamanxim), trajetórias de degradação florestal em estágios intermediários ou avançados de degradação (0,4 a 0,9) no período anterior ao ano de sua criação (2000 a 2005)?* Em outras palavras, procura-se verificar se no período anterior ao da criação da FLONA já haviam processos ilícitos de exploração madeireira, possibilitando trazer subsídios para a discussão sobre a eficácia de políticas públicas relacionadas com a conservação. Para tal, foi considerada uma restrição de vizinhança delimitada pela área da referida FLONA (Figura 4.12).

Como resultado, foram identificadas 275 trajetórias de encontro com degradação intermediária ou avançada, dentre as quais, 62 trajetórias de degradação com corte raso (22%) e 213 trajetórias de degradação persistente (78%). É possível ainda observar dois grandes grupos de trajetórias localizados na porção centro-oeste da FLONA. O agrupamento mais ao sul (Grupo B) formado somente por trajetórias de degradação persistente e um agrupamento mais ao norte (Grupo A), que pode estar associado ao garimpo de ouro ou às áreas do Projeto de Desenvolvimento Sustentável do Vale do Jamanxim (assentamento humano).

Figura 4.12 - Experimento A.3.1: distribuição espacial das trajetórias de encontro (2000 a 2005).



Nas referidas trajetórias, foram encontrados ao todo 360 estados de degradação, principalmente entre os anos de 2001 e 2002 (Tabela 4.3). Fato que indica que algumas trajetórias possuem mais de um estado de degradação em sua constituição.

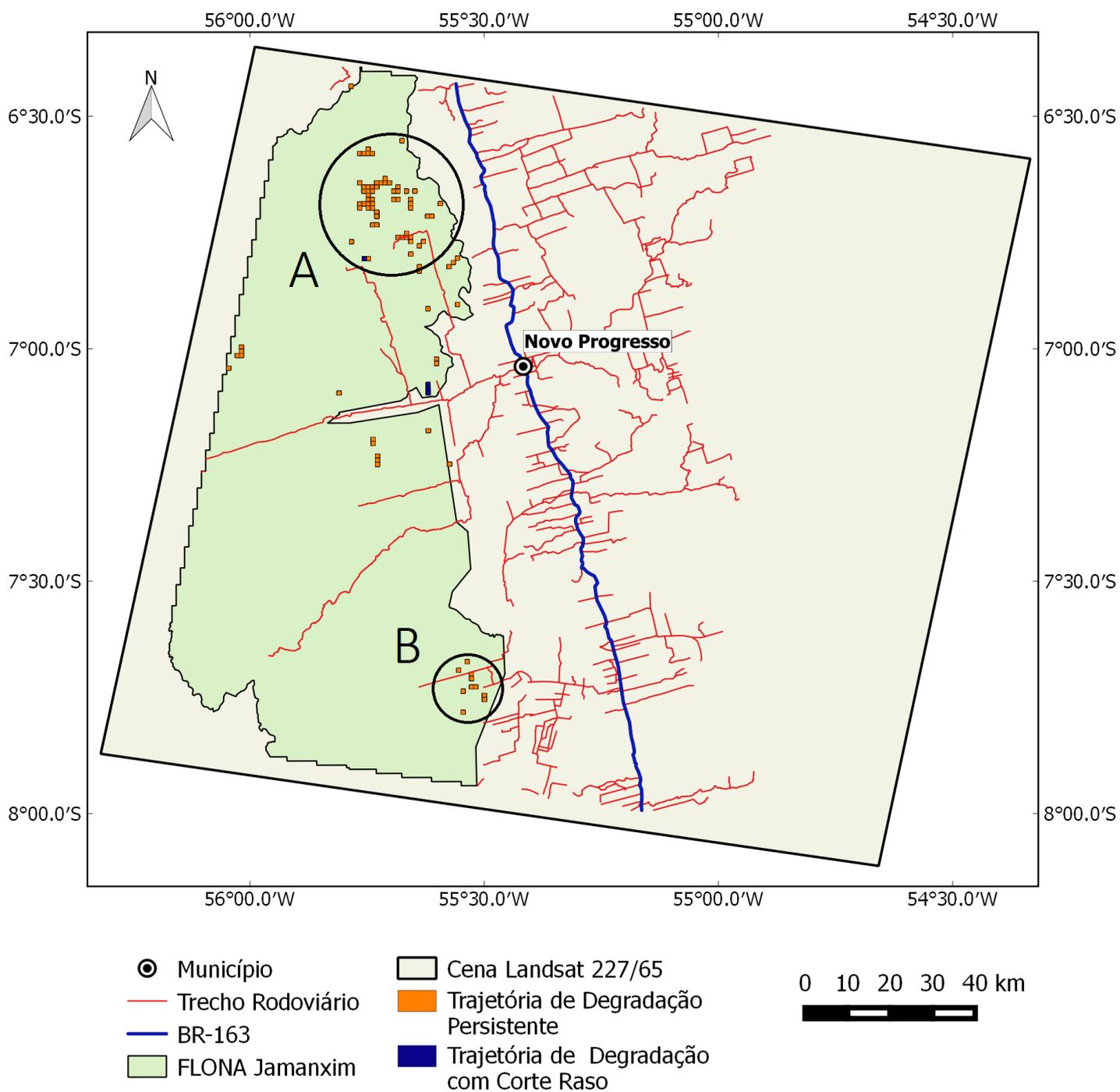
Tabela 4.3 - Estados de encontro identificados (2000 a 2005).

Ano	Trajetoórias de Degradação com Corte Raso	Trajetoórias de Degradação Persistente
2000	0	0
2001	53	146
2002	56	72
2003	3	4
2004	6	19
2005	0	1
Total	118	242

4.2.3.3.2 A.3.2: Período de 2006 a 2011

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Havia, dentro do limite da FLONA Jamaxim, trajetórias de degradação florestal em estágios intermediários a avançados de degradação (0,4 a 0,9), no período posterior ao ano de sua criação (2006 a 2011)?* Desse modo, busca-se verificar a eficácia da política de criação da FLONA, na qual a exploração madeireira é permitida, mas de forma sustentável. Foi considerada, para tal, uma restrição de vizinhança delimitada pela área da referida FLONA (Figura 4.13).

Figura 4.13 - Experimento A.3.2: distribuição espacial das trajetórias de encontro (2006 a 2011).



Foram identificadas 94 trajetórias de encontro com degradações intermediária e avançada, dentre as quais, 4 trajetórias de degradação com corte raso (4%) e 90 trajetórias de degradação persistente (96%). Nas trajetórias supracitadas, foram encontrados 96 estados de degradação (Tabela 4.4), principalmente nos anos de 2007, 2008 e 2011. Desse modo, verifica-se que o número de ocorrências foi reduzido em 73%.

Tabela 4.4 - Estados de encontro identificados (2006 a 2011).

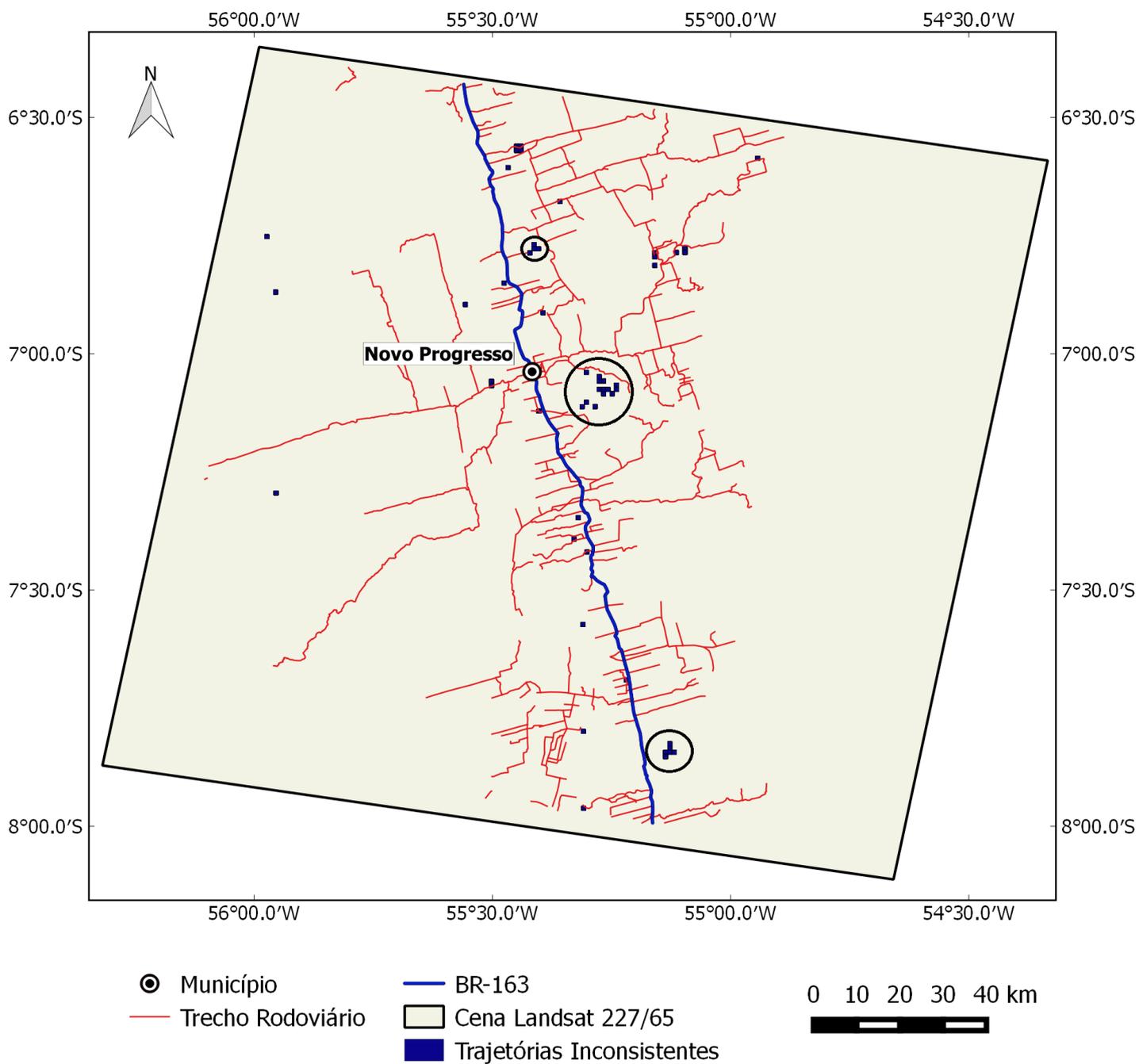
Ano	Trajetórias de Degradação com Corte Raso	Trajetórias de Degradação Persistente
2006	1	1
2007	3	18
2008	0	48
2009	0	4
2010	0	0
2011	0	21
Total	4	92

Na Figura 4.13, foram observados dois grupos de trajetórias localizados nas porções norte (A) e sul (B) da FLONA, formados basicamente por trajetórias de degradação persistente com corte raso. Comparando os resultados do Experimento A.3, houve uma redução de 62% nas trajetórias com eventos de degradação seguidos da conversão de floresta em corte raso e uma redução de 96% nas trajetórias sem conversão da floresta em corte raso após eventos de degradação. Desse modo, é possível que a criação da referida Unidade de Conservação (UC) tenha cumprido o seu papel, reduzindo a degradação na área de floresta.

4.2.3.4 Experimento A.4: trajetórias inconsistentes (1984 a 2011)

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Existem trajetórias na base de dados que apresentam recuperação anual de um estágio de degradação avançado para floresta ou para um estágio baixo de degradação, no período de 1984 a 2011?* Acredita-se que uma floresta com degradação avançada não poderia se recuperar no intervalo de 1 ano, voltando ao seu estado original ou a um estado de baixa degradação. Eventuais trajetórias encontradas podem indicar possíveis problemas ocorridos no processo de classificação das respectivas coberturas. Para tal, foi considerada a restrição de vizinhança delimitada pela área da cena Landsat 227/65 (Figura 4.14).

Figura 4.14 - Experimento A.4: distribuição espacial das trajetórias inconsistentes (1984 a 2011).



Foram identificadas 53 trajetórias inconsistentes (Tabela 4.5). Um valor pouco significativo (0,2%) se comparado com o total de trajetórias presentes na base de dados. Verificou-se, ainda, que 56% das trajetórias inconsistentes foram iniciadas no ano de 2001, o que pode estar relacionado com algum problema ocorrido na construção da base de dados. No caso deste trabalho, existe ainda a possibilidade de que tais inconsistências estejam associadas às áreas de não-floresta. Nesse caso, afloramentos rochosos comuns na região que se tornam mais ou menos visíveis dependendo do ano/cena. A máscara do PRODES de não-floresta utilizada para a região não exclui todas as áreas existentes e esses alvos aparecem com padrão espectral semelhante ao de solo exposto.

Tabela 4.5 - Transições inconsistentes identificadas (1984 a 2011).

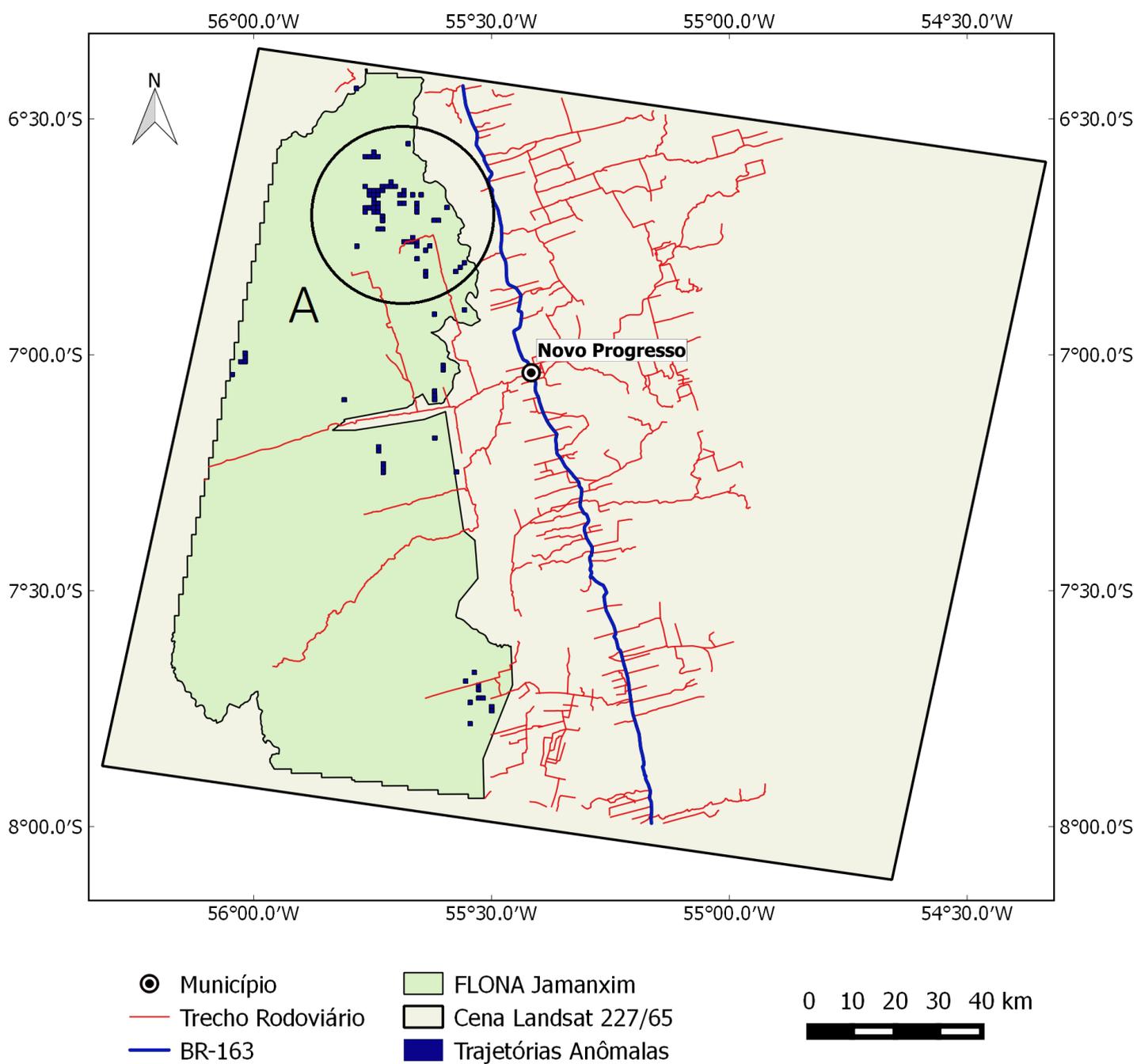
Ano Inicial	Nº de Transições Inconsistentes
1984	3
1985	5
1998	2
1999	6
2001	30
2002	1
2003	1
2009	5
Total	53

Quanto a localização, foi possível identificar pequenos agrupamentos de trajetórias inconsistentes distribuídos na área de estudo (Figura 4.14), que podem estar associados aos motivos já mencionados anteriormente. Nesse caso, o processo de classificação pode ser refeito ou as trajetórias isoladas, para que não comprometam outras análises.

4.2.3.5 Experimento A.5: trajetórias anômalas (2006-2011)

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Existem trajetórias que apresentam avanço de degradação no interior da FLONA Jamaxim, no período posterior a sua criação (2006 a 2011)?* Eventuais trajetórias seriam raras. Para tal, foi considerada a restrição de vizinhança delimitada pela área da referida FLONA (Figura 4.15).

Figura 4.15 - Experimento A.5: distribuição espacial das trajetórias anômalas no interior da FLONA Jamanxim (2006 a 2011).



Foram identificadas 92 trajetórias anômalas com 93 transições de estado não esperadas no interior da FLONA (Tabela 4.6), representativas do avanço da degradação na região de estudo.

Tabela 4.6 - Transições anômalas identificadas (2006 a 2011).

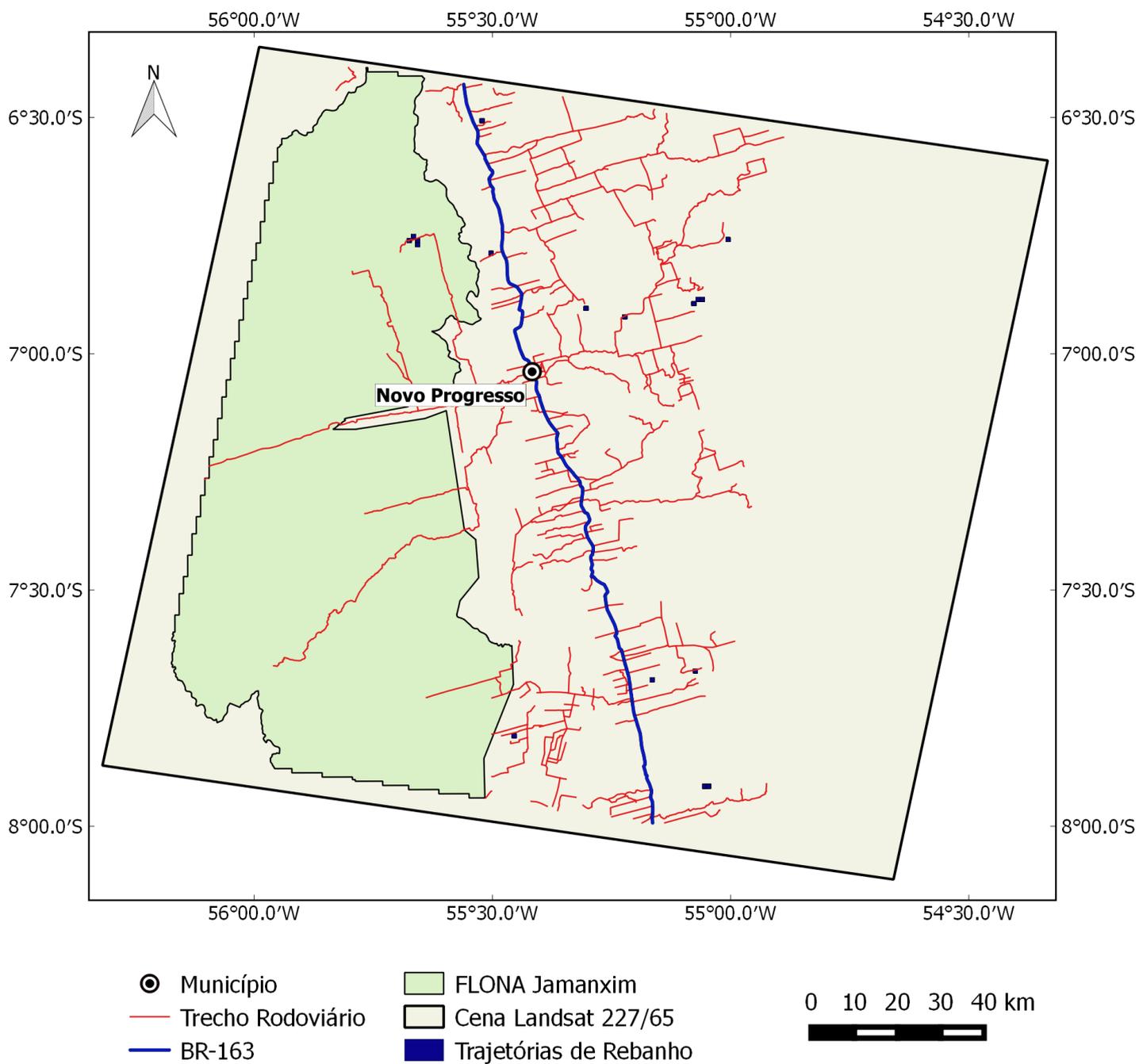
Ano Inicial	Nº de Transições Anômalas
2006	21
2007	47
2008	4
2009	0
2010	21
2011	0
Total	93

Foi possível identificar que 73% das transições anômalas tiveram seu início nos dois anos subsequentes à criação da FLONA, provavelmente como continuidade de processos existentes anteriores ao ano de 2006. No ano de 2010 (4 anos depois), foram ainda observadas 21 transições por motivos desconhecidos.

4.2.3.6 Experimento A.6: trajetórias de rebanho (2003, 2006 e 2009)

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Existem regiões com aumento de degradação anual para estágios moderados (MFD) e avançados (HFD), iniciado nos anos de 2003, 2006 ou 2009?* Tal fato indicaria a presença de trajetórias de degradação ilícitas em períodos próximos à criação da FLONA Jamanxim em 2006. A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 227/65 (Figura 4.16).

Figura 4.16 - Experimento A.6: distribuição espacial das trajetórias de rebanho iniciadas em 2003, 2006 e 2009.



Foram identificadas 17 trajetórias de rebanho, sendo 16 referentes à sequência floresta → LFD → MFD, iniciadas no ano de 2006; e apenas 1 da sequência floresta → MFD → HFD, iniciada em 2003 (Tabela 4.7). Os resultados permitiram verificar que 100% das trajetórias identificadas atingiram estágios moderados de degradação iniciados no ano de 2006, não chegando a estágios avançados.

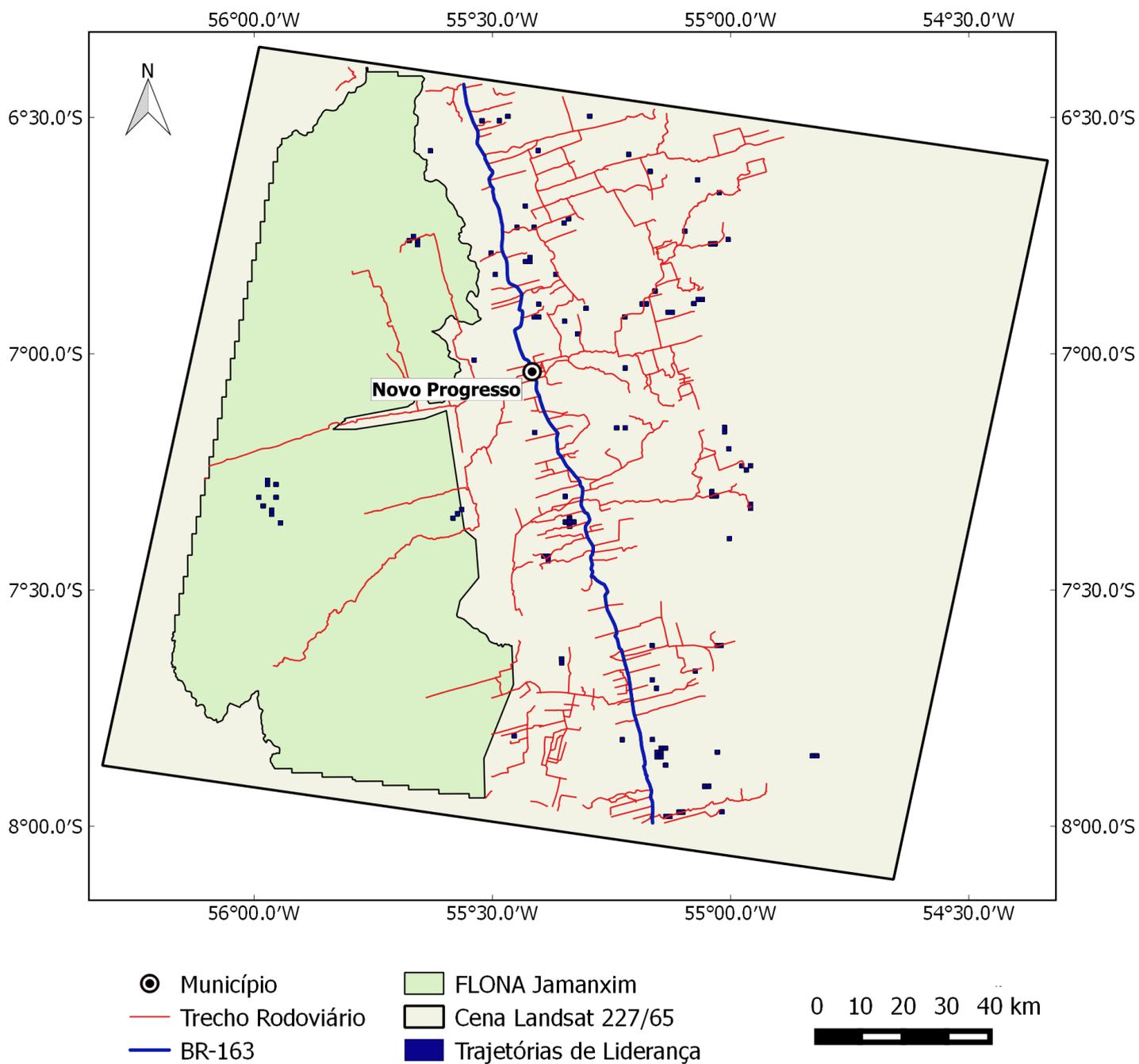
Tabela 4.7 - Trajetórias de rebanho identificadas (2003, 2006 e 2009).

Ano Inicial	floresta → LFD → MFD	floresta → MFD → HFD
2003	1	0
2006	16	0
2009	0	0
Total	17	0

4.2.3.7 Experimento A.7: trajetórias de liderança (1984-2011)

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Onde e quando ocorreu aumento de degradação anual para estágios moderados (MFD) e avançados de degradação (HFD), no período de 1984 a 2011?* Tais trajetórias sugerem trajetórias de degradação ilícitas, que chegaram a estágios moderados e avançados no período correspondente à extensão temporal dos dados (1984 a 2011). A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 227/65 (Figura 4.17).

Figura 4.17 - Experimento A.7: distribuição espacial das trajetórias de liderança (1984 a 2011).



Foram identificadas 95 trajetórias de liderança, sendo 94 referentes à sequência floresta → LFD → MFD, o que pode estar relacionado à exploração e comercialização da madeira; e apenas 1 associada à sequência floresta → MFD → HFD (Tabela 4.8). As trajetórias são curtas e a conversão é rápida, não atingindo estágios avançados porque, apesar da madeira ter valor, ainda é um subproduto do desmatamento com alto custo de transporte. A terra é o que mais importa.

Tabela 4.8 - Trajetórias de liderança identificadas (1984 a 2011).

Ano Inicial	floresta → LFD → MFD	floresta → MFD → HFD
1993	1	0
1996	1	0
1997	6	0
1998	4	1
1999	14	0
2000	38	0
2001	6	0
2002	11	0
2003	1	0
2004	2	0
2005	3	0
2006	16	0
2007	1	0
2009	0	0
Total	94	1

A análise da distribuição espacial das trajetórias de liderança pode indicar uma provável direção de propagação, considerando uma mesma sequência de transições nos anos subsequentes ao ano de referência da trajetória líder. No entanto, tal análise não foi objeto de estudo neste trabalho.

Nas Tabelas 4.9 e 4.10, são apresentados os resumos dos parâmetros (elementos de caracterização) das funções que implementaram os padrões comportamentais utilizados no Estudo de Caso A.

Tabela 4.9 - Padrões Comportamentais e os respectivos elementos de caracterização do Estudo de Caso A.

Elemento	Experimentos			A.3.1	
	A.1.1	A.1.2	A.1.3		A.2
Função	Convergência	Convergência	Convergência	Convergência	Encontro
Vizinhança V	cena 227/65	cena 227/65	cena 227/65	cena 227/65	FLONA Jamaxim
Mínimo de Ocorrências n	1	1	1	1	1
Janela Temporal j	{1984,1997,1}	{1998,2004,1}	{2005,2011,1}	{1984,2011,1}	{2000,2005,1}
Instante t	—	—	—	—	—
Conjunto de Estados de Convergência E_c	{1}	{1}	{1}	{1}	—
Conjunto de Estados de Encontro E_e	—	—	—	—	{0,4 a 0,9}
Conjunto de Transições Inconsistentes I	—	—	—	—	—
Conjunto de Transições Anômalas A	—	—	—	—	—
Sequência de Transições de Estado s	—	—	—	—	—
Máximo de Ocorrências q	—	—	—	—	—
Intensidade i	—	—	—	1 a 5 anos; 6 a 15 anos; e 16 a 28 anos	—

Tabela 4.10 - Padrões Comportamentais e os respectivos elementos de caracterização do Estudo de Caso A.

Experimentos						
Elemento	A.3.2	A.4	A.5	A.6	A.7	
Função	Encontro	Deteção de Inconsistências	Deteção de Anomalias	Rebanho	Liderança	
Vizinhança V	FLONA Jamaxxim	cena 227/65	FLONA Jamaxxim	cena 227/65	cena 227/65	
Mínimo de Ocorrências n	1	1	1	1	1	
Janela Temporal j	{2006,2011,1}	{1984,2011,1}	{2006,2011,1}	—	{1984,2011,1}	
Instante t	—	—	—	2003; 2006 e 2009	—	
Conjunto de Estados de Convergência E_c	—	—	—	—	—	
Conjunto de Estados de Encontro E_e	{0,4 a 0,9}	—	—	—	—	
Conjunto de Transições Inconsistentes I	—	HFD → F HFD → LFD	—	—	—	
Conjunto de Transições Anômalas A	—	—	F → MFD F → HFD LFD → MFD MFD → HFD	—	—	
Sequência de Transições de Estado s	—	—	—	F → LFD F → MFD LFD → MFD MFD → HFD	F → LFD F → MFD LFD → MFD MFD → HFD	
Máximo de Ocorrências q	—	—	200	—	—	
Intensidade i	—	—	—	—	—	

F: Floresta. LFD: Baixa Intensidade de Degradação Florestal.

MFD: Moderada Intensidade de Degradação Florestal.

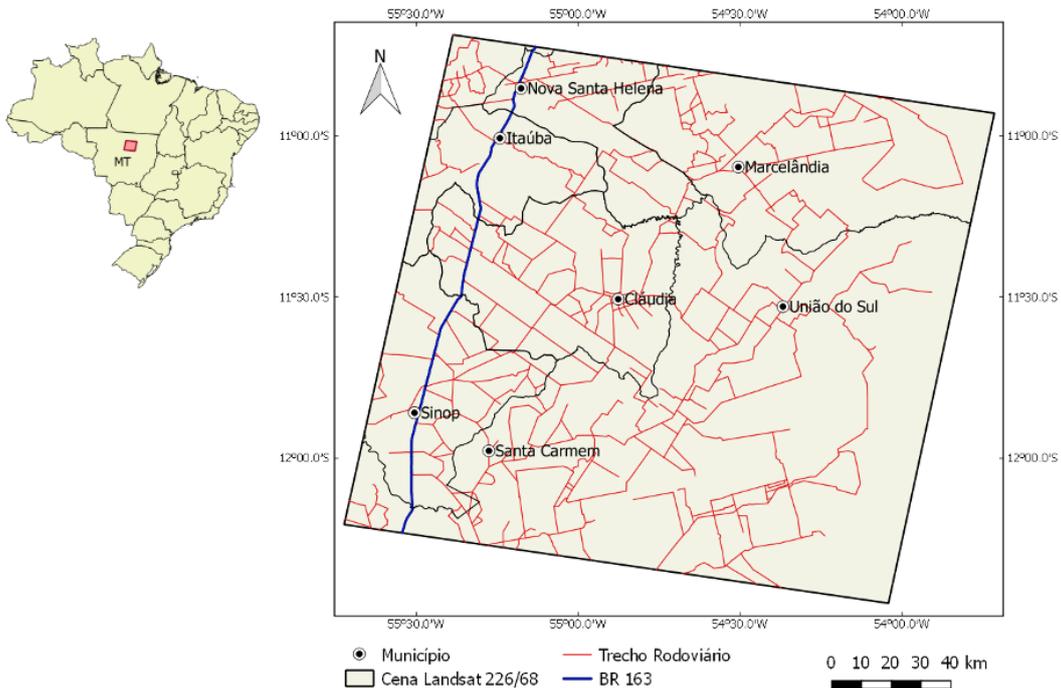
HFD: Alta Intensidade de Degradação Florestal.

4.3 Estudo de Caso B: região do entorno do município de Sinop - MT

4.3.1 Área de Estudo e Base de Dados

A presente área de estudo é delimitada pela cena 226/68 do satélite Landsat 5 (TM), possui 27.367 km^2 e corresponde à região do entorno do município de Sinop (Figura 4.18). Localizado na porção central do estado do Mato Grosso (MT), às margens da BR-163, o município de Sinop está inserido no Bioma Amazônia, abrange uma área de aproximadamente $3.942,229 \text{ km}^2$ e possuía a população estimada de 132.934 habitantes em 2016 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016). Trata-se de uma fronteira madeireira consolidada com um histórico mais longo de exploração (PINHEIRO, 2015), se comparada com a área do Estudo de Caso A.

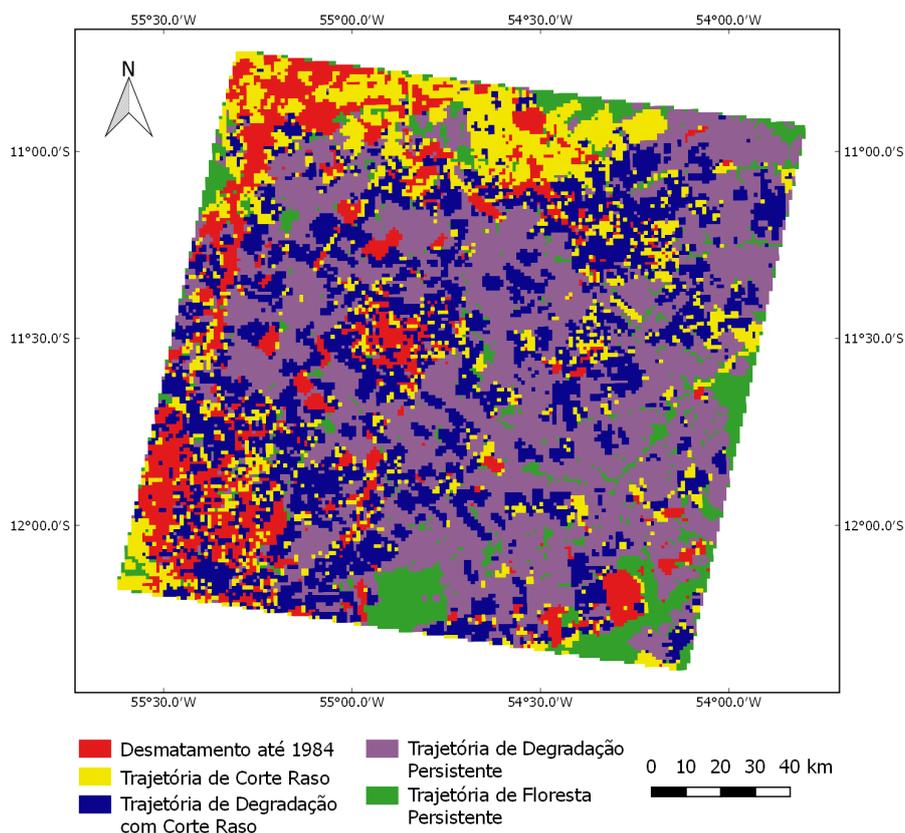
Figura 4.18 - Área de estudo B: região do entorno do município de Sinop - MT.



A partição da área de estudo, por uma grade regular com resolução espacial de $1 \times 1 \text{ km}$, originou um conjunto de 27.367 células (trajetórias) e 766.276 observações, considerando toda a extensão temporal dos dados (28 anos). O resultado

final no ano de 2011, dados os critérios de agrupamento utilizados na Tabela 4.2, apresentou 2.411 (8,8%) trajetórias de floresta persistente; 3.457 (12,6%) trajetórias de corte raso; 10.576 (38,6%) trajetórias de degradação persistente; 7.095 (25,9%) trajetórias de degradação com corte raso; e 3.828 (14,1%) trajetórias com desmatamento anterior ao ano de 1984 (Figura 4.19). Descartadas as áreas desmatadas antes do ano de 1984, verificou-se que, no intervalo da base de dados (1984 a 2011), houve a remoção completa da cobertura em 10.552 km^2 (44,8%). As trajetórias que apresentaram algum tipo de degradação em sua constituição, por sua vez, corresponderam a 17.671 km^2 (75%), distribuídas em toda a região de estudo.

Figura 4.19 - Estudo de caso B: classificação das trajetórias no ano 2011, conforme a tipologia de degradação proposta por Pinheiro (2015).



4.3.2 Preparação dos Dados

A base de dados de trajetórias foi armazenada utilizando o Gerenciador de Banco de Dados PostgreSQL, na sua versão 9.1.14, juntamente com a extensão espacial PostGIS, na sua versão 1.5.5. Posteriormente, tal base foi validada quanto a singularidade das unidades de análise, ordenamento cronológico das observações e domínio de estados das classificações. Houve ainda a necessidade de conversão dos dados originais para a estrutura de armazenamento do módulo espaço-temporal da biblioteca Terralib. Desse modo, cada uma das 27.367 células deu origem a 28 registros no banco de dados, totalizando 766.276 observações. Não houve necessidade de conversão de tipo ou de valores nos atributos armazenados, sendo as coberturas classificadas conforme os níveis de degradação identificados na Tabela 4.1. Foram ainda utilizados dados históricos sobre a região e o auxílio de um especialista no contexto de estudo.

4.3.3 Mineração de Trajetórias e Aplicação do Conhecimento

Para atingir os objetivos dos experimentos a seguir, o Padrão Comportamental de Convergência foi definido com a ajuda de um especialista e aplicado, juntamente com os seus respectivos elementos de caracterização, à uma base de dados de degradação florestal. Com o propósito de evitar processamento desnecessário de dados conhecidamente fora do contexto de estudo, foram desconsideradas as trajetórias de desflorestamento anteriores ao ano de 1984.

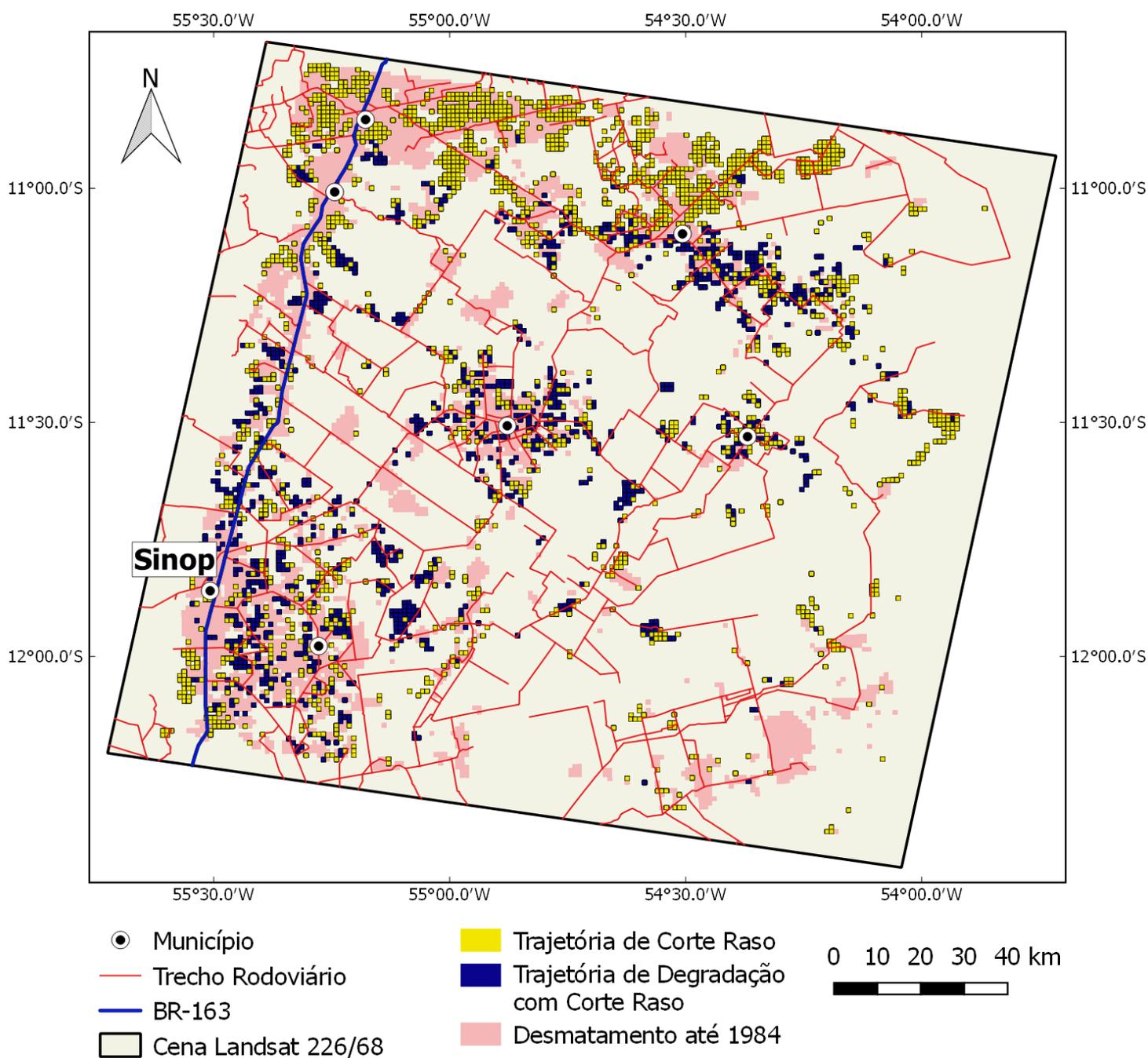
4.3.3.1 Experimento B.1: trajetórias convergentes para corte raso

Em função dos diferentes contextos existentes na região de estudo ao longo do tempo, o presente experimento foi dividido em três intervalos de pesquisa: 1984 a 1994, 1995 a 2004 e 2005 a 2011.

4.3.3.1.1 B.1.1: Período de 1984 a 1994

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Onde estão localizadas as áreas de floresta nas quais houve o processo de conversão da cobertura para corte raso no período compreendido entre os anos de 1984 e 1994?* Tal período foi escolhido por coincidir com o ápice da atividade madeireira na região. A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 226/68 (Figura 4.20) e a determinação das intensidade da convergência não foi objeto deste experimento.

Figura 4.20 - Experimento B.1.1: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 1994).

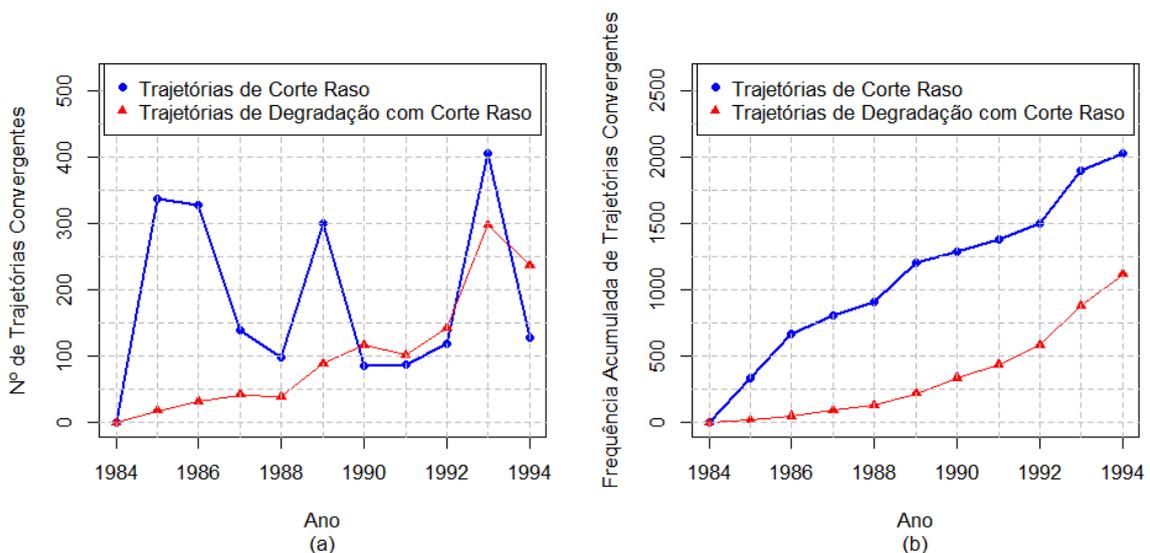


Como resultado, foi possível identificar a convergência de 3.150 trajetórias no

intervalo de pesquisa (1984 a 1994), dentre as quais, 2.033 (64,5%) trajetórias de corte raso e 1.117 (35,5%) trajetórias de degradação com corte raso. Desse modo, verificou-se que a maior parte das trajetórias correspondeu à conversão repentina da floresta em corte raso sem que houvesse qualquer evento de degradação anterior na trajetória. Tais trajetórias foram localizadas às margens dos trechos rodoviários e adjacentes às cidades, uma vez que a exploração da madeira se tornou a atividade econômica mais importante da região, elevando o município de Sinop à condição de um dos maiores polos madeireiros da Amazônia Legal (COY; KLINGLER, 2014).

Analisando os quantitativos de trajetórias e os respectivos instantes de convergência no interior do intervalo de estudo (1984 a 1994), observou-se uma maior oscilação nas trajetórias de corte raso (Figura 4.21a). No período considerado, houve ainda um aumento de 6.105% nas trajetórias de corte raso e de 501% nas trajetórias de degradação com corte raso (Figura 4.21b). Cabe ressaltar que não foram identificadas trajetórias convergentes no ano de 1984, pela impossibilidade de determinação do momento de uma eventual convergência anterior ao início da série de dados. No entanto, a base de dados permitiu verificar se foi mantido, no ano subsequente ao instante final do intervalo de busca (1995), o estado de convergência identificado no ano de 1994.

Figura 4.21 - Experimento B.1.1 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 1994).



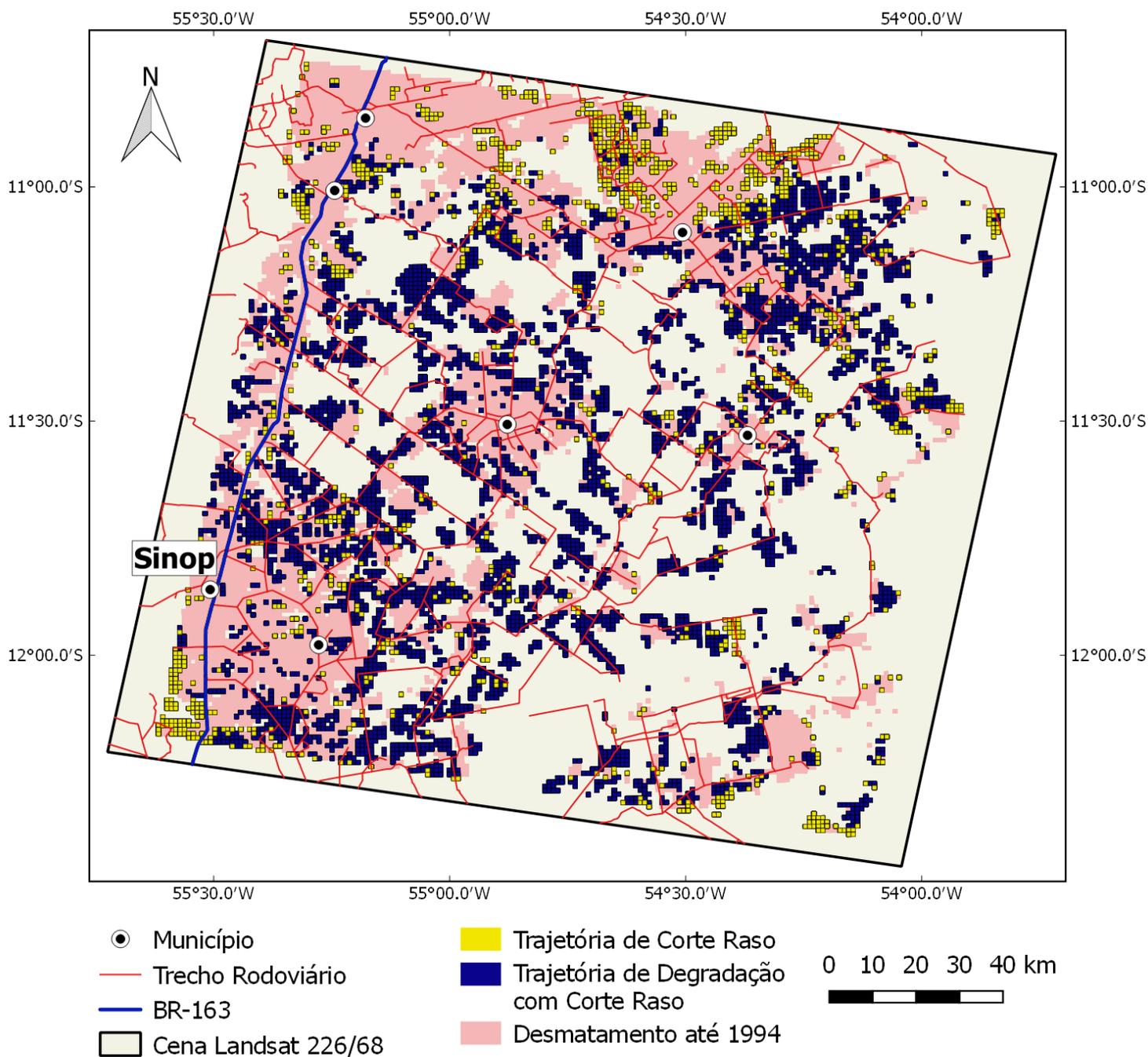
(a) Quantitativo anual e (b) Frequência acumulada.

4.3.3.1.2 B.1.2: Período de 1995 a 2004

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Onde estão localizadas as áreas de floresta nas quais houve o processo de conversão da cobertura para corte raso, no período compreendido entre os anos de 1995 e 2004?* Tal período foi escolhido por coincidir com a identificação de altas taxas de desmatamento, a chegada da energia elétrica e o início de mecanismos de controle por parte do governo (Figura 4.22). A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 226/68 e a determinação da intensidade da convergência não foi objeto deste experimento.

Os resultados obtidos permitiram identificar a convergência de 6.095 trajetórias no intervalo de pesquisa (1995 a 2004), dentre as quais, 1.322 (21,7%) trajetórias de corte raso e 4.773 (78,3%) trajetórias de degradação com corte raso. Desse modo, verifica-se que as trajetórias referentes à conversão repentina da floresta, com eventos de degradação anteriores, foram maioria. Tais trajetórias foram localizadas em regiões dispersas, mais interiorizadas em relação aos trechos rodoviários e cidades. Comparando com o período anterior, houve uma redução 35% nas trajetórias de corte raso e um acréscimo de 327% nas trajetórias de degradação com corte raso. A mudança de comportamento das trajetórias, com a predominância de trajetórias de degradação com corte raso, deve-se ao fato de se tratar de uma fronteira em estágio de ocupação já consolidado.

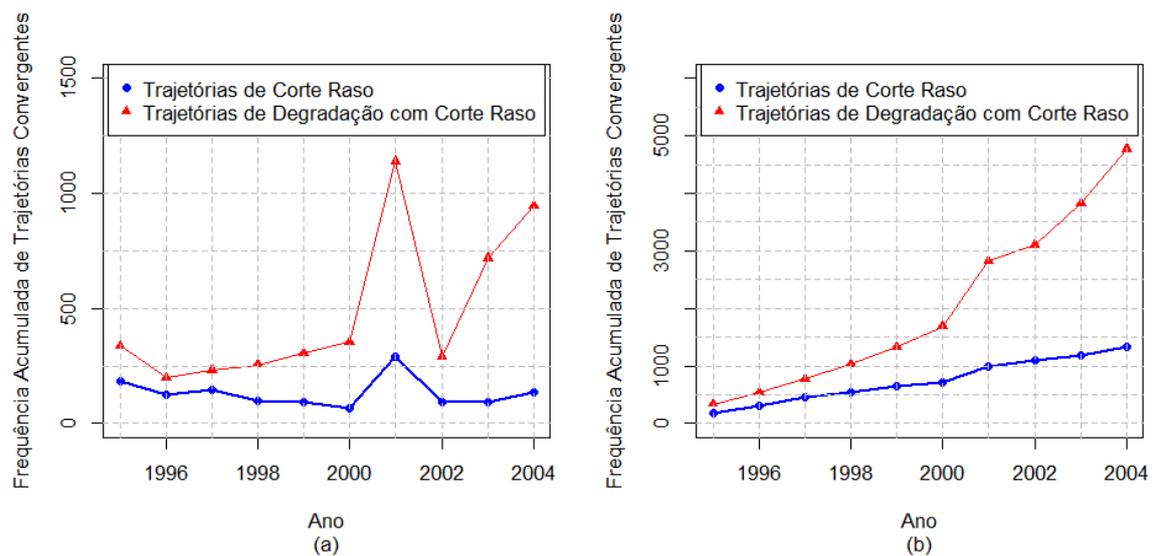
Figura 4.22 - Experimento B.1.2: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (1995 a 2004).



Analisando os quantitativos de trajetórias e os respectivos instantes de conver-

gência no interior do intervalo de estudo (1995 a 2004), observou-se um pico de ocorrência no ano de 2001, em ambos os grupos de trajetórias (Figura 4.23a). No referido período, houve um aumento de 1.316% no número de ocorrências das trajetórias de corte raso e de 6.303% nas trajetórias de degradação com corte raso (Figura 4.23b). Foi ainda possível verificar se a convergência iniciou em 1995, analisando o ano de 1994; e se foi mantida no ano subsequente ao instante final (2004), analisando o ano de 2005.

Figura 4.23 - Experimento B.1.2 - quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).



(a) Quantitativo anual e (b) Frequência acumulada.

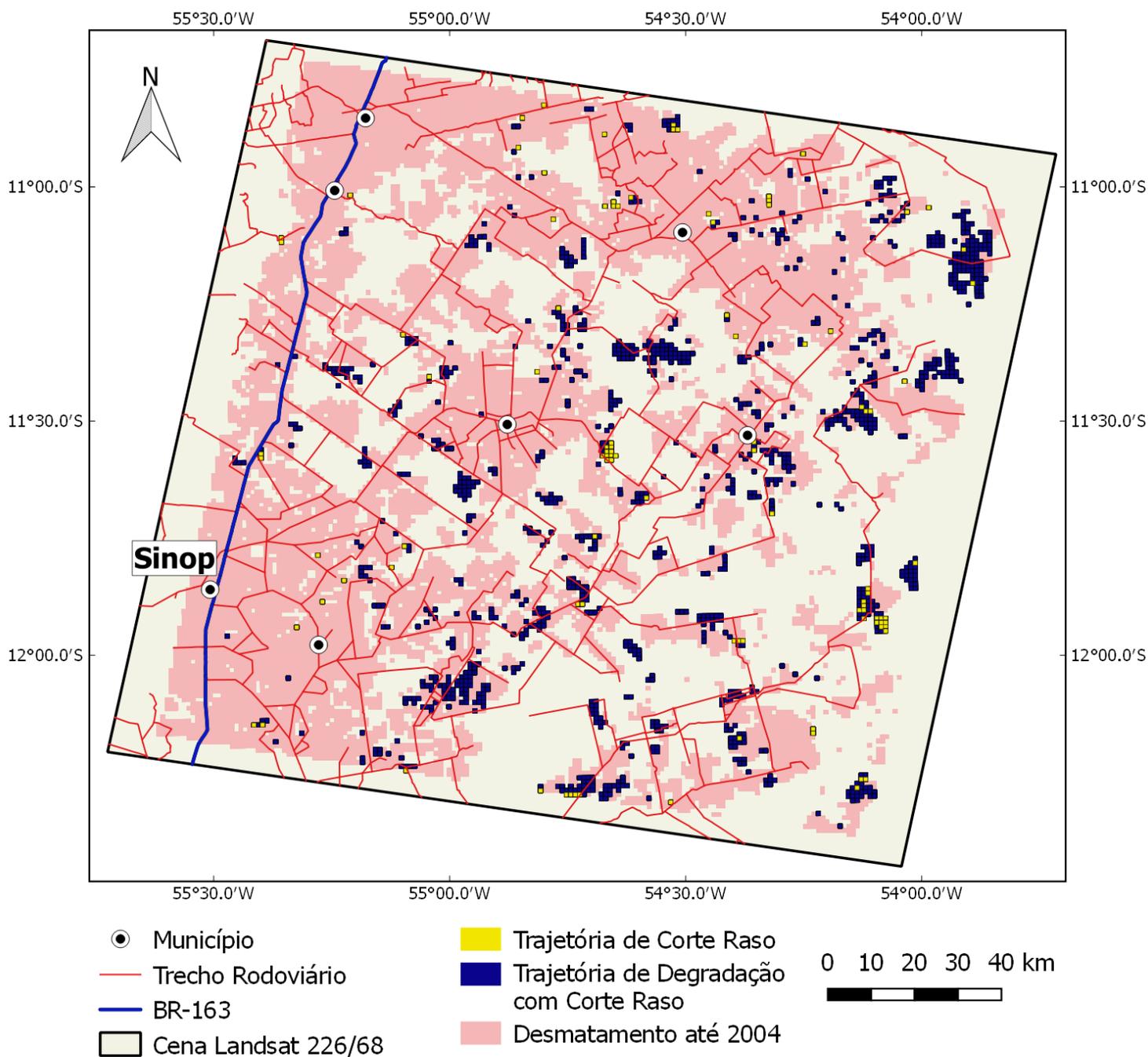
4.3.3.1.3 B.1.3: Período de 2005 a 2011

Neste experimento, procurou-se responder basicamente ao seguinte questionamento: *Onde estão localizadas as áreas de floresta nas quais houve o processo de conversão da cobertura para corte raso, no período compreendido entre os anos de 2005 e 2011?* Tal período foi escolhido por coincidir com o esgotamento dos recursos naturais pela atividade madeireira na região, que passou a utilizar a exploração da madeira não mais como um subproduto do desmatamento, mas pelo seu próprio valor agregado (RIVERO; ALMEIDA, 2008). A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 226/68 (Figura 4.24) e a determinação da intensidade da convergência não foi objeto deste experimento.

Como resultado, foi possível identificar a convergência de 1.246 trajetórias no intervalo de pesquisa (2005 a 2011), dentre as quais, 100 (8%) trajetórias de corte raso e 1.146 (92%) trajetórias de degradação com corte raso. Desse modo, verifica-se que as trajetórias referentes à conversão repentina da floresta, com eventos de degradação anteriores, foram maioria. Tais trajetórias estavam localizadas em pequenas regiões, ainda próximas dos trechos rodoviários, mas afastadas das cidades.

Comparando com o período anterior, houve uma redução de 92% nas trajetórias de corte raso e 75% nas trajetórias de degradação com corte raso. A significativa redução observada ocorreu em função da adoção de políticas ambientais mais rígidas por parte do governo (p.ex. Operação Curupira), o que levou a um maior investimento em planos de manejo (menor probabilidade de converter a floresta em corte raso). Cabe ressaltar que a base de dados permitiu verificar se a convergência foi iniciada em 2005, analisando o ano de 2004, mas não possibilitou identificar se uma eventual convergência em 2011 foi mantida.

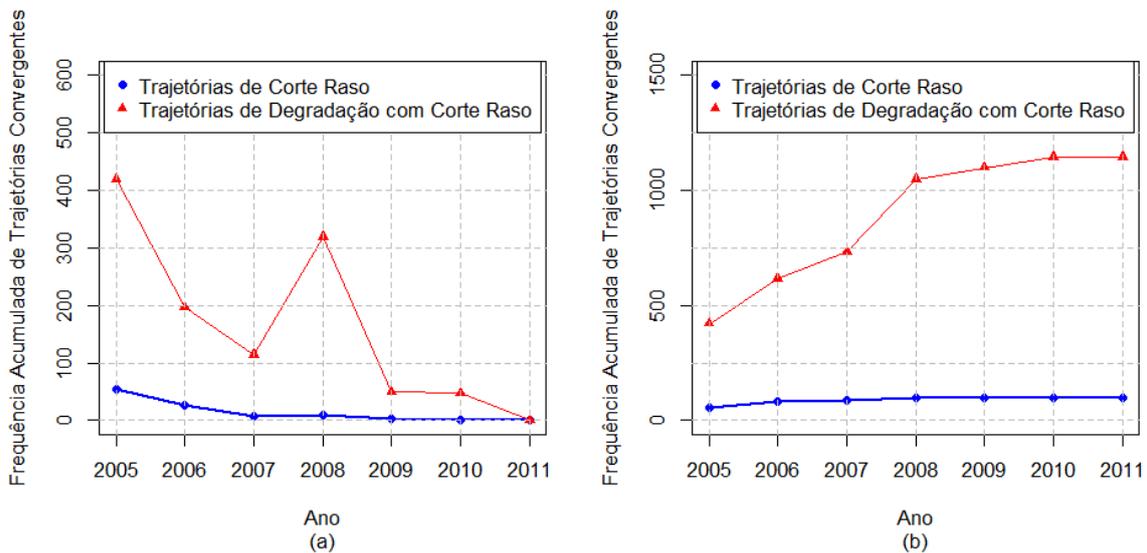
Figura 4.24 - Experimento B.1.3: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).



Quanto ao surgimento das trajetórias supracitadas, observa-se na Figura 4.25a

que há uma queda significativa na presença de ambas as trajetórias no período de 2005 a 2011, com um pico anômalo de trajetórias de degradação com corte raso no ano de 2008. No período considerado, houve um aumento de 85% no número de ocorrências das trajetórias de corte raso e de 172% nas trajetórias de degradação com corte raso (Figura 4.25b). Uma redução de crescimento significativa se comparada com os períodos anteriores, justificada pelas políticas governamentais adotadas.

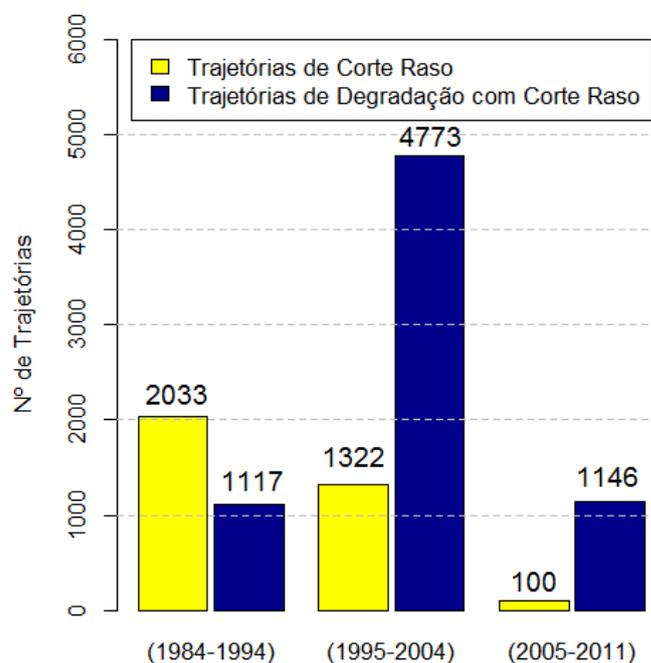
Figura 4.25 - Experimento B.1.3: quantitativo anual e frequência acumulada das trajetórias convergentes para corte raso (2005 a 2011).



(a) Quantitativo anual. (b) Frequência acumulada.

Considerando os três experimentos iniciais, verificou-se que as trajetórias de degradação com corte raso, ou seja, as trajetórias com eventos de extração de madeira e/ou fogo florestal seguidos da conversão da floresta em corte raso, aumentaram 327% entre 1994 e 2004 e reduziram 76% entre os anos de 2005 e 2011. Enquanto isso, as trajetórias de corte raso, nas quais houve conversão repentina da floresta em corte raso sem qualquer estágio de degradação anterior, reduziram 35% entre 1994 e 2004 e 92% entre 2005 e 2011 (Figura 4.26). As reduções observadas em ambas as trajetórias podem ser justificadas pelo esgotamento do recurso explorado de forma predatória.

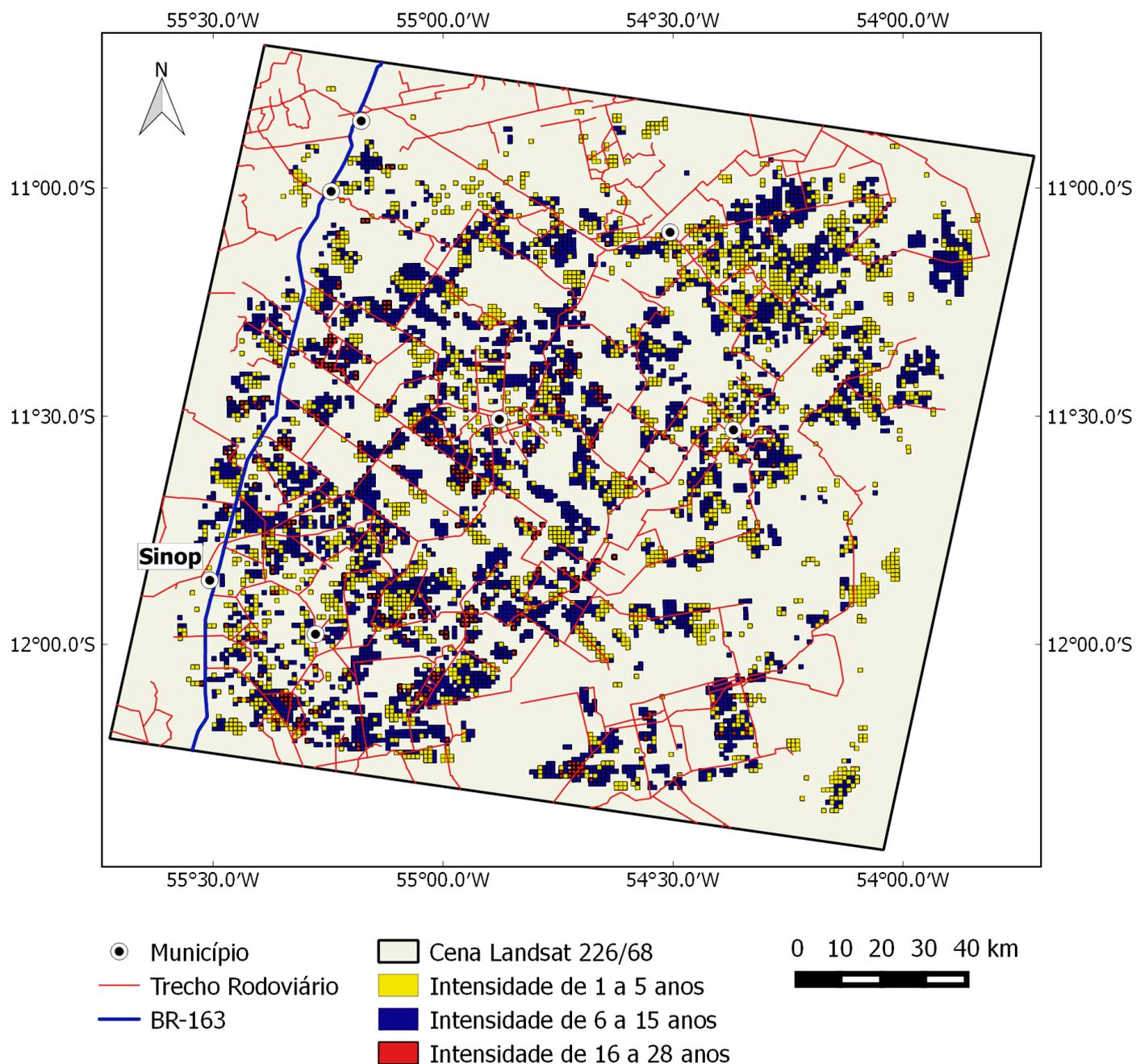
Figura 4.26 - Experimentos B1: quantitativo de trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 2011).



4.3.3.2 Experimento B.2: intensidade das trajetórias convergentes para corte raso (1984 a 2011)

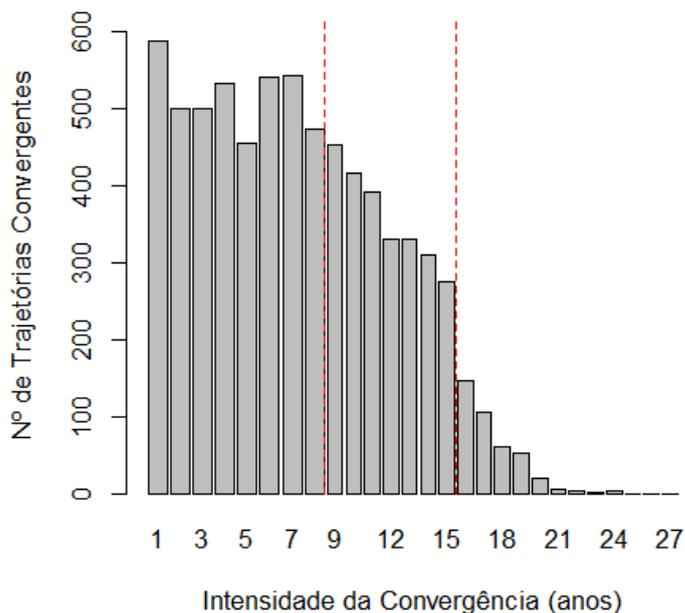
Considerando que essa é uma fronteira de ocupação já consolidada, onde as dinâmicas de conversão da floresta são mais lentas, procurou-se responder com este experimento ao seguinte questionamento: *Qual a velocidade do processo de conversão de áreas previamente degradadas para corte raso, no período de 1984 a 2011, desde que foram detectadas pela primeira vez?* Para tal, foi considerado o intervalo entre o primeiro estado de degradação e o primeiro estado de corte raso, assim como as seguintes intensidades de convergência definidas por um especialista: 1 a 5 anos, 6 a 15 anos e 16 a 28 anos. Tais períodos foram escolhidos com o propósito de compará-los com os resultados do Experimento A.2. A restrição de vizinhança considerada foi a área delimitada pela cena Landsat 226/68 (Figura 4.27).

Figura 4.27 - Experimento B.2: distribuição espacial das trajetórias convergentes para corte raso por intensidade (1984 a 2011).



Como resultado, foi possível identificar a convergência em 7.034 trajetórias nas condições definidas para o experimento, dentre as quais, 2.574 (36,6%) com intensidade entre 1 e 5 anos , 4.062 (57,8%) entre 6 e 15 anos e 398 (5,6%) entre 16 e 28 anos. Observou-se ainda que no mesmo período de 8 anos observado no Experimento A.2, somente 58,7% das trajetórias de degradação com corte raso haviam convergido para corte raso, a partir do primeiro estado de degradação identificado. Tal distribuição das trajetórias por intensidade de convergência já era esperada em virtude do estágio de ocupação (Figura 4.28), corroborando com os resultados obtidos por Pinheiro (2015). Cabe ressaltar que não foi possível identificar a convergência das trajetórias nos anos de 1984 e 2011, pelos motivos já descritos neste trabalho.

Figura 4.28 - Experimento B.2: intensidade de convergência para corte raso (1984-2011).



Em função dos resultados obtidos nos experimentos utilizando o Padrão de Convergência (A.1, A.2, B.1 e B.2) nas regiões do entorno dos municípios de Novo progresso e Sinop, é possível afirmar que:

- a região do entorno do município de Novo Progresso apresentava, no início da série de dados (ano de 1984), $369km^2$ de cobertura desflorestada, enquanto que a região do entorno de Sinop já apresentava $3.828km^2$ (área 10x maior);
- a dinâmica das trajetórias nos períodos pesquisados mostraram que a exploração madeireira foi intensificada, principalmente em Sinop, nos dois primeiros intervalos de pesquisa (até o ano de 2004). Posteriormente, com a implantação de políticas de controle por parte do governo as taxas diminuíram sob influência do próprio esgotamento dos recursos;
- a intensidade da convergência no intervalo de 1984 a 2011, tomando como referência os primeiros 8 anos, foi maior na região do entorno de Novo Progresso (91%) do que de Sinop (58,7%), indicando que aquela é uma fonteira de exploração em expansão;
- as vias de acesso e as cidades tiveram um papel fundamental nos referidos processos de degradação, uma vez que foram responsáveis por criar canais de acessibilidade, motivando a migração humana e favorecendo o escoamento do extrativismo ilegal;
- ao final da série de dados (ano de 2011), a área total desflorestada na região do entorno de Novo Progresso correspondia a $7.592km^2$, enquanto que na região do entorno do município de Sinop a $10.552km^2$. Considerando as áreas que sofreram degradação em algum momento, independente se o processo culminou com o desflorestamento ou não, $6.156km^2$ corresponderam à Novo Progresso, enquanto que $17.671km^2$ à Sinop; e
- a região do entorno do município de Sinop encontrava-se em um estágio mais avançado de ocupação e exploração dos recursos naturais, se comparada com a região do entorno de Novo Progresso.

Nas Tabelas 4.11, é apresentado o resumo dos parâmetros (elementos de caracterização) das funções que implementaram os padrões comportamentais utilizados no Estudo de Caso B.

Tabela 4.11 - Padrões Comportamentais e os respectivos elementos de caracterização do Estudo de Caso B.

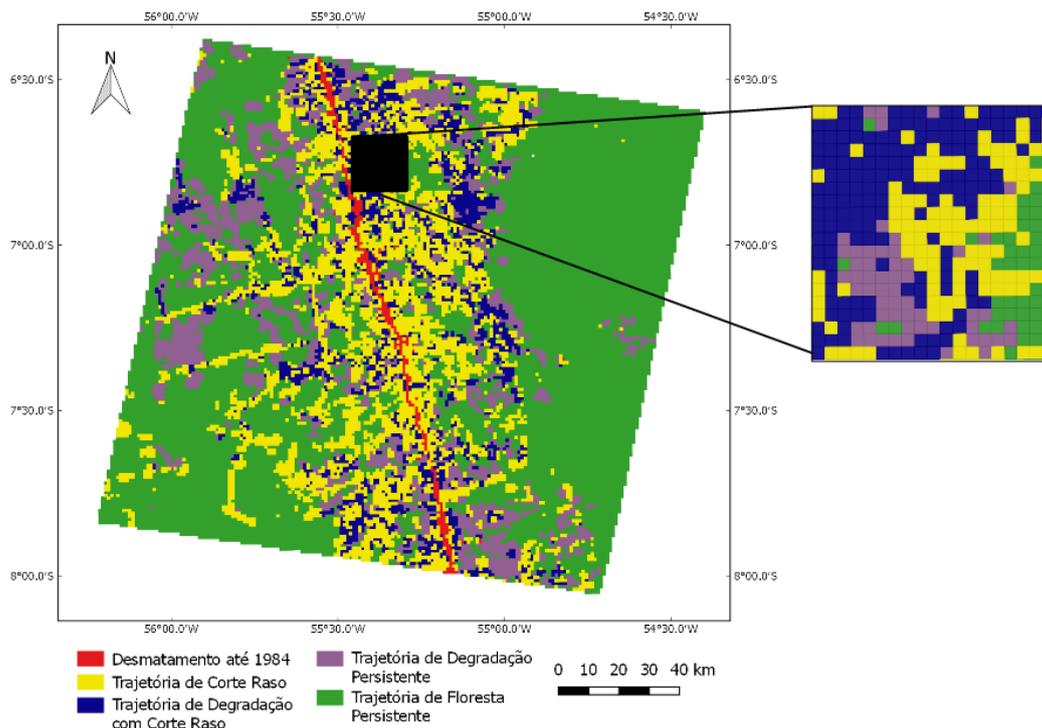
Elemento	Experimentos			
	B.1.1	B.1.2	B.1.3	B.2
Função	Convergência	Convergência	Convergência	Convergência
Vizinhança V	cena 226/68	226/68	226/68	226/68
Mínimo de Ocorrências n	1	1	1	1
Janela Temporal j	{1984, 1994, 1}	{1995, 2004, 1}	{2005, 2011, 1}	{1984, 2011, 1}
Intervalo l	—	—	—	—
Instante t	—	—	—	—
Conjunto de Estados de Convergência E_c	{1}	{1}	{1}	{1}
Conjunto de Estados de Encontro E_e	—	—	—	—
Conjunto de Transições Inconsistentes I	—	—	—	—
Conjunto de Transições Anômalas A	—	—	—	—
Sequência de Transições de Estado s	—	—	—	—
Máximo de Ocorrências q	—	—	—	1 a 5 anos; 6 a 15 anos; e 16 a 28 anos
Intensidade i	—	—	—	—

4.4 Estudo de Caso C: agrupamento de trajetórias por semelhança da evolução temporal

4.4.1 Área de Estudo

A presente área de estudo é composta por 400 trajetórias, está localizada a nordeste do município de Novo Progresso - PA (Figura 4.29) e foi escolhida por apresentar trajetórias com diferentes características em sua composição. Para agrupar as referidas trajetórias pela evolução temporal de suas respectivas coberturas foi utilizada a metodologia apresentada no item 3.4 do Capítulo 3, que prevê as seguintes etapas: i) cálculo do índice de proximidade entre as trajetórias de mudança; ii) recuperação da distribuição espacial das trajetórias de mudança; e iii) agrupamento das trajetórias de mudança semelhantes.

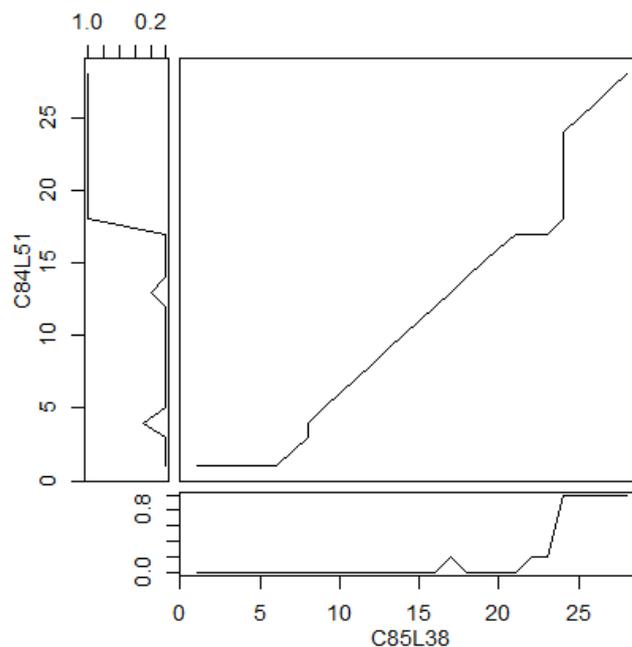
Figura 4.29 - Área de estudo C: amostra de 400 trajetórias.



4.4.2 Cálculo do Índice de Proximidade entre as Trajetórias de Mudança

Os índices de proximidade entre todos os pares de trajetórias presentes na base de dados (400 trajetórias) foram calculadas utilizando o algoritmo DTW (SAKOE; CHIBA, 1978), implementado na linguagem C++ e considerando uma métrica de distância euclidiana. Como resultado, foi obtida uma matriz quadrada e simétrica de ordem $n = 400$. Na Figura 4.30, é apresentado o exemplo do alinhamento calculado pelo DTW para o par de trajetórias C84L51 e C85L38. O valor resultante, calculado com base nos níveis de degradação definidos na Tabela 4.1, foi igual a 0,7.

Figura 4.30 - Alinhamento resultante das trajetórias C84L51 e C85L38 : 0,7.



4.4.3 Recuperação da Distribuição Espacial das Trajetórias de Mudança

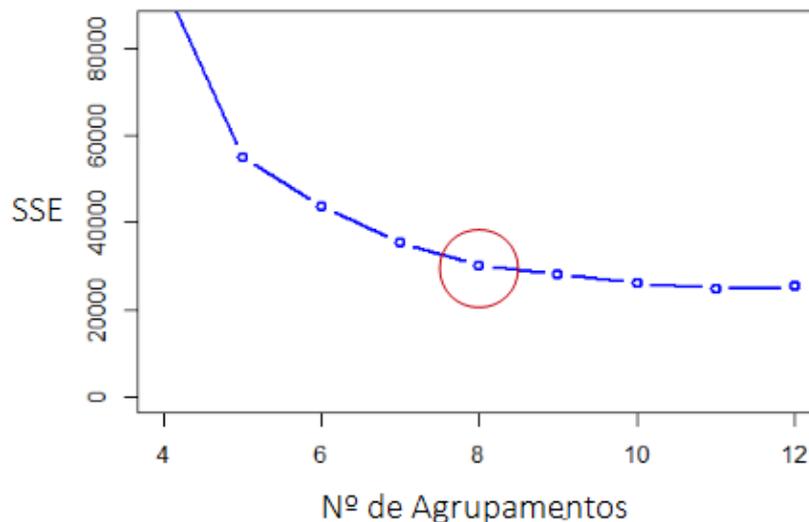
Com o propósito de reduzir a dimensão da matriz de proximidade calculada na etapa anterior foi utilizado o algoritmo *CMDS* (TORGERSON, 1952). Para tal, optou-se pela representação das trajetórias em um sistema 2D, de modo a facili-

tar a visualização e análise das mesmas, sendo possível recuperar a distribuição espacial das trajetórias com base nos índices de proximidade calculados pelo algoritmo DTW.

4.4.4 Agrupamento das Trajetórias de Mudança Semelhantes

O agrupamento das trajetórias foi realizado com o auxílio do algoritmo *K-Means Clustering* (MACQUEEN, 1967) disponível no pacote *stats* do *R*, na versão 3.3.0 (R CORE TEAM, 2013). Para tal, foram utilizadas as coordenadas calculadas na etapa anterior com o objetivo de determinar agrupamentos baseados na evolução temporal das trajetórias. A definição do número k de agrupamentos foi realizada com o auxílio do Método do Cotovelo (THORNDIKE, 1953), que consiste na verificação da Soma dos Erros Quadráticos (*Sum of Squared Errors* - SSE) calculados sobre a diferença entre a localização de cada trajetória (calculada pelo CMDS) e o seu respectivo centroide associado (calculado pelo *K-means Clustering*). O ponto de inflexão da curva indica o número de grupos ideal a partir do qual o SSE não sofre maiores variações (KODINARIYA; MAKWANA, 2013). No caso deste estudo, foram definidos 8 grupos (Figura 4.31).

Figura 4.31 - Método do Cotovelo para determinação do número K de grupos.



Com o propósito de realizar uma análise inicial, a tipologia proposta por Pinheiro (2015), foi comparada com os resultados obtidos pelo agrupamento (Gr) baseado

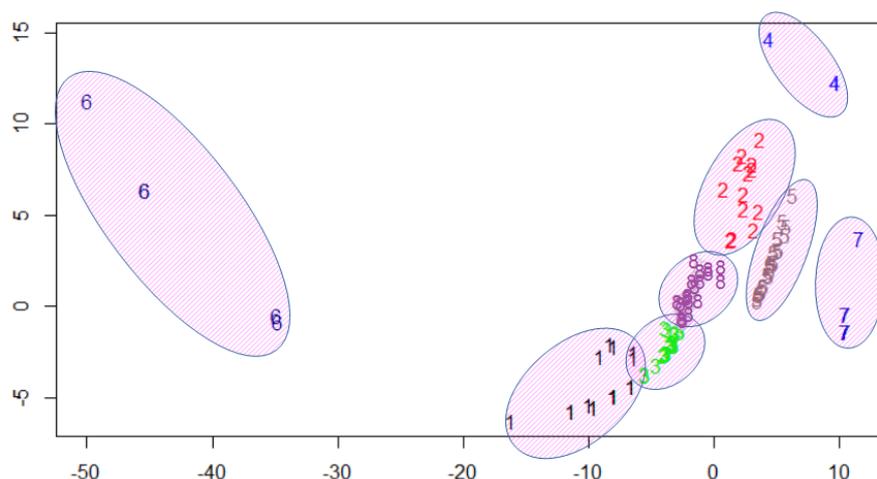
na semelhança de evolução temporal, calculado pelo DTW, CMDS e *K-Means Clustering* (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 - Comparativo dos agrupamentos de trajetórias obtidos pela evolução temporal.

Tipologia Original	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4	Gr5	Gr6	Gr7	Gr8
Corte raso	13	0	33	0	0	3	0	63
Degradação com corte raso	6	0	29	0	0	2	0	126
Degradação persistente	0	14	0	3	32	0	4	3
Floresta persistente	0	0	0	0	0	0	69	0
Total	19	14	62	3	32	5	73	192

Analisando os resultados e a tipologia original (PINHEIRO, 2015), verificou-se que as trajetórias de floresta persistente não apresentaram problemas de separação, pois só há uma classe de cobertura presente (floresta). No entanto, houve uma certa confusão na separação das trajetórias dos Grupos 3 e 8 (Figura 4.32), provavelmente pela presença dos estados de degradação (0,1 a 0,9) e de corte raso (1) em diferentes quantidades e sequências, influenciando o cálculo do DTW.

Figura 4.32 - Distribuição espacial dos 8 grupos de trajetórias resultantes.



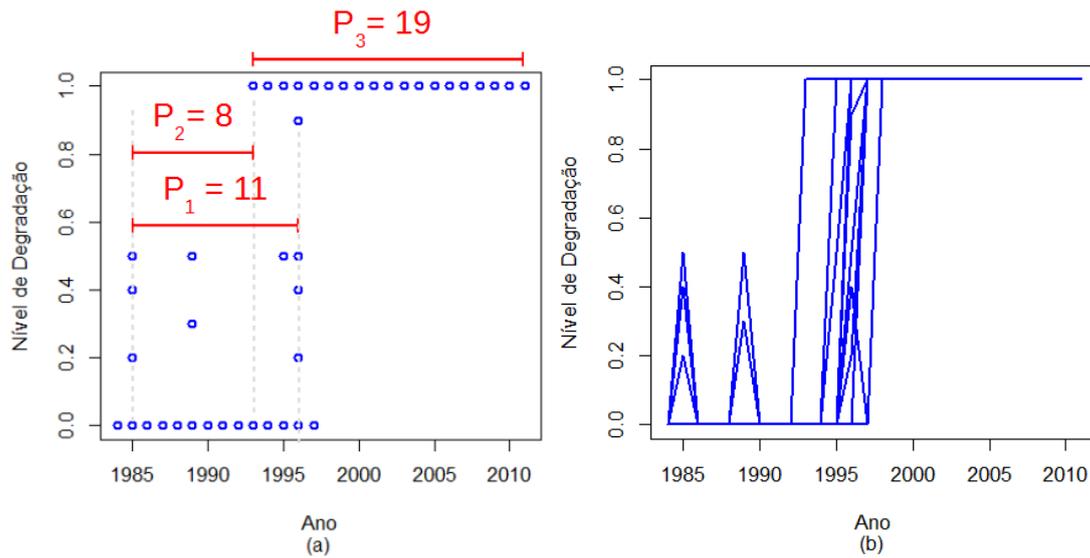
Para a criação de uma nova tipologia de trajetórias, não mais definida unicamente pelo domínio de coberturas existentes, mas sim pela evolução temporal das mesmas, foi necessário inicialmente, com a ajuda de um especialista, definir quais as propriedades e parâmetros das trajetórias que seriam consideradas *a priori* para a descrição das mesmas. No contexto apresentado, foram definidas e identificadas três propriedades, cada qual mensurada sobre todos os 8 grupos de trajetórias resultantes.

- **Dispersão dos estados de degradação (P_1):** é o intervalo de tempo entre o primeiro e o último estado de degradação identificado em todo o agrupamento de dados. Caso ocorra em até 5 anos, o conjunto de dados é *concentrado* e acima disso, *disperso*. Existe ainda a possibilidade de que o referido atributo não seja mensurado, caso não sejam identificados estados de degradação no grupo de trajetórias;
- **Intensidade da convergência para corte raso (P_2):** é o intervalo de tempo entre o primeiro estado de degradação e o primeiro estado de corte raso (remoção completa da cobertura) detectados. Caso ocorra em até 4 anos, será de *alta intensidade*; entre 5 a 10 anos, de *intensidade moderada*; e acima de 10 anos, de *fraca intensidade*. Existe ainda a possibilidade de que o referido atributo não seja mensurado, caso não sejam identificadas convergências no grupo de trajetórias; e
- **Extensão temporal do desmatamento (P_3):** é o intervalo de tempo entre o primeiro e o último estado de corte raso (remoção completa da cobertura) detectados. Caso seja menor ou igual a 7 anos, será de *curta extensão*; entre 8 e 14, de *extensão moderada*; e acima de 15, de *longa extensão*. Existe ainda a possibilidade de que o referido atributo não seja mensurado, caso não sejam identificadas convergências no grupo de trajetórias.

Nas Figuras 4.33 a 4.40, os gráficos (a) apresentam os estados sobrepostos e seus respectivos níveis de degradação (0 a 1). Nos gráficos (b), são observados os mesmos estados, só que interligados na sequência em que aparecem nas respectivas trajetórias. O oito grupos resultantes são apresentados a seguir:

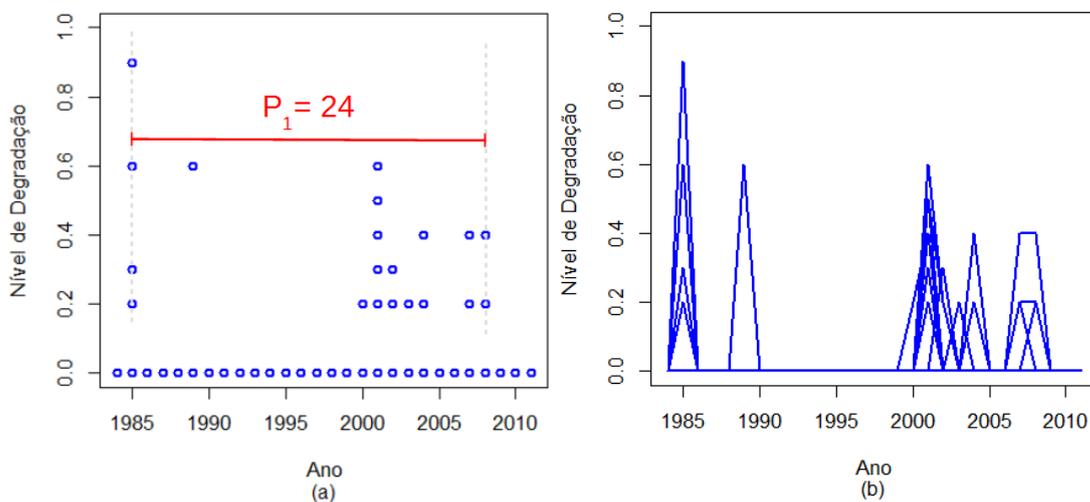
Grupo 1: as trajetórias deste grupo apresentam estados de degradação florestal dispersos ($P_1 = 11$ anos), com moderada intensidade de convergência para corte raso ($P_2 = 8$ anos) e longa extensão de desmatamento ($P_3 = 19$ anos) (Figura 4.33).

Figura 4.33 - Evolução temporal do Grupo 1: 19 trajetórias.



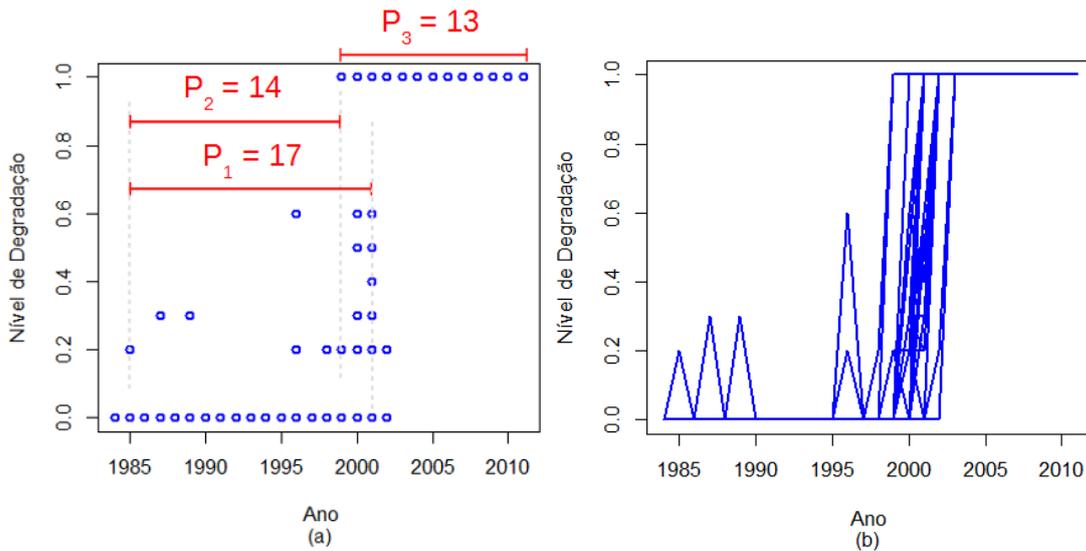
Grupo 2: neste grupo, as trajetórias apresentam estados de degradação florestal dispersos ($P_1 = 24$ anos), sem que haja convergência para corte raso dentro do intervalo considerado (Figura 4.34).

Figura 4.34 - Evolução temporal do Grupo 2: 14 trajetórias .



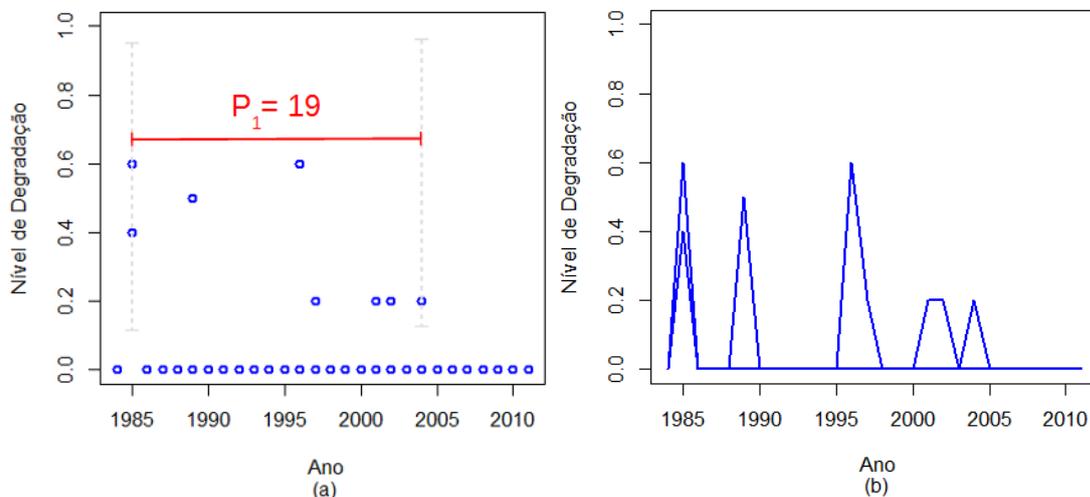
Grupo 3: as trajetórias deste grupo apresentam estados de degradação florestal dispersos ($P_1 = 17$ anos), com fraca intensidade de convergência para corte raso ($P_2 = 14$ anos) e moderada extensão de desmatamento ($P_3 = 13$ anos) (Figura 4.35).

Figura 4.35 - Evolução temporal do Grupo 3: 62 trajetórias.



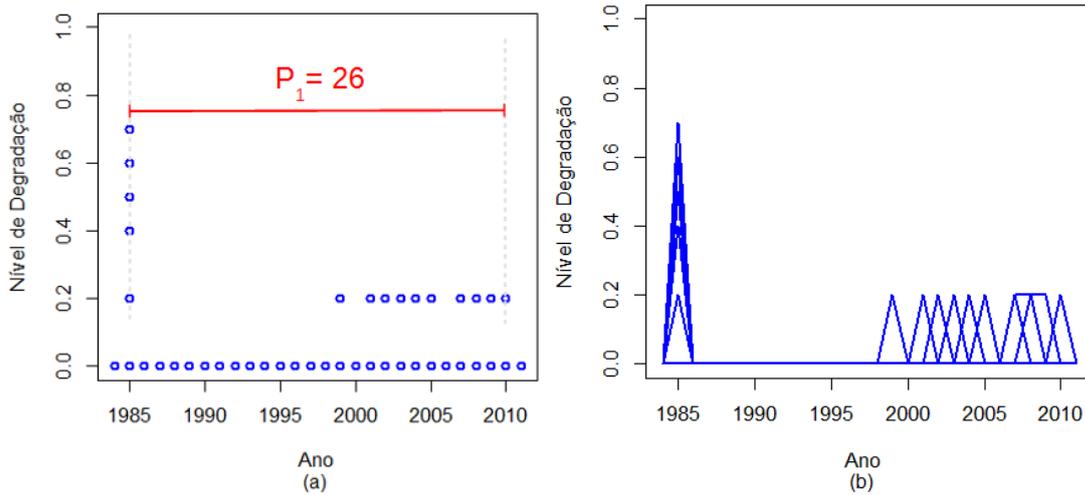
Grupo 4: neste grupo, as trajetórias apresentam estados de degradação florestal dispersos ($P_1 = 19$ anos), sem que haja convergência para corte raso dentro do intervalo considerado (Figura 4.36).

Figura 4.36 - Evolução temporal do Grupo 4: 3 trajetórias.



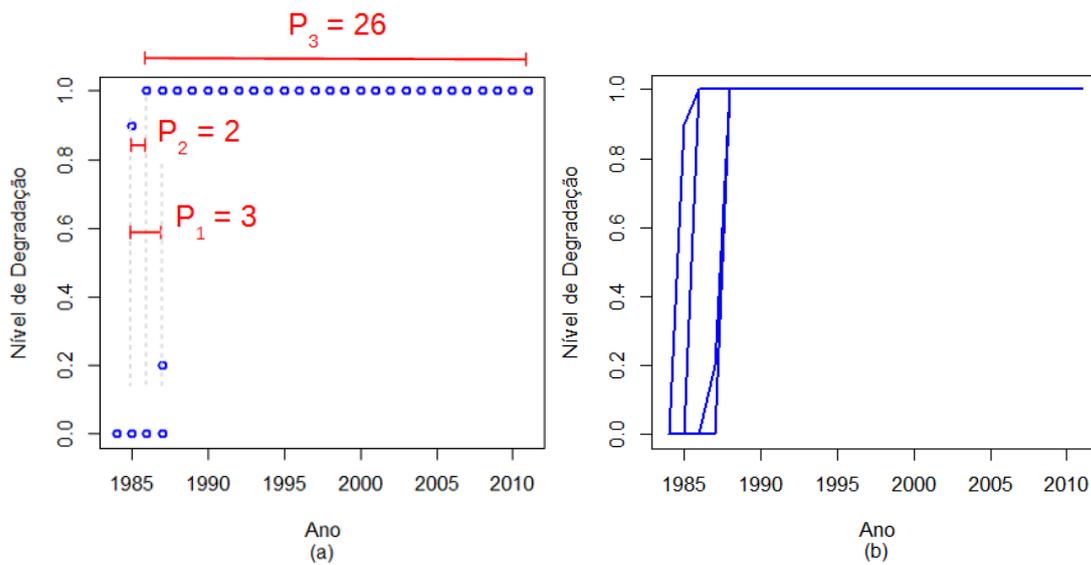
Grupo 5: as trajetórias deste grupo apresentam estados de degradação florestal dispersos ($P_1 = 26$ anos), sem que haja convergência para corte raso dentro do intervalo considerado (Figura 4.37).

Figura 4.37 - Evolução temporal do Grupo 5: 32 trajetórias.



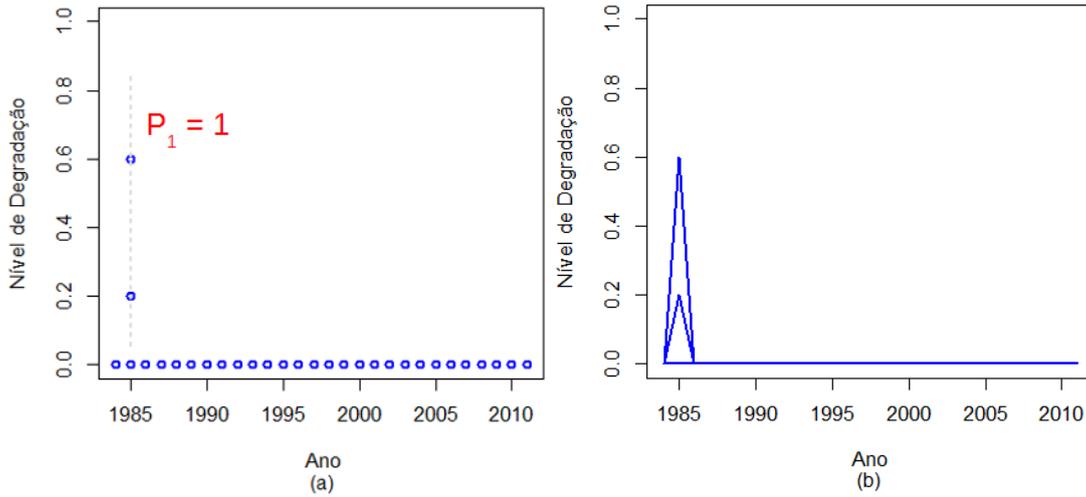
Grupo 6: neste grupo, as trajetórias apresentam estados de degradação florestal concentrados ($P_1 = 3$ anos), alta convergência para corte raso ($P_2 = 2$ anos) e longa extensão de desmatamento ($P_3 = 26$ anos) (Figura 4.38).

Figura 4.38 - Evolução temporal do Grupo 6: 5 trajetórias.



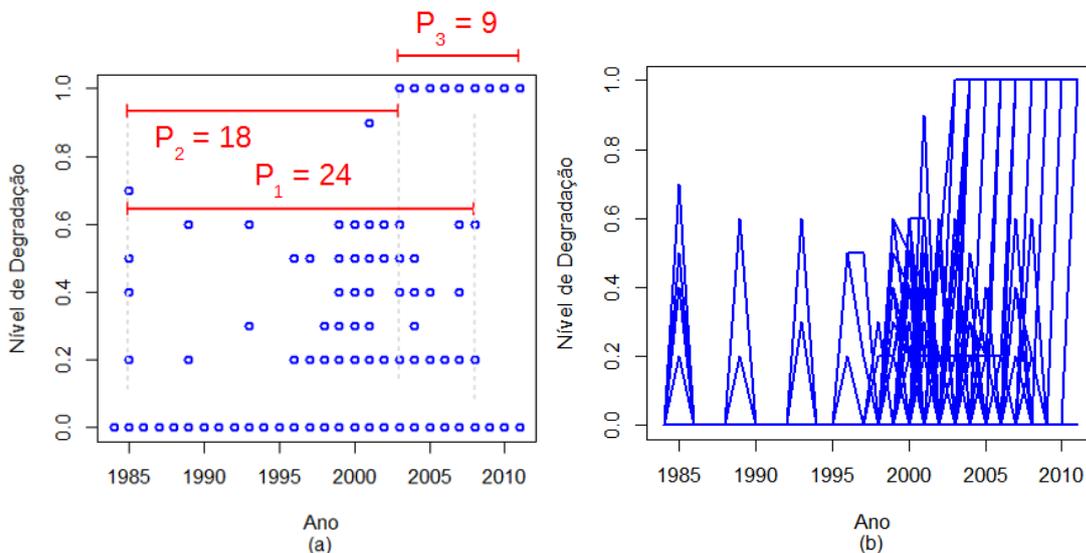
Grupo 7: as trajetórias deste grupo apresentam estados de degradação florestal concentrados ($P_1 = 1$ ano), sem que haja convergência para corte raso dentro do intervalo considerado (Figura 4.39).

Figura 4.39 - Evolução temporal do Grupo 7: 73 trajetórias .



Grupo 8: as trajetórias deste grupo apresentam estados de degradação florestal dispersos ($P_1 = 24$ anos), com fraca intensidade de convergência para corte raso ($P_2 = 18$ anos) e moderada extensão de desmatamento ($P_3 = 9$ anos) (Figura 4.40).

Figura 4.40 - Evolução temporal do Grupo 8: 192 trajetórias.



Analisando os grupos formados em função das propriedades definidas, verifica-se que existem grupos com descrições semelhantes e que podem ser reagrupados sem que haja prejuízo à semântica. Neste estudo, por exemplo, os 8 grupos originais foram reagrupados em 5 novos grupos. Desse modo, a tipologia final (Tabela 4.13) é descrita como resultado dos seguintes reagrupamentos: Grupo A (1), Grupo B (2, 4 e 5), Grupo C (3 e 8), Grupo D (6) e Grupo E (7). Cabe ressaltar que a tipologia apresentada corresponde à região do entorno do município de Novo Progresso - uma fronteira de ocupação em desenvolvimento.

Tabela 4.13 - Tipologia de trajetórias baseada na semelhança de evolução temporal (GSTE).

Tipologia	Descrição	Semântica
Grupo A	Trajетórias com eventos de degradação florestal dispersos no tempo, com moderada intensidade de convergência para corte raso e longa extensão temporal de desmatamento.	Trajетórias de degradação florestal que terminam em corte raso após eventos de exploração madeireira.
Grupo B	Trajетórias com eventos de degradação florestal dispersos no tempo, sem que haja convergência para corte raso dentro do intervalo considerado.	Trajетórias de degradação florestal que persistem no tempo, lícitas ou ilícitas, com um ou mais eventos de exploração madeireira e/ou fogo florestal.
Grupo C	Trajетórias com estados de degradação florestal dispersos no tempo, com fraca intensidade de convergência para corte raso e moderada extensão temporal de desmatamento.	Trajетórias de degradação florestal, que podem persistir ou não, podem ser lícitas ou ilícitas, com um ou mais eventos de exploração madeireira e/ou fogo florestal.
Grupo D	Trajетórias com estados de degradação florestal concentrados no tempo, alta intensidade de convergência para corte raso e longa extensão temporal de desmatamento.	Trajетórias de degradação florestal associadas ao processo de desmatamento por corte raso com eventos de exploração madeireira que antecedem a remoção completa da cobertura florestal.
Grupo E	Trajетórias de floresta persistente com raros estados de degradação concentrados, sem que haja convergência para corte raso dentro do intervalo considerado.	Trajетórias de floresta persistente, sem eventos de exploração madeireira significantes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O contexto atual para o estudo de mudanças de cobertura da terra é oportuno, favorecido pelos avanços tecnológicos nas áreas de aquisição, armazenamento e disseminação de dados espaço-temporais de trajetórias definidas no referido contexto. No entanto, para a exploração de tais bases de dados com o propósito de produzir informações úteis, compreensíveis e previamente desconhecidas, são necessários algoritmos automatizados de descoberta do conhecimento.

Com a finalidade de construir novos conhecimentos sobre a dinâmica de mudança das trajetórias de cobertura da terra, esta Tese apresentou as seguintes inovações:

- a) uma definição conceitual e a respectiva implementação computacional de um conjunto de padrões comportamentais aplicáveis no contexto das trajetórias de mudança de cobertura, denominada de *Behavioral Patterns Mining on Land Cover Change* (BPML); e
- b) uma metodologia computacional para agrupar as trajetórias de mudança de cobertura considerando as semelhanças entre as suas respectivas evoluções temporais, aqui denominada de *Grouping by Similarity of Temporal Evolution* (GSTE).

As inovações aqui propostas foram aplicadas com sucesso sobre bases de dados reais de degradação florestal e têm potencial de aplicação em outros contextos de estudo. Além disso, não ficam restritas aos padrões comportamentais aqui definidos, nem tampouco aos elementos de caracterização utilizados. Como consequência, novas definições são desejáveis de forma isolada ou como uma combinação das definições já existentes.

Face ao exposto, foram identificadas as seguintes oportunidades de trabalhos futuros:

- definição de novos elementos de caracterização de trajetórias, de forma independente ou como uma agregação dos elementos já existentes;
- definição de novos padrões comportamentais baseados nos elementos de caracterização já definidos ou a definir;

- aplicação dos padrões comportamentais em outros contextos de trajetórias de cobertura da terra (p.ex. agricultura extensiva e monitoramento de fronteiras);
- substituição dos algoritmos utilizados nas etapas da metodologia GSTE para o agrupamento das trajetórias por semelhança de evolução temporal, de modo que seja possível avaliar os resultados obtidos e comparar a sua eficiência;
- expansão do módulo espaço-temporal desenvolvido na biblioteca Terlib para comportar as trajetórias de mudança de cobertura como uma classe específica, considerando o estado da cobertura como a propriedade que varia ao longo do tempo;
- análise do comportamento das trajetórias de mudança de cobertura com o propósito de definir parâmetros para sistemas de simulação, inferindo posteriormente sobre a dinâmica de mudança de cobertura da terra; e
- investigação se as mudanças identificadas seguem algum tipo de distribuição espacial. O Padrão de Liderança pode indicar direções preferenciais de propagação.

Por fim, acredita-se que os conceitos e metodologia apresentados possibilitaram explorar a evolução temporal de trajetórias de mudança no domínio das coberturas florestais, contribuindo para o avanço na discussão sobre a dinâmica de mudança da cobertura da terra. No domínio computacional, as inovações metodológicas apresentadas são originais no campo de mineração de trajetórias de mudanças de cobertura e apresentam soluções que podem ser utilizadas por especialistas na análise exploratória de grandes bases de dados de cobertura, com possibilidade de extensão para outros contextos diferentes da degradação florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEREDO, M.; MONTEIRO, A. M. V.; ESCADA, M. I. S.; FERREIRA, K. R.; VINHAS, L.; PINHEIRO, T. F. Mineração de trajetórias de mudança de cobertura da terra em estudos de degradação florestal. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 4, p. 717–731, 2016. [23](#)

BERNDT, D. J.; CLIFFORD, J. Using Dynamic Time Warping to find patterns in time series. In: WORKSHOP ON KNOWLEDGE DISCOVERY IN DATABASES, WS-94-03., 1994, Seattle, WA. **Proceedings...** Palo Alto: AAAI, 1994. v. 10, p. 359–370. [28](#)

BOGORNY, V.; BRAZ, F. J.; ALVARES, L. O. C.; SIQUEIRA, F. L.; LOY, A. M.; MORENO, B. N.; TIMES, V. C. **Introdução a trajetórias de objetos móveis: conceitos, armazenamento e análise de dados**. Joinville: Editora da Univille, 2012. 116 p. ISBN 9788582090022. [21](#)

BOORI, M. S.; VOZENILEK, V. Assessing land cover change trajectories in Olomouc, Czech Republic. **International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Mining Engineering**, v. 8, n. 8, p. 540–546, 2014. [2](#), [14](#), [24](#)

_____. Remote sensing and land use/land cover trajectories. **Journal of Geophysics & Remote Sensing**, v. 3, p. 123, 2014. [23](#), [24](#)

BORG, I.; GROENEN, P. J. F. **Modern Multidimensional Scaling: theory and applications**. New York: Springer, 2005. 614 p. ISBN 9780387289816. [30](#)

BRAIMOH, A. K.; VLEK, P. L. Land-cover change trajectories in northern Ghana. **Environmental Management**, v. 36, n. 3, p. 356–373, 2005. [2](#), [14](#), [15](#), [23](#), [24](#)

CÂMARA, G.; VALERIANO, D. d. M.; SOARES, J. V. **Metodologia para cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos, SP, 2006. 24 p. [53](#)

CÂMARA, G.; VINHAS, L.; FERREIRA, K. R.; QUEIROZ, G. R. D.; SOUZA, R. C. M. D.; MONTEIRO, A. M. V.; CARVALHO, M. T. D.; CASANOVA, M. A.; FREITAS, U. M. D. Terralib: an open source GIS library for large-scale environmental and socio-economic applications. In: **Open source approaches in spatial data handling**. Berlin: Springer, 2008. cap. 12, p. 247–270. [53](#), [54](#)

CARMONA, A.; NAHUELHUAL, L. Combining land transitions and trajectories in assessing forest cover change. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 904–915, 2012. [12](#)

CARNEIRO, T. G. d. S. **Nested-CA**: a foundation for multiscale modelling of land use and land cover change. 116 p. INPE-14702-TDI/1227. Tese de Doutorado em Computação Aplicada — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2007. [12](#), [16](#)

CASANOVA, M. A.; CÂMARA, G.; JR, C. A. D.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. **Bancos de dados geográficos**. Curitiba, PR: MundoGeo, 2005. 506 p. [53](#)

CHEN, L.-q.; WANG, L.; YUAN, L.-s. Analysis of urban landscape pattern change in yanzhou city based on tm/etm+ images. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 1, n. 1, p. 1191–1197, 2009. [24](#)

COHEN, I.; MEDIONI, G. Detecting and tracking moving objects for video surveillance. In: COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 1999. **Proceddings...** Fort Collins: IEEE Computer Society Conference, 1999. v. 2, p. 319–325. [4](#)

COMBER, A. J. The separation of land cover from land use using data primitives. **Journal of Land Use Science**, v. 3, n. 4, p. 215–229, 2008. [1](#), [16](#)

COMBER, A. J.; WADSWORTH, R.; FISHER, P. Using semantics to clarify the conceptual confusion between land cover and land use: the example of forest. **Journal of Land Use Science**, v. 3, n. 2-3, p. 185–198, 2008. [9](#)

COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; LAMBIN, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1565–1596, 2004. [10](#), [13](#)

COSTA, F. d. A. Contributions of fallow lands in the Brazilian Amazon to CO2 balance, deforestation and the agrarian economy: inequalities among competing land use trajectories. **Elementa: Science of the Anthropocene**, v. 4, n. 1, p. 133, 2016. [18](#)

COY, M.; KLINGLER, M. Frentes pioneiras em transformação: o eixo da BR-163 e os desafios socioambientais. **Territórios e Fronteiras**, Instituto de Ciências Humanas e Sociais, v. 7, n. 1, p. 1–26, 2014. [89](#)

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. The KDD process for extracting useful knowledge from volumes of data. **Communications of the ACM**, v. 39, n. 11, p. 27–34, 1996. [18](#), [19](#)

FERREIRA, K. R. **An algebra for spatiotemporal data**: from observations to events. 122 p. 12.11.16.43-TDI. Tese de Doutorado em Computação Aplicada — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2012. [53](#)

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005. [1](#)

FRIEDMAN, A.; KOHLER, B. Bidimensional regression: assessing the configural similarity and accuracy of cognitive maps and other two-dimensional data sets. **Psychological Methods**, v. 8, n. 4, p. 468–491, 2003. [29](#)

FROHN, R. C.; HAO, Y. Landscape metric performance in analyzing two decades of deforestation in the Amazon Basin of Rondonia, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 2, p. 237–251, 2006. [14](#), [53](#)

GAVLAK, A. A.; ESCADA, M. I. S.; MONTEIRO, A. M. V. Dinâmica de padrões de mudança de uso e cobertura da terra na região do Distrito Florestal Sustentável da BR-163. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XV., 2011, Curitiba, PR. **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2011. v. 12, p. 6152–6160. [12](#), [14](#), [15](#), [16](#), [23](#), [24](#)

GEETHA, R.; SUMATHI, N.; SATHIYABAM, S. A survey of spatial, temporal and spatio-temporal data mining. **Journal of Computer Applications**, v. 1, n. 4, p. 31–33, 2008. [19](#)

GEIST, H.; MCCONNELL, W.; LAMBIN, E. F.; MORAN, E.; ALVES, D.; RUDEL, T. Causes and trajectories of land-use/cover change. In: **Land-use and land-cover change: local processes and global impacts**. Berlin: Springer, 2006. cap. 3, p. 41–70. ISBN 9783540322023. [11](#), [12](#), [18](#)

GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation: tropical forests are disappearing as the result of many

pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. **BioScience**, v. 52, n. 2, p. 143–150, 2002. 12

GIBSON, C. C.; OSTROM, E.; AHN, T.-K. The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey. **Ecological Economics**, v. 32, n. 2, p. 217–239, 2000. 2, 15

GIRI, C.; PENGRA, B.; LONG, J.; LOVELAND, T. R. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 25, p. 30–37, 2013. 1, 13

GOODCHILD, M. F. Spatial data analysis. In: LIU, L.; ÖZSU, M. T. (Ed.). **Encyclopedia of Database Systems**. New York: Springer, 2009. p. 2691–2692. ISBN 9780387399409. 18

GOODCHILD, M. F.; YUAN, M.; COVA, T. J. Towards a general theory of geographic representation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 21, n. 3, p. 239–260, 2007. 15

GRIMM, N. B.; FAETH, S. H.; GOLUBIEWSKI, N. E.; REDMAN, C. L.; WU, J.; BAI, X.; BRIGGS, J. M. Global change and the ecology of cities. **Science**, v. 319, n. 5864, p. 756–760, 2008. 12

GUDMUNDSSON, J.; KREVELD, M. van; SPECKMANN, B. Efficient detection of motion patterns in spatio-temporal data sets. In: ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, 12th., 2004, Washington, DC. **Proceedings...** New York: ACM, 2004. p. 250–257. 21

GUO, D.; LIU, S.; JIN, H. A graph-based approach to vehicle trajectory analysis. **Journal of Location Based Services**, v. 4, n. 3-4, p. 183–199, 2010. 21

HINTERBERGER, H. Exploratory data analysis. In: LIU, L.; ÖZSU, M. T. (Ed.). **Encyclopedia of Database Systems**. New York: Springer, 2009. p. 1080–1080. ISBN 9780387399409. 18

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Informações sobre os municípios brasileiros**. 2016. Disponível em: <<http://ibge.gov.br/cidadesat/xtras/home.php>>. Acesso em: 11 dezembro 2016. 56, 85

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites**: sistemas PRODES, DETER,

DEGRAD e QUEIMADAS 2007-2008. 2008. 47 p. Disponível em:
<<http://www.obt.inpe.br/publicacoes.htm>>. Acesso em: 11 dezembro 2016.
1, 16

_____. **Programa de Cálculo do Desflorestamento na Amazônia - PRODES**. São José dos Campos, SP, 2016. Disponível em:
<http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2016n.htm>. Acesso em: 30 dezembro 2016. 18

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598 p. 14

JEUNG, H.; YIU, M. L.; JENSEN, C. S. Trajectory pattern mining. In: ZHENG, Y.; ZHOU, X. (Ed.). **Computing with spatial trajectories**. New York: Springer, 2011. cap. 5, p. 143–177. ISBN 9781461416296. 2, 4, 21, 33

JIANYA, G.; HAIGANG, S.; GUORUI, M.; QIMING, Z. A review of multi-temporal remote sensing data change detection algorithms. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, n. B7, p. 757–762, 2008. 1, 13

KÄYHKÖ, N.; SKÅNES, H. Retrospective land cover/land use change trajectories as drivers behind the local distribution and abundance patterns of oaks in south-western Finland. **Landscape and Urban Planning**, v. 88, n. 1, p. 12–22, 2008. 12, 15, 23, 24

KODINARIYA, T. M.; MAKWANA, P. R. Review on determining number of cluster in K-Means Clustering. **International Journal of Advanced Research in Computer Science and Management Studies**, v. 1, n. 6, p. 90–95, 2013. 103

KRATZ, L.; NISHINO, K. Anomaly detection in extremely crowded scenes using spatio-temporal motion pattern models. In: COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2009. **Proceddings...** [S.l.]: IEEE Computer Society Conference, 2009. p. 1446–1453. 21

KRUSKAL, J. B. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. **Psychometrika**, v. 29, n. 1, p. 1–27, 1964. 30

KRUSKAL, J. B.; WISH, M. **Multidimensional scaling**. London: Sage, 1978. 96 p. 29

LAMBIN, E.; GEIST, H. J. **Causes of land-use and land-cover change**. 2007. Disponível em: <<http://www.eoearth.org/view/article/150964/>>. Acesso em: 04 janeiro 2017. 1, 9

LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; GEIST, H. J.; AGBOLA, S. B.; ANGELSEN, A.; BRUCE, J. W.; COOMES, O. T.; DIRZO, R.; FISCHER, G.; FOLKE, C.; GEORGE, P. S.; HOMEWOOD, K.; IMBERNON, J.; LEEMANS, R.; LI, X.; MORAN, E. F.; MORTIMORE, M.; RAMAKRISHNAN, P. S.; RICHARDS, J. F.; SKANES, H.; STEFFEN, W.; STONE, G. D.; SVEDIN, U.; VELDKAMP, T. A.; VOGEL, C.; XU, J. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environmental Change**, v. 11, n. 4, p. 261–269, 2001. 1, 10

LAUBE, P.; IMFELD, S. Analyzing relative motion within groups of trackable moving point objects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE, 2002. **Proceddings...** Berlin: Springer, 2002. p. 132–144. 2, 4, 20, 21, 33

LAUBE, P.; KREVELD, M. V.; IMFELD, S. Finding REMO - detecting relative motion patterns in geospatial lifelines. In: **Developments in spatial data handling**. Berlin: Springer, 2005. p. 201–215. ISBN 9783540267720. 2, 4, 21, 33

LIU, J.; SHAO, Q.; YAN, X.; FAN, J.; ZHAN, J.; DENG, X.; KUANG, W.; HUANG, L. The climatic impacts of land use and land cover change compared among countries. **Journal of Geographical Sciences**, v. 26, n. 7, p. 889–903, 2016. 1

LU, D.; LI, G.; MORAN, E. Current situation and needs of change detection techniques. **International Journal of Image and Data Fusion**, v. 5, n. 1, p. 13–38, 2014. 1

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDIZIO, E.; MORAN, E. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365–2401, 2004. 13

LUNETTA, R. S.; KNIGHT, J. F.; EDIRIWICKREMA, J.; LYON, J. G.; WORTHY, L. D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 2, p. 142–154, 2006. 9

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: BERKELEY SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL STATISTICS AND PROBABILITY, Fifth., 1967, Berkeley, CA. **Proceddings...** Oakland: University of California Press, 1967. v. 1, n. 14, p. 281–297. 6, 7, 52, 103

- MARCEAU, D. J.; HAY, G. J. Remote sensing contributions to the scale issue. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 4, p. 357–366, 1999. 15
- MARGULIS, S. Causes of deforestation of the Brazilian Amazon. **World Bank Working Paper**, Washington, DC, n. 22, p. 107, 2004. 18
- MENA, C. F. Trajectories of land-use and land-cover in the northern Ecuadorian Amazon: temporal composition, spatial configuration, and probability of change. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 6, p. 737–751, 2008. 2, 14, 15, 23, 24
- MERTENS, B.; LAMBIN, E. F. Land-cover-change trajectories in southern Cameroon. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 90, n. 3, p. 467–494, 2000. 2, 15, 23, 24
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Amazônia Legal**. Brasília, DF, 2004. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 04 janeiro 2017. 64
- MIRGE, V.; GUPTA, S.; VERMA, K. A novel approach for mining trajectory patterns of moving vehicles. **International Journal of Computer Applications**, v. 104, n. 4, p. 4–8, 2014. 21
- MULLER, M. Dynamic Time Warping. In: **Information retrieval for music and motion**. Berlin: Springer, 2007. cap. 4, p. 69–84. ISBN 9783540740483. 27
- NANNI, M.; PEDRESCHI, D. Time-focused clustering of trajectories of moving objects. **Journal of Intelligent Information Systems**, v. 27, n. 3, p. 267–289, 2006. 4
- OJIMA, D. S.; GALVAN, K. A.; TURNER, B. L. The global impact of land-use change. **BioScience**, v. 44, n. 5, p. 300–304, 1994. 11
- OVAREC, G. S. **Saga dos Pioneiros do Pará: Município de Novo Progresso/PA**. Novo Progresso: Prefeitura Municipal de Novo Progresso, 1998. 399 p. 59
- PETIT, C.; SCUDDER, T.; LAMBIN, E. Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 17, p. 3435–3456, 2001. 13, 15, 23, 24

PINHEIRO, T. F. **Padrões de trajetórias de degradação florestal em fronteiras madeiras da Amazônia**. 207 p. Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2015. Disponível em:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KMS44B>>. Acesso em: 10 junho 2016. xvi, xvii, 6, 7, 18, 23, 24, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 69, 85, 86, 98, 103, 104

PINHEIRO, T. F.; ESCADA, M. I. S.; VELERIANO, D. M.; HOSTERT, P.; GOLLNOW, F.; MULLER, H. Forest degradation associated with logging frontier expansion in the Amazon: the BR-163 region in southwestern Pará, Brazil. **Earth Interactions**, v. 20, n. 17, p. 1–26, 2016. 16

QUINLAN, J. R. **C4.5: Programs for Machine Learning**. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1993. 302 p. ISBN 1558602380. 53, 54

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 janeiro 2017. 103

RIVERO, S.; ALMEIDA, O. O dilema da produção madeira sustentável na Amazônia. **Boletim da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica**, n. 18, p. 8–12, 2008. 93

RUIZ, J.; DOMON, G. Analysis of landscape pattern change trajectories within areas of intensive agricultural use: case study in a watershed of southern Quebec, Canada. **Landscape Ecology**, v. 24, n. 3, p. 419–432, 2009. 12, 23, 24

SAKOE, H.; CHIBA, S. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 26, n. 1, p. 43–49, 1978. 6, 7, 26, 51, 102

SENIN, P. Dynamic Time Warping algorithm review. **Information and Computer Science Department University of Hawaii at Manoa Honolulu, USA**, v. 855, p. 1–23, 2008. 27, 28

SILVA, M.; CAMARA, G.; SOUZA, R.; VALERIANO, D.; ESCADA, M. Mining patterns of change in remote sensing image databases. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA MINING, Fifth., 2011. **Proceedings...** Washington: IEEE, 2005. p. 8. 24

SILVA, M. P. dos S.; CAMARA, G.; ESCADA, M. I. S.; SOUZA, R. C. M. D. Remote-sensing image mining: detecting agents of land-use change in tropical

forest areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 16, p. 4803–4822, 2008. [12](#)

SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 989–1003, 1989. [12](#), [13](#)

STRAW, A. D.; BRANSON, K.; NEUMANN, T. R.; DICKINSON, M. H. Multi-camera real-time three-dimensional tracking of multiple flying animals. **Journal of the Royal Society Interface**, p. 1–15, 2010. [21](#)

TAN, P.-N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. **Introdução ao data mining: mineração de dados**. Rio de Janeiro, RJ: Editora Ciência Moderna, 2009. 900 p. ISBN 9788573937619. [20](#), [31](#)

THÉAU, J. Change detection. In: KRESSE, W.; DANKO, D. M. (Ed.). **Springer Handbook of Geographic Information**. Berlin: Springer, 2012. cap. 7, p. 175–184. ISBN 9783540726807. [13](#)

THORNDIKE, R. L. Who belongs in the family? **Psychometrika**, v. 18, n. 4, p. 267–276, 1953. [52](#), [103](#)

TORGERSON, W. S. Multidimensional Scaling: theory and method. **Psychometrika**, v. 17, n. 4, p. 401–419, 1952. [6](#), [7](#), [29](#), [51](#), [102](#)

TURNER, B. L.; MEYER, W. B. Global land-use and land-cover change: an overview. In: MEYER, W. B.; TURNER, B. L. (Ed.). **Changes in land use and land cover: a global perspective**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. cap. 1, p. 3–10. ISBN 0521470854. [1](#), [9](#), [10](#)

TURNER, B. L.; MEYER, W. B.; SKOLE, D. L. Global land-use land-cover change: towards an integrated study. **AMBIO**, v. 23, n. 1, p. 91–95, 1994. [1](#), [14](#)

VELDKAMP, A.; LAMBIN, E. F. Predicting land-use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 85, n. 1-3, p. 1–6, 2001. [1](#)

WANG, D.; GONG, J.; CHEN, L.; ZHANG, L.; SONG, Y.; YUE, Y. Spatio-temporal pattern analysis of land use/cover change trajectories in Xihe watershed. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 14, n. 1, p. 12–21, 2012. [3](#), [12](#), [14](#), [15](#), [24](#)

_____. Comparative analysis of land use/cover change trajectories and their driving forces in two small watersheds in the western Loess Plateau of China.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 21, p. 241–252, 2013. 15, 23, 24

WANG, D.; GONG, J.; ZHANG, L.; SONG, Y. Spatiotemporal analysis of land use/cover change patterns in the new coastal district of Tianjin, China. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOINFORMATICS, 18th., 2010, Beijing, China. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1–6. 9

ZHOU, Q.; LI, B.; KURBAN, A. Spatial pattern analysis of land cover change trajectories in Tarim Basin, northwest China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, p. 5495–5509, 2008. 9

_____. Trajectory analysis of land cover change in arid environment of China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 4, p. 1093–1107, 2008. 1, 13, 23, 24

ZITOVÁ, B.; FLUSSER, J. Image registration methods: a survey. **Image and Vision Computing**, v. 21, n. 11, p. 977–1000, 2003. 13